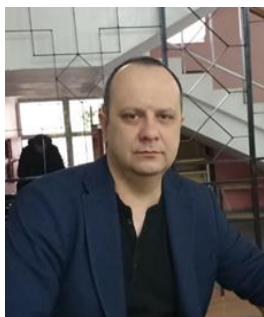


UDC 528.2
УДК 528.2131

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-121-131

**METHODS OF COMPENSATION OF IONOSPHERIC DELAY OF GNSS SIGNALS:
COMPARISON AND PROSPECTS OF APPLICATION**

**МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ ІОНОСФЕРНОЇ ЗАТРИМКИ GNSS-СИГНАЛІВ: ПОРІВНЯННЯ
ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ**



***Воронков Олексій Олександрович**, кандидат економічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: Oleksii.voronkov@kname.edu.ua*

<http://orcid.org/0000-0001-6905-0098>



***Кухар Максим Анатолійович**, кандидат технічних наук, доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: ppoosshhtaa@ukr.net*

<https://orcid.org/0000-0001-8305-6269>



***Маслій Любов Олексіївна**, завідувач лабораторії, старший викладач кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Харків, Україна, e-mail: gnomomir@gmail.com*

<https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

Анотація. Метою статті є узагальнення, систематизація та порівняльний аналіз сучасних методів корекції іоносферних поправок у глобальних навігаційних супутникових системах (GNSS), визначення їх ефективності, особливостей застосування, переваг та недоліків, а також оцінювання можливостей компенсації іоносферної затримки у завданнях координатних визначень.

Подано узагальнення результатів наукових досліджень щодо існуючих методів компенсації іоносферної затримки, серед яких найпоширенішими є емпіричні, математичні та комбіновані підходи. Особливу увагу приділено використанню карт глобального повного електронного вмісту GIM, показано, що такі карти дозволяють компенсувати до 90–95 % іоносферної затримки, тоді як регіональні моделі TEC, побудовані на основі щільних мереж локальних станцій, дають змогу підвищити точність позиціонування ще на 30–50 % завдяки високій просторово-часовій роздільності та адаптивності до локальних умов.

Результати проведеного аналізу свідчать, що ефективність компенсації іоносферних затримок залежить від обраного методу, типу приймача та умов спостережень. Для завдань високоточного

координатного забезпечення оптимальним є поєднання двочастотних спостережень з використанням регіональних моделей TEC або карт GIM IONEX, тоді як для оперативної навігації доцільно застосовувати математичні моделі часових рядів та системи супутникового доповнення SBAS.

Отже, подальший розвиток методів моделювання іоносфери має бути спрямований на інтеграцію регіональних та глобальних іоносферних моделей із системами реального часу, що дозволить забезпечити стабільну та високу точність GNSS-позиціонування у широкому спектрі геодезичних і навігаційних завдань.

Ключові слова: GNSS-технології, похибки GNSS-вимірів, іоносфера Землі, іоносферна рефракція, глобальна іоносферна карта, регіональна модель TEC, супутникова геодезія, математична обробка геодезичних даних, складні системи.

Вступ. Системи глобальної навігації (GNSS) є ключовими інструментами для високоточного позиціонування, навігації та синхронізації часу в різних сферах, включаючи транспорт, геодезію, авіацію та наукові дослідження. Однак точність GNSS сигналів суттєво знижується через іоносферну затримку, яка спричинена взаємодією радіосигналів із зарядженими частинками в іоносфері. Ця затримка залежить від частоти сигналу, стану іоносфери, часу доби, географічного розташування та сонячної активності, що ускладнює прогнозування та компенсацію. Іоносферна затримка призводить до помилок у визначенні координат, які можуть досягати кількох метрів, що є критичним для застосувань, де потрібна висока точність (наприклад у геодезії або автономному транспорті). Існуючі методи корекції мають обмеження, зокрема високу вартість обладнання, залежність від зовнішніх джерел даних або недостатню точність у регіонах із високою іоносферною активністю.

Таким чином, існує проблема розробки ефективних, економічно доступних та універсальних методів усунування впливу іоносферної затримки сигналів GNSS, які б забезпечували високу точність позиціонування в реальному часі для широкого спектра застосувань. Покращення розуміння цієї проблеми потребує проведення огляду існуючих методів корекції іоносферних поправок, а також наявних моделей параметрів іоносферного шару Землі, визначення особливостей їх використання, переваг та недоліків, оцінювання ефективності підходів компенсації впливу іоносферної затримки у вирішенні завдань координатних визначень як у реальному часі, так і під час постобробки. Крім того, особливим питанням є застосовування інструментарію супутникової геодезії для формування просторового забезпечення складних територіальних систем. Проблемним залишається формування інформаційного забезпечення супутникової геодезії, які застосовуються для математичної обробки геодезичних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив іоносферного шару Землі на параметри радіосигналів на шляху їх проходження через іоносферу зумовлює велику увагу вчених до вивчення її стану. Дослідженням процесів, що відбуваються у шарі іоносфери, займається ряд провідних зарубіжних університетів і дослідницьких інститутів. В Україні роботи з вирішення цієї проблеми проводять такі провідні установи, як Інститут космічних досліджень, Інститут іоносфери, Радіоастрономічний інститут, а також Інститут радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова. Автори багатьох наукових робіт відзначають, що вплив іоносфери на радіосигнали є переважаючим джерелом похибок GNSS сигналів, до того ж складність їх точного врахування пов'язана з труднощами створення адекватної моделі стану іоносфери у зв'язку із суттєвою нестійкістю її параметрів [1–5]. Більшість пропонує моделей повного електронного вмісту ПЕВ (Total Electron Content TEC) ґрунтуються на результатах GNSS-спостережень, що опрацьовані за допомогою спеціального математичного апарату [1–12]. Найпоширенішою моделлю компенсації іоносферної затримки є відома модель Klobuchar, що застосовується у одночастотних GNSS-приймачах. Ця модель ґрунтується на даних навігаційного повідомлення супутників та, враховуючи добову зміну TEC, забезпечує усунування близько 50 % від похибки вимірювання псевдовіддалі. Пропонуються моделі, що підвищують ефективність моделі Klobuchar, зокрема NTCM та NeQuick. Дослідження моделі NTCM, що ґрунтується на отриманих за моделлю Klobuchar даних, показали кращу її продуктивність. Отримані за цією моделлю значення середньої квадратичної похибки (Root Mean Square Error, RMSE) позиціонування менші на 0,24 м під

час спокійного стану іоносфери і на 0,45 м під час збуреного стану порівняно з моделлю Klobuchar [8]. Кліматологічна модель NeQuick з її модифікацією NeQuick 2 надає типові середні параметри іоносфери і дані про вертикальний та похилий вміст електронів шляхом формування 3D-специфікації електронної щільності іоносфери. Практичне використання моделі для супутникової навігації та позиціонування показало, що модель NeQuick має кращі характеристики, ніж модель Klobuchar, у 98 % тестів модель забезпечила кращу оцінку іоносферної затримки [13].

Автори робіт [1, 4, 10] відзначають ефективність застосування математичного апарату часових рядів, що забезпечує короткочасне прогнозування змін параметра TEC, вплив факторів сезонності, а отже вищу точність розв'язків у завданнях координатних визначень.

Найбільше ефективним розв'язанням завдання із усунення іоносферної затримки є застосування двочастотних GNSS-приймачів із безіоносферною лінійною комбінацією спостережень обох частот. Кращі результати за точністю надає використання фазових GNSS-спостережень, але цей метод вимагає надійного вирішення фазових неоднозначностей, що одночасно ускладнює розв'язання задачі [6]. Авторами [10] визначені переваги й недоліки низки методів обчислення параметрів іоносфери за результатами двочастотних GNSS спостережень. У статті [1] розглянуто методи корекції іоносферних поправок із використанням для координатних визначень одно- та двочастотних приймачів. Відзначено, що використання двочастотних кодових вимірювань забезпечує істотно меншу оцінку RMSE порівняно з одночастотними.

Для врахування іоносферних спотворень застосовують емпіричні іоносферні моделі, а також карти ПЕВ, які є основним параметром для опису й характеристики стану іоносфери. Емпірична іоносферна модель (IRI), рекомендована Міжнародною спілкою радіонаукових досліджень (URSI) як базова модель прогнозування поширення радіохвиль. Модель IRI побудована на підставі експериментальних даних за такими методами радіозондування іоносфери, як вертикальне наземне і супутникове, а також некогерентне розсіювання [14, 15]. Модель IRI забезпечує визначення ПЕВ та середньомісячні значення електронної щільності, температури, а також іонний склад на висотах 50-2000 км. Авторами [11] розроблено нелінійні моделі TEC для чотирьох віддалених станцій, розташованих у Канаді, Китаї, Австралії та Антарктиді, що побудовані на підставі GNSS -даних за допомогою нелінійного методу найменших квадратів. Аналіз показує істотне покращення точності значень та гарне узгодження зі GNSS -спостереженнями TEC у різних регіонах, що відрізняються за широтою, а також перевищують за точністю дані моделі IRI-2016.

Низка робіт [2, 3, 7, 16] присвячена побудові регіональних просторово-часових моделей ПЕВ з високою роздільною здатністю для забезпечення точного оцінювання цього параметра з метою усунення іоносферної затримки з GNSS-вимірювань. Стаття [7] містить розроблену методику обчислення такого параметру іоносфери як загальна електронна концентрація, що ґрунтується на використанні спеціально створеного алгоритму згладжування кодових GNSS спостережень фазовими у режимі реального часу. Методику апробовано для визначення загальної електронної концентрації за даними перманентної станції RVNE, що належить до складу мережі ZAKPOS/UA-EUPOS. У [16] запропоновано алгоритм побудови просторово-часової моделі параметра іоносфери VTEC. Модель створена на підставі низки значень іонізаційного параметра, отриманих з постійних станцій мережі ZAKPOS, має високу роздільну здатність і забезпечує стандартне відхилення модельованих значень параметра VTEC від його вимірюваних значень, яке не перевищує 1TECU.

Метою дослідження є огляд існуючих методів корекції іоносферних поправок, визначення особливостей їх використання, переваг та недоліків і порівняння ефективності методів компенсації впливу іоносферної затримки у розв'язанні завдань координатних визначень.

Виклад основного матеріалу. Вирішення багатьох завдань у різних галузях діяльності людини ґрунтуються на даних, отриманих за допомогою GNSS. Доступність, швидкість та зручність використання GNSS технології зумовили їх поширення, а безперервний розвиток та вдосконалення забезпечують користувачів все досконалішими за якістю даними. Якість інформації характеризується, перед усім, її достовірністю і точністю. Відомо, що на шляху розповсюдження супутникові радіосигнали піддаються множині різних впливів, що спричинює похибки. Джерела похибок прийнято

поділяти на три групи: помилки супутника, помилки приймача та помилки поширення. До помилок поширення відносять спотворення супутникових радіосигналів під час їх проходження крізь шари атмосфери Землі, серед яких, як найбільше характерні, виділяють тропосферу (до 9-17 км над поверхнею Землі), тропопаузу (до 50 км), стратосферу (50-55 км) та іоносферу (50-1500 км), які відрізняються фізичними властивостями, а отже чинять різний вплив на GNSS-сигнали. Причому вплив тропосфери, тропопаузи і стратосфери об'єднують у тропосферну рефракцію, що спричинена взаємодією електромагнітних хвиль радіосигналу з атомами і молекулами цього шару, які викривляють шлях та зменшують швидкість проходження сигналу внаслідок зміни коефіцієнта заломлення середовища. Отже радіосигнал запізнюється щодо часу його проходження із швидкістю у вакуумі. Тропосфера є недиспергувальним середовищем, тобто тропосферна рефракція не залежна від частоти радіосигналу.

З шаром іоносфери справа складніша, іоносфера є переважаючим джерелом похибок супутникових спостережень, іоносферна затримка може становити від кількох до десятків метрів [1, 2]. Крім того, шару іоносфери Землі властива нестабільність стану, який, у першу чергу, визначається динамічністю процесів, що відбуваються на Сонці, а також піддається впливу енергії, яку виділяє поверхня Землі внаслідок землетрусів, вибухів, запусків космічних апаратів, потужних техногенних катастроф тощо [2], залежить від сезонності та від широти місцевості [7]. Зростання вимог до точності позиціонування і навігації зумовлює необхідність вдосконалення вже наявних методів і розроблення нових підходів та алгоритмів оцінювання іоносферної затримки радіосигналів. Це вимагає розуміння особливостей фізичних процесів, що відбуваються у шарах атмосфери [4, 8].

Радіосигнал супутника під час проходження через земну атмосферу взаємодіє з її зарядженими частинками, нейтральними атомами і молекулами, внаслідок чого їхня швидкість і напрямок поширення змінюються. Найбільший вплив на радіосигнал надає шар іоносфери, який відрізняє наявність вільних електронів та іонів [1, 6]. *Фізичний процес впливу іоносфери полягає у такому.* Під дією сонячної радіації молекули газу розкладаються на іони та вільні електрони, що відбувається у денний час доби. Вночі вільні іони та електрони рекомбінують, а отже їх концентрація зменшується. Крім того, щільність вільних заряджених частинок в іоносфері залежна від сонячної активності, тобто від інтенсивності процесів, що відбуваються на Сонці. Отже, щільність вільних заряджених частинок у шарі іоносфери постійно змінюється. Іонізований шар іоносфери є диспергувальним середовищем, тобто різні частоти радіосигналів піддаються різному спотворенню на шляху поширення, що залежить від щільності заряджених частинок в іоносфері та частоти радіосигналу. Щільність вільних заряджених частинок іоносфери характеризують спеціальним чинником - повним електронним вмістом ПЕВ (Total Electron Content TEC), числове значення якого (1) дорівнює кількості електронів, що містять стовп газу, перетин якого дорівнює 1 м^2 :

$$\text{TEC} = \int_S^R n_e(s) ds, \quad (1)$$

де $n_e(s)$ – щільність вільних електронів на шляху радіосигналів від супутника S до GNSS-приймача R .

Відстань, що проходить радіосигнал від супутника, становить від 20000 км, коли супутник у зеніті, до приблизно 26000 км, коли супутник сходить або заходить. Як одиницю виміру параметра TEC прийнято TEC Units (TECU), що вважають рівною $\text{TECU} = 10^{16}$ електронів/м².

Шлях проходження радіосигналів через іоносферу у напрямку зеніту є найкоротшим, а ПЕВ на цьому шляху – найменший, його називають вертикальним параметром TEC і позначають VTEC (Vertical TEC). Розрізняють також похилі значення ПЕВ, що позначають STEC (Slant TEC).

Для діапазону частот L1 і L2 іоносфера є диспергувальним середовищем і чинить на радіосигнал супутника істотний вплив. Іоносферна рефракція залежна від концентрації електронів та обернено-пропорційна квадрату частоти, отже, радіосигнал має випередження за фазою Δ_ϕ (2) та іоносферну затримку для псевдовіддалі за кодами Δ_p (3), що прямо пропорційні параметру TEC:

$$\Delta_{\Phi} = -\frac{40,3TEC}{f^2}; \quad (2)$$

$$\Delta_P = \frac{40,3TEC}{f^2}, \quad (3)$$

де TEC – загальний вміст електронів, електронів/м²; f – частота сигналу, Гц.

Похибе значення іоносферної затримки обчислюють за вертикальною затримкою (4):

$$\Delta_{STE C} = \Delta_{VTE C} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\cos^2\beta}}, \quad (4)$$

де β – кут, під яким супутник видимий приймальною антеною.

Як відомо, радіосигнал являє собою спектр різних частот, отже його спектральні складники спотворюються по-різному, і виникають різниці затримок між частотами радіосигналу.

Оскільки вплив сонячної радіації визначається інтенсивністю процесів, що відбуваються на Сонці, моделювання і прогнозування стану іоносфери утруднено. Останніми роками завдяки розвитку глобальних навігаційних супутникових систем та їх широкому застосуванню реалізується можливість визначення параметрів іоносфери за результатами аналізу радіосигналів супутників, що істотно зменшило матеріальні і часові затрати на дослідження іоносфери та сприяло розробленню відповідних методик для розрахунку її параметрів з метою усунення з супутникових спостережень іоносферної затримки [2, 6, 10].

У більшості одночастотних GNSS-приймачів для зменшення іоносферної затримки використовується модель Клобучара (Klobuchar model), яка враховує добову зміну TEC та положення Сонця. У навігаційному повідомленні супутники GNSS передають вісім параметрів моделі, які є функціями рівня сонячного випромінювання та сезонності, що дозволяє компенсувати близько 50 % похибки вимірювання псевдовіддалі через некомпенсовану іоносферну затримку. У середніх широтах остаточна затримка може перевищувати 10м, залежно від сонячної активності [9].

Є кілька моделей, що покращують модель Klobuchar. Зокрема, це алгоритм іоносферної корекції NTCM та його модифікація MNTCM-BC, якими можна скористатись замість моделі Klobuchar. Пропоновані алгоритми забезпечують зменшення RMSE на 0,24 м для спокійного стану іоносфери та на 0,45 м для її збуреного стану [8, 12].

Інший підхід до оцінювання та коригування іоносферних затримок полягає у застосуванні математичного апарату часових рядів, зокрема для прогнозу короткочасних змін TEC у задачах координатних визначень, а також метод експоненційного згладження Хольта-Вінера [10]. Моделі часових рядів у геодезії застосовують для аналізу, прогнозування та виявлення закономірностей у змінах у часі геодезичних вимірювань. Вони особливо важливі в задачах моніторингу деформацій споруд, земної кори, гідрологічних процесів та супутникових вимірювань.

У геодезії стан іоносфери має велике значення, оскільки він впливає на точність супутникових вимірювань. Іоносферні збурення викликають додаткові похибки у визначенні координат, висот та часових параметрів. Тому часові ряди застосовують для моделювання і прогнозування стану іоносфери, зокрема її електронної концентрації, для якої виділяють тренди та циклічності, зокрема, добові та сезонні зміни, 11-річний сонячний цикл. За допомогою спектрального аналізу, використання гармонічних моделей та Фур'є-аналізу моделюють геомагнітні збурення та бурі іоносфери. За стохастичними моделями ARIMA, SARIMA отримують прогноз короткочасних змін TEC, а за моделлю AR (модель авторегресії) – аналіз залежностей між теперішнім і минулим станом іоносфери.

Калманівський фільтр у GNSS-навігації застосовують для оперативного оцінювання іонізованої складової затримки сигналу та її прогнозування. Короткостроковий прогноз, від кількох хвилин до кількох годин використовують для реального часу в навігації, середньостроковий прогноз на період від доби до кількох діб – для планування геодезичних спостережень, а довгостроковий прогноз на тижні та місяці – для дослідження циклів сонячної активності та глобальних змін.

За часовим рядом значень TEC для певної GNSS-станції, можна виділити тренд, наприклад, сезонне зростання під час сонячного максимуму, виявити добову гармоніку, застосувати алгоритм ARIMA або LSTM для прогнозу значень TEC на кілька годин уперед. Цей прогноз дозволяє зменшити похибки під час обчислення координат і підвищити точність навігаційних рішень.

Перевагою методу числових рядів, перед усім, є підвищення точності GNSS-вимірювань, зокрема, зменшення іоносферної похибки у визначенні координат, висот і часу, що особливо важливо для високоточних вимірів. Можливість короткострокового прогнозу, що важлива для оперативної навігації, авіації, мореплавства, реалізують моделі ARIMA та Kalman, які дозволяють передбачати зміни TEC на години уперед [4]. Ефективність застосування математичного апарату часових рядів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Ефективність застосування математичного апарату часових рядів порівняно з емпіричними моделями

Table 1 – Efficiency of the application of the mathematical apparatus of time series compared to empirical models

Критерій	Емпіричні (IRI, NeQuick)	Моделі часових рядів
Точність	Обмежена, часто неможливе врахування локальних та короткочасних збурень	Вища точність завдяки аналізу реальних вимірювань TEC у F2
Прогнозування	Ґрунтується на усереднених даних	Дає короткостроковий та середньостроковий прогнози
Реальний час	Слабка адаптивність до реального часу	Легко адаптується через фільтри та онлайн-моделі
Урахування циклічностей	Добові та сезонні цикли визначені наперед, отже не точно	Виділяє реальні циклічності безпосередньо з даних
Виявлення збурень	Не завжди коректно відображає геомагнітні збурення	Чутливі до різких змін, можуть фіксувати аномалії
Гнучкість	Модель важко адаптувати до локальних умов	Легко адаптується під конкретну станцію або регіон
Застосування в геодезії	Підходять для довгострокових усереднених оцінок	Найкращі для точних GNSS-вимірювань у реальному часі

Отже, традиційні моделі придатні для глобальних довгострокових оцінок, а часові ряди – для оперативних прогнозів і забезпечення високоточних геодезичних вимірювань.

Треба відзначити широке використання емпіричних моделей іоносфери, таких як Міжнародна еталонна модель іоносфери сімейства моделей IRI [14, 15] із останньою модифікацією IRI 2020 та NeQuick [13], що задовольняють вимогам оперативності моделювання просторового розподілу ПЕВ (TEC) за рахунок ефективніших емпіричних підходів та обчислень. NeQuick – це напівемпірична модель, яка описує просторові та часові варіації щільності електронів в іоносфері. Вона надає дані про вертикальний та похилий вміст електронів для будь-якого заданого шляху і демонструє кращі результати з максимальними похибками щодо моделі Klobuchar. Порівняння двох моделей показало, що модель NeQuick має кращі характеристики, ніж модель Klobuchar. Остання модифікація моделі NeQuick – модель NeQuick 2, оцінка її ефективності відповідає сучасним підходам, що отримані за даними експериментів для моделі IRI 2020.

Для покращення компенсації іоносферної затримки супутниковою системою доповнення SBAS (Satellite-Based Augmentation System) у реальному часі надсилаються корекції іоносферної затримки.

SBAS використовує наземні станції для моніторингу GNSS-сигналів та передає корекції в реальному часі через супутники. Наземні контрольні станції постійно приймають сигнали від супутників та обчислюють помилки позиціонування, включаючи іоносферну затримку, помилки ефемерид, зсув годинника супутника, а центр обробки даних формує корекційні повідомлення. Через SBAS-супутник ці корекції транслюються назад до користувачів. GNSS-приймач отримує SBAS-корекції та вносить поправки до своїх вимірювань, забезпечуючи точність 1-3 метри.

Іоносферну групову затримку і фазове випередження можна оцінити за двочастотними вимірами та істотно виключити вплив іоносфери на їхню точність. Для цього утворюють різниці між параметрами вимірів, у яких нові параметри розглядають як нові виміри. Проте, по-перше, доводиться враховувати їхню кореляцію з попередніми параметрами, а по-друге, нові виміри стають більш зашумленими, особливо це стосується іоносферної затримки через її залежність, окрім рівня сонячної активності під час спостереження, від висоти супутника над горизонтом, широти приймача та часу доби. Частково, на 25-50 %, іоносферну затримку усувають шляхом використання іоносферної моделі, що надається у навігаційному повідомленні, але у фазових вимірах залишається істотне остаточне зміщення, оскільки вплив іоносфери становить десятки метрів. Найбільше ефективним способом компенсації іоносферної затримки є спостереження на двох частотах L-діапазону з подальшим використанням лінійних комбінацій фази, вільних від впливу іоносфери (iono-free). Використання фазових GNSS-спостережень забезпечує сантиметрову точність координатних визначень, але лише за умови надійного розв'язання фазових неоднозначностей на двох несучих частотах, що істотно утруднює розв'язання задачі.

Міжнародна служба IGS (International GNSS Service) поширює глобальні карти GIM (Global Ionospheric Map) вертикального іоносферного ПЕВ (VTEC, vertical total electron content), які створені на підставі супутникових даних [17]. Дані карт GIM зазвичай розповсюджуються у форматі IONEX (IONosphere map EXchange format) у вигляді таблиць або матриць, що містять значення VTEC на сітці широти/довготи з часовими інтервалами. Формат IONEX є стандартом обміну картами іоносферного вмісту. Для створення карт GIM глобальні наземні станції GNSS здійснюють збір даних, що після певного опрацювання й усереднення збирають у сітку, наприклад з кроком $2,5^\circ$ широти та 5° довготи і за часом 2 години. Карти містять значення VTEC в TECU одиницях. Опрацьовані файли у форматі IONEX публікують для користувачів GNSS та дослідників іоносфери тощо. Пропонуються до використання такі форми GIM: кінцева версія із затримкою близько 11 днів (Final GIM), обновлювана щодня із затримкою до 1 доби (Rapid GIM), карти, що генеруються в реальному часі (Real-Time GIM або RT-GIM) та прогнози GIM, передбачувані на 1-2 доби уперед.

Помилки карт GIM, тобто відхилення від справжнього VTEC, зазвичай виражають в одиницях TECU. Точність залежить від щільності станцій, космічної погоди, варіацій іоносфери, методів інтерполяції та моделювання. При високій сонячній активності або магнітних бурях похибки зростають. У дослідженнях RMS, RT-GIM їхні значення могли досягати 7-12 TECU під час високої активності. Також важливим елементом є оцінка невизначеностей карти, яку часто включають у IONEX як RMS сітки. Карти GIM/IONEX застосовують для корекції іоносферного зсуву з метою підвищення точності позиціонування та інтегрують у геодезичні системи для підвищення точності обчислень, зокрема у супутниковій геодезії.

За наявності щільної мережі локальних GNSS-станцій створюють регіональні моделі TEC, які дозволяють враховувати певні особливості іоносфери в даному регіоні. Головною перевагою регіональних моделей TEC є вища точність порівняно із глобальними картами GIM, оскільки глобальні моделі мають розріджену просторову роздільність, що становить $2,5^\circ \times 5^\circ$, тоді як регіональні моделі істотно детальніші, наприклад, просторова роздільність може становити $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ або краще. Це дозволяє точніше описувати дрібномасштабні варіації TEC та врахувати регіональну специфіку іоносфери [2, 3, 7, 16]. Регіональні моделі можуть краще враховувати локальні особливості, наприклад, ефекти середніх широт. Зокрема, для України актуальним є моделювання середньширотної іоносфери з урахуванням сезонних змін. Головна перевага регіональних моделей TEC – підвищена точність і надійність у конкретному регіоні завдяки густій мережі спостережень і більшій просторово-часовій

роздільності. Крім того, регіональні моделі мають кращу оперативність і адаптивність за рахунок того, що регіональні центри часто оновлюють моделі в реальному часі. На відміну від глобальних моделей, що містять усереднені дані, регіональні дозволяють оперативно виявити локальні аномалії та краще їх компенсувати. Дослідження показують, що регіональні моделі TEC можуть зменшувати залишкову похибку на 30-50 % порівняно з глобальними картами, а у деяких випадках точність корекції досягає 90-95 % іоносферної затримки.

Висновки. В умовах стрімкого розвитку GNSS-технологій та зростання вимог до точності супутникових вимірювань вплив іоносферної затримки залишається істотним обмежуючим фактором. Огляд підходів та методів компенсації іоносферної затримки у супутникових вимірах показує, що у випадку використання одночастотних GNSS-приймачів, яке часто використовують на практиці, точної компенсації іоносферних похибок можна досягти тільки з використанням додаткової інформації, а саме диференціальних корекцій та іоносферних моделей. Окрім моделі Klobuchar, яка компенсує іоносферну затримку на 50 %, для підвищення точності доцільно застосовувати дані супутникової системи доповнення SBAS та GIM IONEX (IGS), або за можливістю, регіональної моделі TEC.

Для розв'язання геодезичних задач, що вимагають високоточного вимірювання базових ліній довжиною понад 500 кілометрів, з метою компенсації іоносферної затримки застосовують метод двочастотних вимірів у діапазонах L1 і L2. Використання двочастотних GNSS-приймачів забезпечує можливість формування лінійних комбінацій двочастотних вимірів, що не містять іоносферних похибок і використовуються для майже повного виключення впливу іоносфери за подвійними різницями фаз. Проте це вимагає надійного вирішення фазових неоднозначностей, що ускладнює процес.

Головною перевагою регіональних моделей TEC є підвищення точності завдяки щільній мережі спостережень, краща оперативність за рахунок своєчасного оновлення моделі у реальному часі та можливість оперативно виявляти локальні аномалії. Побудова точної регіональної моделі має ґрунтуватись на глибокому усвідомленні фізичних процесів, що відбуваються у іоносфері у певному регіоні, та точному оцінюванні відповідних параметрів.

Під час розв'язання задач координатно-часового забезпечення для мінімізації помилок GNSS-вимірювань і підвищення їх загальної точності вирішальним є вибір найбільше ефективної моделі та методів її адаптації для задоволення вимог до точності.

Підсумовуючи, слід зазначити, що вибір оптимального методу компенсації іоносферної затримки залежить від конкретних вимог до точності, регіону застосування та типу GNSS-приймача. З метою забезпечення максимальної точності позиціонування у координатно-часовому просторі доцільно поєднувати двочастотні вимірювання, регіональні моделі та сучасні методи прогнозування, які адаптовані до локальних умов іоносфери.

Перелік посилань

1. Ярош О., Янків-Вітковська Л. Сучасні підходи до аналізу іоносферної поправки в GNSS-вимірах. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. 2024. випуск II (48) . С. 29–33. URL: <https://ena.lpnu.ua/items/8f8a178c-e6e1-4a4f-8870-b794d54c38dc>
2. Янків-Вітковська Л. М., Джуман Б. Б. Побудова просторово-часової моделі параметру іоносфери VTEC. Вісник Національного технічного університету «КПІ». Серія: Радіотехніка та радіоапаратобудування. 2020. № 80. С. 21–28.
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. Ярош О., Янків-Вітковська Л. Сучасні підходи до зменшення іоносферної поправки в GNSS-вимірах. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2024», 10–12 квітня 2024 р., Львів-Брюховичі. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2024. С. 141–142.
5. Yankiv-Vitkovska L.M., Savchuk S.H., Pauchok V.K., Matviichuk Y.M., Bodnar D.I. 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. 2016. Vol. 1(9). P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.17265/2332-8223/2016.01.005>

6. Безсонов С.А. Удосконалення мережевих методів і алгоритмів оцінки та урахування іоносферних і тропосферних затримок сигналів глобальних навігаційних супутникових систем в задачах точного позиціонування : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.12.17. Харків: нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2015. 23 с.

7. Янків-Вітковська Л.М., Савчук С.Г., Янчук Р.М. Про визначення параметрів іоносфери на GNSS-станції RVNE в режимі реального часу. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки». 2013. Випуск 3(63). С. 308–315.

8. Mohammed Mainul Hoque, Norbert Jakowski and Jens Berdermann. Positioning performance of the NTCM model driven by GPS Klobuchar model parameters. J. Space Weather Space Clim. 2018. Volume 8, Article Number 20. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1051/swsc/2018009>

9. Лізунов Г.В., Корепанов В.Є., Лукенюк А.А., П'янькова О.В., Федоров О.П. Космічний проєкт «Іоно-сат-Мікро»: готовність до реалізації. Космічна наука і технологія. 2022. № 6 (139). С. 3–11. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003>

10. Янків-Вітковська Л. Використання двочастотних GNSS спостережень для визначення параметрів іоносфери. Геодезія, картографія і аерофотознімання. 2012. № 76. С. 19–28. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap>.

11. Bingbing Zhang, Jiqiang Niu, Wang Li, Yi Shen, Tangting Wu, Weifeng Yang, Wenping Deng. A single station ionospheric empirical model using GPS-TEC observations based on nonlinear least square estimation method. Advances in Space Research. 2021. Volume 68. Issue 9. P. 3821–3834. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.017>

12. Mallika L., Ratnam D.V., Raman S., Sivavaraprasad G. Machine learning algorithm to forecast ionospheric time delays using global navigation satellite system observations. Acta Astronautica. 2020. № 173. P. 221–231.

13. Sandro Radicella, Nava B. NeQuick model: Origin and evolution. Annals Of Geophysics. 2009. Vol. 52. № ¾. Pp. 417–422. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2010.5696491>

14. Bilitza D. IRI the international standard for the ionosphere. Advances in Radio Science. 2018. № 16. P. 1–11

15. Reznichenko M.O., Bogomaz O.V., Reznichenko A.I., Kotov D.V. Comparison of the IRI-2020 model predictions with the observations in the european-african longitudinal sector during the period of 1-9 february 2022. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 32-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD–2024, Харків: НТУ "ХПІ", 2024. С. 1487. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8b1fd9c2-a63c-4b5c-8661-180b9c97be52>

16. Yankiv-Vitkovska L., Dzhuman B. Constructing of regional model of ionosphere parameters. Geodesy, Cartography and Aerial photography. 2017. Volume 85. № 85. P. 27–35. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2017.01.027>

17. Ren X., Chen J., Li X., Zhang X., Freeshah M. Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centerse GPS Solutions. 2019. № 23(4). P. 1–17.

METHODS OF COMPENSATION OF IONOSPHERIC DELAY OF GNSS SIGNALS: COMPARISON AND PROSPECTS OF APPLICATION

Voronkov Oleksii, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor of the department of land administration and geoinformation systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: Oleksii.voronkov@kname.edu.ua, tel. +380505782843, <http://orcid.org/0000-0001-6905-0098>

Kukhar Maksym, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail: pooosshhtaa@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8305-6269>

Maslii Lubov, Head of laboratory, Senior lecturer, of the Department of Land Administration and Geoinformation Systems, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Ukraine, e-mail gnomomir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3844-462X>

Summary. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are critical for high-precision positioning, navigation, and time synchronization across various domains, including transportation, geodesy, aviation, and scientific research. However, the accuracy of GNSS signals is significantly affected by ionospheric delay, caused by the interaction of radio signals with charged particles in the ionosphere. This delay, influenced by signal frequency, ionospheric conditions, time of day, geographic location, and solar activity, introduces positioning errors that can reach several meters, posing challenges for applications requiring high precision, such as geodesy and autonomous navigation. Existing correction methods, including the widely used Klobuchar model, SBAS augmentation systems, and global ionospheric maps (GIM), have limitations, such as high equipment costs, reliance on external data, or insufficient accuracy in regions with high ionospheric variability. This article reviews current methods for mitigating ionospheric delay, analyzing their features, advantages, and drawbacks, and evaluates their effectiveness in real-time and post-processing coordinate determination tasks.

The study highlights that single-frequency GNSS receivers, commonly used in practice, rely on models like Klobuchar, which compensates for approximately 50% of ionospheric errors. More advanced models, such as NTCM and NeQuick, offer improved accuracy, reducing root mean square errors (RMSE) by 0.24–0.45 meters depending on ionospheric conditions. Dual-frequency GNSS receivers, utilizing ionosphere-free linear combinations of L1 and L2 band measurements, provide superior accuracy but require resolving phase ambiguities, which complicates implementation. Regional Total Electron Content (TEC) models outperform global GIMs due to higher spatial-temporal resolution (e.g., $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ vs. $2.5^\circ \times 5^\circ$), achieving up to 90–95% error reduction in specific cases. Time-series analysis methods, such as ARIMA, SARIMA, and Kalman filtering, enable short-term TEC forecasting, enhancing real-time navigation and geodetic measurements. The article emphasizes the importance of selecting correction methods based on application requirements, receiver type, and regional ionospheric characteristics, advocating for the integration of regional TEC models, dual-frequency measurements, and advanced forecasting techniques to achieve optimal GNSS accuracy.

Keywords: Earth's ionosphere, GNSS technologies, ionospheric delay, global ionospheric map, regional TES model, satellite geodesy, mathematical processing of geodetic data, complex systems.

References

1. Yarosh, O., Yankiv-Vitkovska, L. (2024) Modern approaches to the analysis of ionospheric correction in GNSS measurements. *Modern achievements in geodetic science and production*. Issue II (48). Pp. 29–33. <https://ena.lpnu.ua/items/8f8a178c-e6e1-4a4f-8870-b794d54c38dc> [in Ukrainian].
2. Yankiv-Vitkovska, L., Dzhumann, B. (2020). Construction of a spatial-temporal model of the ionosphere parameter VTEC. *Bulletin of the National Technical University «KPI». Series: Radio Engineering and Radio Apparatus Engineering*. № 80. Pp. 21–28. [in Ukrainian].
3. Yankiv-Vitkovska, L. (2013). Methodology for determining ionosphere parameters in the network of satellite stations in western Ukraine. *Space Science and Technology*. T. 19. №6. Pp. 47–52. [in Ukrainian].
4. Yarosh, O., Yankiv-Vitkovska, L. (2024) Modern approaches to reducing ionospheric correction in GNSS measurements. *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference ‘Geforum-2024’, Lviv-Bryukhovychi*. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, pp. 141–142. [in Ukrainian].
5. Yankiv-Vitkovska, L., Savchuk, S., Pauchok, V., Matviichuk, Y., Bodnar, D. (2016) 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). P. 37–48. <https://doi.org/10.17265/2332-8223/2016.01.005> [in Ukrainian].

6. Bezsonov, E. (2015) Improvement of network methods and algorithms for assessing and accounting for ionospheric and tropospheric signal delays of global navigation satellite systems in precise positioning tasks: abstract of thesis ... Candidate of Technical Sciences: 05.12.17. Kharkiv National University of Radio Electronics. Kharkiv, 23 p. [in Ukrainian].
7. Yankiv-Vitkovska, L., Savchuk, S., Yanchuk, R. (2013) On determining ionosphere parameters at the RVNE GNSS station in real time. Bulletin of the National University of Water and Environmental Management. Series 'Technical Sciences'. Issue 3(63). P. 308–315. [in Ukrainian].
8. Mohammed Mainul Hoque, Norbert Jakowski and Jens Berdermann (2018) Positioning performance of the NTCM model driven by GPS Klobuchar model parameters. J. Space Weather Space Clim. Volume 8, Article Number 20. P. 10. <https://doi.org/10.1051/swsc/2018009>
9. Lizunov, G., Korepanov, V., Lukenyuk, A., Pyankova, O., Fedorov, O. (2022) Space project 'Iono-sat-Micro': readiness for implementation. Space Science and Technology. № 6 (139). Pp. 3–11. <https://doi.org/10.15407/knit2022.06.003> [in Ukrainian].
10. Yankiv-Vitkovska, L. (2012) Use of dual-frequency GNSS observations to determine ionosphere parameters. Geodesy, Cartography and Aerial Photography. №. 76. P. 19–28. <https://doi.org/10.23939/istcgcap> [in Ukrainian].
11. Bingbing Zhang, Jiqiang Niu, Wang Li, Yi Shen, Tangting Wu, Weifeng Yang, Wenping Deng (2021) A single station ionospheric empirical model using GPS-TEC observations based on nonlinear least square estimation method. Advances in Space Research. Volume 68. Issue 9. P. 3821–3834. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.07.017>
12. Mallika, L., Ratnam, D.V., Raman, S., Sivavaraprasad, G. (2020) Machine learning algorithm to forecast ionospheric time delays using global navigation satellite system observations. Acta Astronautica. № 173. P. 221–231.
13. Sandro Radicella, Nava, B. (2009) NeQuick model: Origin and evolution. Annals Of Geophysics. Vol. 52. № ¾. Pp. 417–422. <https://doi.org/10.1109/ISAPE.2010.5696491>
14. Bilitza, D. (2018) IRI the international standard for the ionosphere. Advances in Radio Science. № 16. P. 1–11.
15. Reznichenko, M., Bogomaz, O., Reznichenko, A., Kotov, D. (2024) Comparison of the IRI-2020 model predictions with the observations in the european-african longitudinal sector during the period of 1-9 february 2022. Information technologies: science, engineering, technology, education, health: abstracts of the 32nd International Scientific and Practical Conference MicroCAD–2024, Kharkiv: NTU 'KhPI'. P. 1487. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/8b1fd9c2-a63c-4b5c-8661-180b9c97be52>
16. Yankiv-Vitkovska, L., Dzhuman, B. (2017) Constructing of regional model of ionosphere parameters. Geodesy, Cartography and Aerial photography. Volume 85. № 85. P. 27–35. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2017.01.027>
17. Ren, X., Chen, J., Li, X., Zhang, X., Freeshah, M. (2019) Performance evaluation of real-time global ionospheric maps provided by different IGS analysis centerse GPS Solutions. № 23(4). P. 1–17.

Дата надходження до редакції 22.12.2025.

Дата прийняття статті після рецензування 06.01.2026.