

## **В.Б. Синицький**

Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України

12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

E-mail: vs@ire.kharkov.ua

# **Дослідження залежності флуктуацій амплітуди GPS-сигналів від метеорологічних факторів при проходженні через турбулентну атмосферу над сушею під малими кутами місця**

**Предмет і мета роботи.** Предметом дослідження є флуктуації сигналів навігаційної системи GPS, зумовлені впливом тропосфери, під час радіозаходів супутників за горизонт та мінливість інтенсивності флуктуацій сигналів GPS під впливом метеорологічних факторів. Мета роботи – визначення зв'язку інтенсивності флуктуацій сигналів GPS при малих кутах місця супутника з метеорологічними умовами.

**Методи і методологія роботи.** Методологія роботи заснована на пошуках залежності інтенсивності амплітудних флуктуацій сигналів супутників GPS від метеорологічної обстановки. Метод вимірювань базується на реєстрації рівнів сигналів супутників GPS перед їх заходом за горизонт. Після проведення серій експериментальних досліджень застосований метод обробки експериментальних даних, заснований на виділенні тропосферних флуктуацій з повного сигналу GPS з використанням методу ковзного середнього.

**Результати роботи.** Проведено експериментальні дослідження турбулентної складової сигналу GPS при малих кутах місця супутників. Виявлено, що умовна межа за кутом місця, нижче якої переважаючим є вплив тропосфери, може бути встановлена завдяки властивості синхронності орбіт супутників GPS. Показано, що варіації середньоквадратичного відхилення (СКВ) тропосферних флуктуацій сигналів GPS, виділених з повного сигналу, узгоджуються зі зміною метеорологічних параметрів.

**Висновок.** Проведений аналіз показав, що існує статистична залежність СКВ тропосферних флуктуацій сигналів GPS від метеорологічних чинників. Зростання інтенсивності флуктуацій спостерігається при підвищенні конвективної активності в тропосфері. На підставі проведених експериментів можна зробити висновок про можливість індикації за допомогою сигналів GPS періодів підвищеної турбулентності в атмосфері, яка не виявляється оптичними методами. *Л. 5. Бібліогр.: 12 назв.*

**Ключові слова:** сигнали супутників навігаційної системи GPS, тропосфера, поверхня, флуктуації, середньоквадратичне відхилення, метеорологічні параметри, дощі, грози.

В останні десятиліття сучасні супутникові радіонавігаційні системи (СРНС), що мають високоточну координатно-часову прив'язку, широко використовуються, крім свого основного призначення (визначення місцезнаходження), також для вивчення характеристик навколишнього середовища, в тому числі атмосфери. Одним із застосувань сигналів СРНС є вирішення задач супутникової радіорефрактометрії [1–4]. Наприклад, у серії робіт за програмою COSMIC [1], в якій здійснюють приймання сигналів GPS на низькоорбітальному супутнику, відновлюються висотні профілі температури

і коефіцієнта заломлення атмосфери радіозатменним методом для вирішення задач глобального моніторингу метеорологічних процесів. У деяких випадках становить інтерес приймання сигналів супутників приймачами, розташованими поблизу поверхні Землі, при малих кутах місця, тобто з використанням випромінювання супутників, що сходять та заходять. При цьому результати експериментів краще прив'язані до конкретної місцевості, але поширення сигналів на трасах «космос–Земля» супроводжується флуктуаціями внаслідок розсіювання радіохвиль на неоднорідностях тропосфе-

ри і нерівностях поверхні розділу. З одного боку, такі флуктуації вносять неминучі похибки у розв'язання різних задач поширення радіохвиль, в тому числі оберненої задачі рефракції [2–4]. З іншого боку, вони можуть бути джерелами корисної інформації про фізичні процеси на трасах «супутник – наземний приймач». Наприклад, за характерними квазігармонічними осциляціями рівня сигналів, що спостерігалися під час сходів і заходів супутників «Транзит» над океаном [5], була показана можливість визначення висоти і параметрів інверсійних віддзеркалюючих шарів тропосфери, підтвержена безпосередніми рефрактометричними вимірами. Вивчення мінливості рівнів сигналів GPS і їх флуктуацій при малих кутах місця супутника було покладено в основу порівняльних градієнтних вимірів на приводній стаціонарній трасі в зоні тіні і на супутникових трасах [6]. Показано також, що реєстрація флуктуаційної (дифузної) компоненти сигналів супутників GPS при заходах над морем може бути використана для діагностики ступеня морського хвилювання [7]. За флуктуаціями сигналів супутників GPS, що заходять над сушею, можна робити висновки як про сезонні варіації тропосферної рефракції, так і про характеристики місцевості [8, 9].

У проведених раніше експериментах [8] було виявлено, що флуктуації, якими зазвичай супроводжується поширення GPS-сигналів, змінюються як під час руху супутника в конкретному сеансі, так і від досліду до досліду. Відзначалася залежність флуктуацій під час радіозходів GPS-супутників від візуально спостережуваних погодних умов. Цікавою є додаткова обробка експериментальних даних для виявлення зв'язків характеристик флуктуацій сигналів GPS із супутніми метеорологічними умовами. Це може бути корисним з точки зору фізичних процесів у атмосфері, що стосуються її стратифікації, а також для вирішення деяких прикладних задач, наприклад, моніторингу оптично неспостережуваних явищ типу турбулентності ясного неба.

Метою цієї роботи є дослідження зв'язку тропосферних флуктуацій у каналі «навігаційний супутник (космічний апарат, КА) системи GPS – наземний приймач» з метеорологічними умовами.

**1. Експерименти з супутниками GPS над сушею.** Для визначення характеристик флуктуацій сигналів, які пройшли через турбулентну тропосферу над нерівною поверхнею землі, необхідні натурні експерименти в різноманітних умовах. У роботі застосовано методику реєстрації амплітуди сигналів супутників GPS при їх заході над місцевістю зі складним рельєфом. В експериментах використовувався одночастотний приймач сигналів GPS типу *Trimble ACE-III*, що працює в діапазоні  $L1$  (частота 1 575,42 МГц). Приймач забезпечував можливість приймання сигналів в умовах прямої видимості зі співвідношенням сигнал/шум  $\sim 20 \dots 25$  дБ і міг працювати у двох режимах. Перший режим передбачає одночасне приймання 8 супутників GPS для виконання штатного завдання щодо визначення місцеположення. Другий режим, що використовувався в даному експерименті, забезпечував роботу з одним із супутників (шляхом заборони приймання сигналів усіх інших і зняття маски за кутом місця). Такий режим необхідний для реєстрації рівня сигналу обраного супутника при малих кутах місця, в тому числі на загоризонтній ділянці його траєкторії. Приймач конструктивно виконаний в одному блоці з штатною антеною *Bullett-III*, встановленою на даху будівлі висотою 30 м і напрямленою на горизонт.

Виміри проведені в азимутальному секторі  $\beta \approx (20 \dots 95)^\circ$ , в більшій частині якого лінія горизонту вільна від забудов, хоч нижче горизонту є будинки різної висоти. Рівень сигналу GPS реєструвався в комп'ютері у відносних одиницях логарифмічної шкали, прийнятої фірмою *Trimble* (проградуваною в межах  $20 \dots 50$  дБ), у вигляді часової реалізації  $A_{\text{дБ}}(t)$  з темпом знімання даних 1 с. Через те що супутники GPS мають так звані синхронні орбіти (з періодом обертання близько 12 годин), кожен супутник проходив у районі вимірювань один раз на добу. В сеансах проводився запис ефемерид і останньої ділянки прольоту супутника в зоні видимості від кутів місця  $15 \dots 20^\circ$  до зникнення сигналу через радіозахід супутника за горизонт. Описувана серія вимірювань була виконана протягом 2005 р. і зимових місяців 2006 р. Щодня реєструвалися сигнали від 2 до 7 супутників. До обробки було прийнято результати близько 300 дослідів, проведених у різних метеорологічних умовах.

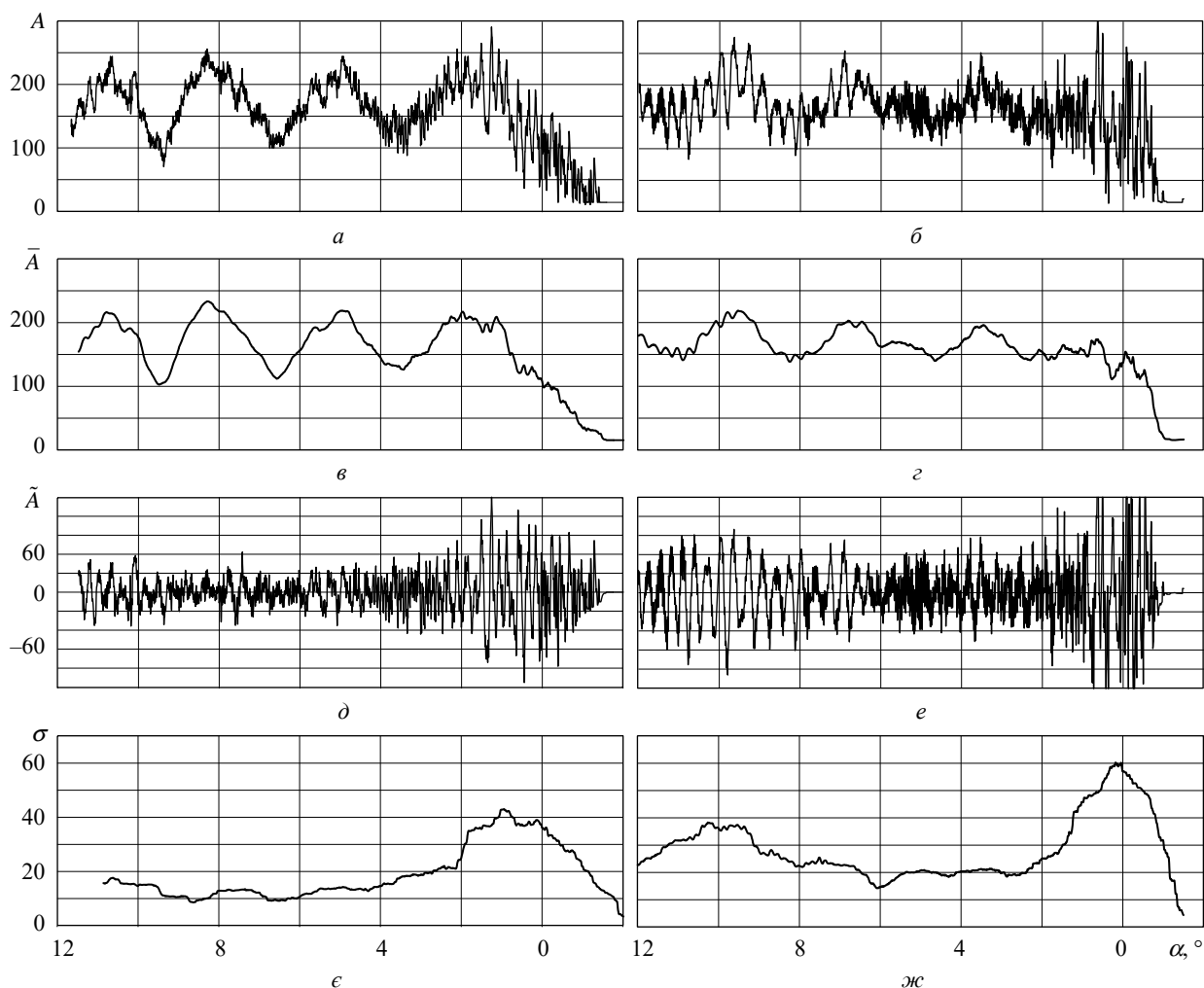


Рис. 1. Приклади обробки реалізацій сигналів GPS для двох дослідів з різним характером флуктуацій (ліворуч – для КА18; праворуч – для КА14); а, б – початкові реалізації  $A$ , перераховані з логарифмічного в лінійний масштаб; в, г –  $\bar{A}$ , згладжені за МКС; д, е – флуктуації  $\tilde{A}$ ; є, ж –  $\sigma$  (СКВ) флуктуацій

Для інтерпретації результатів радіофізичних експериментів залучалися дані гідрометеорологічного центру (ГМЦ), розташованого на відстані близько 20 км від вимірювально-го пункту.

**2. Оброблення експериментальних даних.**

Сигнали супутника GPS, який заходить за радіогоризонт, представляє собою суміш прямого сигналу з сигналами, відбитими від поверхні зі складним рельєфом і розсіяними на тропосферних неоднорідностях. За записаними реалізаціями  $A_{дБ}(t)$  із залученням ефемерид, прийнятих перед сеансом, проводився розрахунок  $A_{дБ}(\alpha)$  – залежностей рівня сигналу від кута місця, які потім перераховувалися у відносний лінійний масштаб  $A(\alpha) \equiv A$  (рис. 1, а, б). Подальша процедура обробки, що дозволяла виділити в до-

слідках флуктуаційні компоненти, передбачала: 1) розрахунок характеристик  $\bar{A}$  за методом ковзного середнього (МКС) (рис. 1, в, г); 2) розрахунок флуктуаційних компонент  $\tilde{A}$  як різниці між початковим сигналом  $A$  і ковзним середнім  $\bar{A}$  (рис. 1, д, е); 3) визначення середньоквадратичного відхилення (СКВ) флуктуацій у функції кута місця,  $\sigma(\alpha)$  (рис. 1, є, ж) з використанням вікна ковзного СКВ. Проведена обробка аналогічна до тієї, що використовувалася в роботі [7], з тією відмінністю, що усереднюючі вікна ковзного середнього і ковзного СКВ мають дещо інші числові значення, які добиралися експериментально. Результати всіх дослідів були оброблені за єдиною методикою.

Флуктуації, виділені з повного сигналу, як правило, мають випадковий характер, подіб-

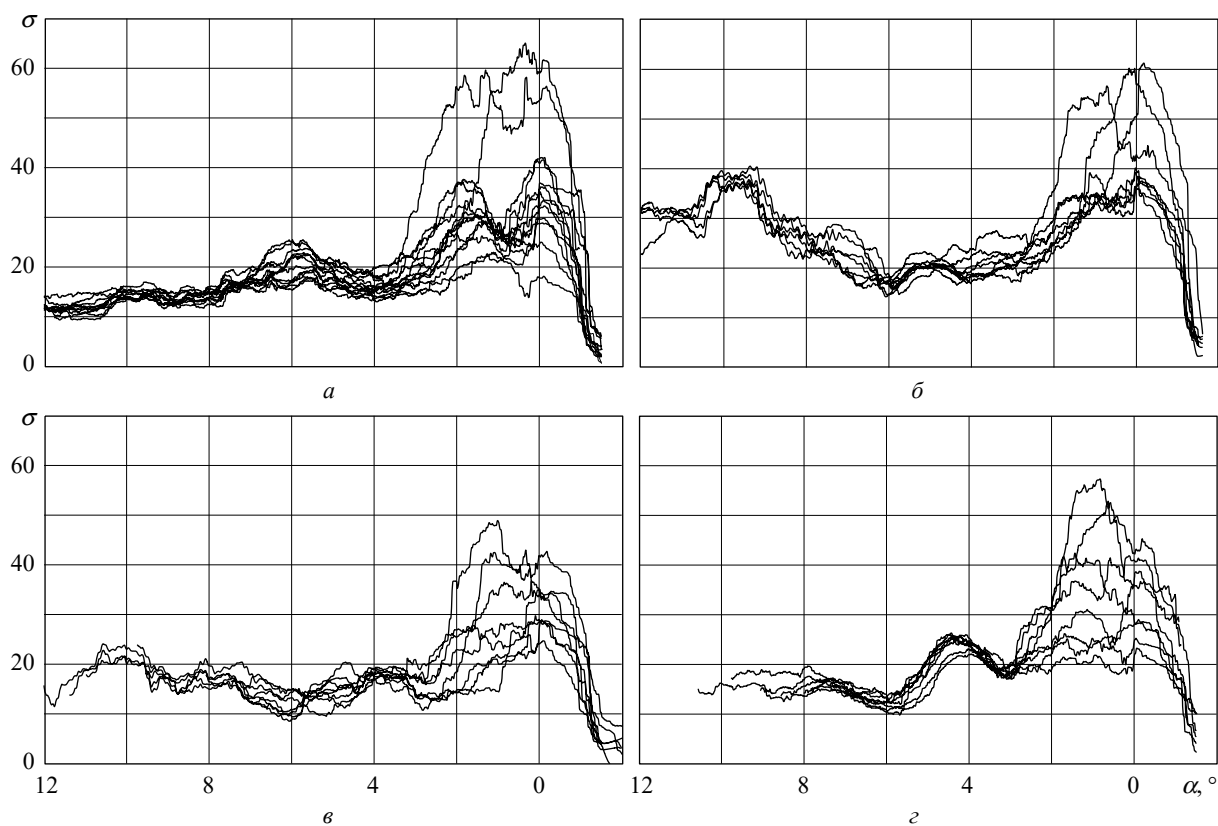


Рис. 2. Приклади залежностей  $\sigma(\alpha)$  під час радіозаходів супутників GPS над поверхнею суші (квітень–серпень 2005 р.): а – KA01, азимут заходу  $80^\circ$ ; б – KA14, азимут заходу  $62^\circ$ ; в – KA16, азимут заходу  $32^\circ$ ; з – KA18, азимут заходу  $75^\circ$

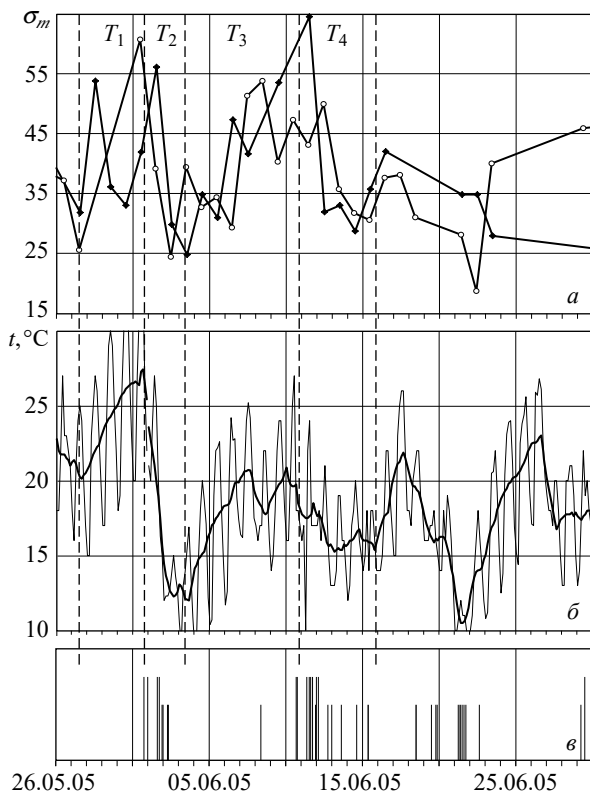
ний до наведених на рис. 1, д. У ряді випадків на них помітні квазігармонічні осциляції внаслідок віддзеркалення сигналу від плоских поверхонь, наприклад, дахів будівель (рис. 1, е; кути місця від  $8$  до  $12^\circ$ ).

**3. Обговорення результатів експериментів і обробки.** Залежності  $\sigma(\alpha)$ , подібні до наведених на рис. 1, е, ж, були отримані для кожного супутника в різні дні і використовуються далі для порівняння одна з одною. На рис. 2 показана частина залежностей  $\sigma(\alpha)$ , обраних в якості ілюстрацій із повного набору дослідів (квітень–серпень 2005 р.). На фрагментах рис. 2, кожний з яких стосується даних для одного з супутників, наведено по декілька кривих  $\sigma(\alpha)$ , де наочно видно різницю поведінки СКВ на великих і малих кутах місця. Так, для кутів місця вище  $\sim(2\dots3)^\circ$  залежності  $\sigma(\alpha)$  для кожного супутника, отримані в дослідях, проведених в різні дні, близькі одна до одної. Це пов'язано з наявністю у супутників GPS синхронних орбіт, внаслідок чого точка відображення сигналу кожного супутника щодня проходить по одній і тій же траєкторії на поверхні, властивій тіль-

ки цьому супутнику. У вказаному діапазоні кутів місця флуктуації визначаються в основному випадковими відображеннями від елементів поверхні, причому, як видно на рис. 2, кожен супутник має свій «профіль»  $\sigma(\alpha)$ , що відрізняється від профілів інших супутників.

Деякий розкид залежностей  $\sigma(\alpha)$  кожного супутника, що спостерігається для кутів місця більше  $3^\circ$ , може бути пов'язаний з відхиленням супутника GPS за азимутом через неточний синхронізм його орбіти, або із змінами властивостей підстильної поверхні. З експерименту [8] виходить, що за період  $\sim 1\dots 3$  місяці точка заходу супутників GPS може зміщуватися на кут  $\sim(1\dots 2)^\circ$  по азимуту, внаслідок чого траєкторія точки відображення виходить на сусідні ділянки місцевості, які можуть дати дещо іншу залежність  $\sigma(\alpha)$ .

При малих кутах місця, нижче умовної межі  $\sim(2\dots 3)^\circ$ , у всіх супутників спостерігається значна мінливість залежності  $\sigma(\alpha)$  від досліду (рис. 2, а–г), пов'язана з варіаціями турбулентних і рефрактивних властивостей протяжного нижнього шару тропосфери. Для



**Рис. 3.** Порівняння часових залежностей СКВ флуктуацій сигналів супутників GPS з метеоявищами: *a* – СКВ флуктуацій сигналів GPS (темні ромби – КА01, світлі кружки – КА14); *б* – температура; *в* – метеоявища (довгі штрихи – грози, короткі штрихи – зливи)

подальшого аналізу в якості параметра, що характеризує відносну міру турбулентності в конкретному досліді, покладемо значення СКВ у максимумі залежності  $\sigma(\alpha)$ , який зазвичай розташований при мінімальному куті місця в діапазоні  $\sim(0 \pm 0,5)^\circ$  і може зміщуватися внаслідок рефракції. На рис. 1, *ж* вказаний максимум позначений як  $\sigma_m$ .

Згідно з результатами експериментів, рівень прийнятих сигналів різних супутників GPS у заданому азимутальному секторі ( $20...95^\circ$ ) практично однаковий (відмінності в середньому менше 0,5 дБ). Можна вважати, що величина СКВ флуктуацій сигналів GPS не залежить від азимутальних напрямків заходів супутників. Отже, можливе порівняння характеристик  $\sigma_m$  різних супутників, що заходять під різними азимутами.

**4. Зіставлення результатів супутникових вимірювань з метеорологічними даними.** Варіації максимумів СКВ тропосферних флуктуацій  $\sigma_m$  у різних сеансах спостережень по-

в'язані зі змінною метеорологічною обстановкою на трасі «штучний супутник Землі – наземний спостерігач».

На рис. 3 представлені результати супутникових експериментів і дані метеорологічних спостережень, отримані за період близько одного місяця (кінець травня – кінець червня 2005 р.). На рис. 3, *a* показано залежність максимумів СКВ тропосферних флуктуацій  $\sigma_m$  супутників КА01 і КА14 від часу. На рис. 3, *б* наведені часові варіації температури за даними ГМЦ: тонка лінія – початкова характеристика  $t^\circ$  (відліки зняті через 3 години), товста лінія – середньодобова температура  $\bar{t}^\circ$ . На рис. 3, *в* показані метеорологічні явища – грози (довгі штрихи) і зливи (короткі штрихи), що відбувалися в цей період.

Розглянемо зв'язок змін  $\sigma_m$  з варіаціями метеорологічних параметрів. Для аналізу динаміки явищ, що відбувалися, в описуваному вимірювальному циклі зручно виділити періоди ( $T_1, T_2, T_3, T_4$ , рис. 3), що характеризують перехід метеорологічної обстановки в різні стани.

Першопричиною мінливості  $\sigma_m$  КА01 і КА14 (рис. 3) можна вважати варіації температури. Дійсно, дуже теплий період  $T_1$  (кінець травня – початок червня), що настав після прохолодного квітня, характеризувався високою температурою повітря (денна температура досягала  $30...33^\circ\text{C}$ , а середньодобова перевищувала  $27^\circ\text{C}$ ; рис. 3, *б*). Ця обставина при помірному вітрі створювала сприятливі передумови для сильного прогріву вологої поверхні землі та інтенсивного конвективного теплообміну в приземному шарі, що сприяло створенню нестійкої стратифікації атмосфери і збільшенню її турбулентності. Така ситуація відбилася на підвищенні СКВ флуктуацій сигналів GPS супутників КА01 і КА14 в цей період (рис. 3, *a*).

Для наступного періоду  $T_2$  було характерне різке зниження температури повітря з  $33^\circ\text{C}$  до  $9^\circ\text{C}$  (при цьому середньодобова температура впала з  $27$  до  $12^\circ\text{C}$ , рис. 3, *б*), а також зміна напрямку вітру з південно-західного на північно-східний і випадіння серії дощів з грозами (рис. 3, *в*). Ці події відбулися на результатах супутникових вимірювань: на рис. 3, *a* в цей період видно зменшення СКВ тропосферних флуктуацій сигналів супутників. Нове потепління (період  $T_3$ ), яке також закінчилося серією злив з грозами (період  $T_4$ ), супроводжу-

валосся відповідним збільшенням, а потім зменшенням СКВ флуктуацій.

Таким чином, в описуваних експериментах протягом порівняно короткого періоду часу (приблизно один місяць) спостерігалася певна узгодженість варіацій супутникових даних, що характеризують інтенсивність тропосферної турбулентності, зі змінами температури і появою метеоявищ. Коефіцієнт кореляції між параметрами  $\sigma_m$  супутників КА01 та КА14 і середньодобовою температурою  $t^\circ$  в цей період дорівнює приблизно 0,5. Порівняння змін СКВ з варіаціями інших метеопараметрів (тиску, вологості, коефіцієнта заломлення) показало відсутність кореляції.

Цікавим є зіставлення цих же характеристик на більш тривалих інтервалах, наприклад, для повного літнього періоду 2005 р. (рис. 4). На рис. 4, *a* точки зображують дані щодо СКВ окремих дослідів у загальному масиві, складеному за результатами вимірювань радіозаходів чотирьох супутників КА01, КА14, КА18, КА25 (товста лінія – усереднення приблизно на добовому інтервалі). Рис. 4, *б* ілюструє хід температури: дані, зняті через 3 години (тонка лінія) і усереднені на добових інтервалах (товста лінія), аналогічні представленим на рис. 3, *б*. Помітна тенденція, що обговорювалася вище: усереднені дані супутникових вимірювань відстежують варіації середньодобової температури. На тривалому літньому періоді коефіцієнт кореляції між усередненими характеристиками  $\sigma_m$  і  $t^\circ$  досягає значень  $\sim 0,65$ , між  $\sigma_m$  і приземним значенням коефіцієнта заломлення – близько 0,3, між  $\sigma_m$  і тиском  $< 0,01$ , між  $\sigma_m$  і вологістю  $\sim 0,1$ .

У період зимових вимірювань (листопад 2005 р. – лютий 2006 р.) в окремі дні зафіксована висока інтенсивність турбулентних флуктуацій, отриманих за даними вимірів сигналів супутника КА02 (рис. 5, *a*), що співмірна з інтенсивністю флуктуацій у літніх дослідках. При цьому спостерігалися варіації температури в межах від  $+10$  до  $-28$  °C (рис. 5, *б*). Видно, що зростання  $\sigma_m$  в окремі дні (наприклад, 29.11.2005, 29.12.2005 та ін.) відбувалося у випадках відносного «потепління» на декілька градусів. При цьому відповідність залежностей  $\sigma_m$  і  $t^\circ$  спостерігається не тільки за окремими варіаціями обох кривих, але також за їх

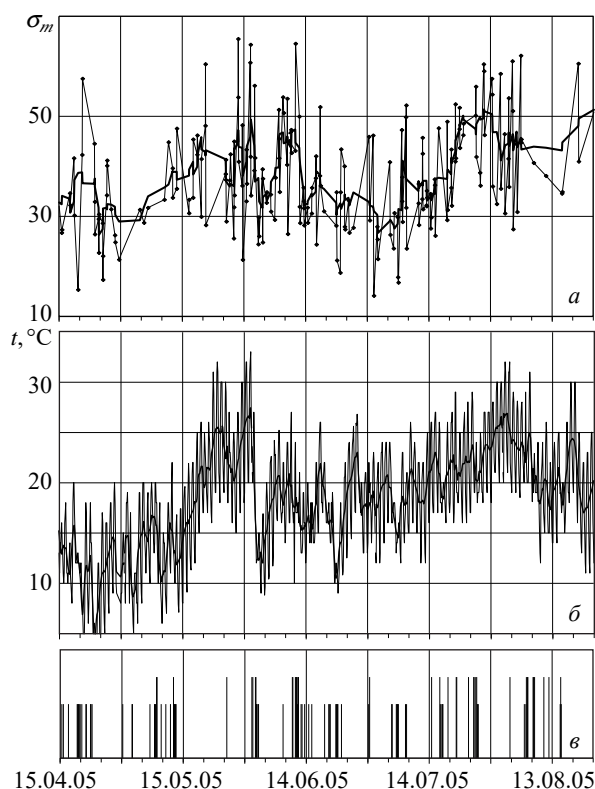


Рис. 4. Порівняння часових залежностей СКВ флуктуацій сигналів супутників GPS КА01, КА14, КА18 і КА25 з метеоявищами; *a* – СКВ флуктуацій сигналів GPS; *б* – температура; *в* – метеоявища (короткі штрихи – зливи, довгі штрихи – грози)

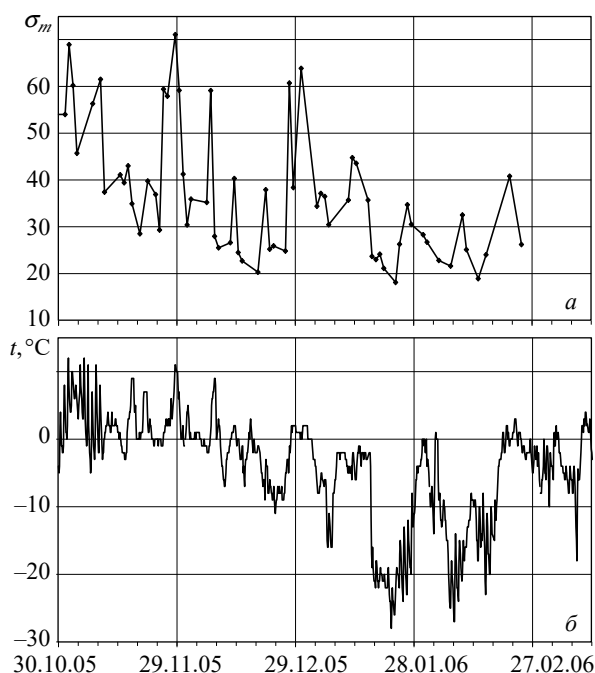


Рис. 5. Порівняння часової залежності СКВ флуктуацій сигналів супутника GPS КА02 з температурою повітря в зимові місяці 2005–2006 рр.: *a* – СКВ флуктуацій GPS; *б* – температура

плавним трендом. Коефіцієнт кореляції між даними за середньодобовою температурою і СКВ флуктуацій дорівнює 0,63. У той же час коефіцієнти кореляції між СКВ флуктуацій сигналів КА02 і тиском, вологістю і коефіцієнтом заломлення не перевищують 0,2.

Розглянуті в наших дослідках випадки підвищених значень СКВ флуктуацій сигналів GPS мали місце в ясну погоду або при слабкій хмарності. Вони можуть служити індикаторами ефекту, який називають турбулентністю ясного неба (ТЯН) [10]. Це явище характеризується непередбачуваною появою і може становити певну небезпеку для авіації. На цей час методи передбачення ТЯН можуть використовувати, наприклад, дані стандартних ГМЦ і відповідні моделі [11], а також інформацію від радарів різного призначення, в тому числі від дослідницьких МРЛ [12]. З огляду на те, що дані від різних засобів у системі спостереження можуть доповнювати один одного, інформація від приймачів GPS про випадки підвищеної турбулентності, розглянута в цій роботі, може

бути корисною при комплексних засобах оповіщення про появу ТЯН.

**Висновки.** При заходах супутників GPS виникають флуктуації рівня сигналу, зумовлені впливом тропосфери і поверхні розділу, які при первинному розгляді нероздільні.

Застосовуючи обробку експериментальних даних з використанням МКС і ковзного СКВ, а також з огляду на властивість синхронності орбіт супутників GPS, можна встановити умовну межу за кутом місця ( $\sim 3^\circ$ ), нижче якої переважаючим є вплив тропосферних флуктуацій.

Мінливість у часі інтенсивності флуктуацій рівня сигналу GPS на малих кутах місця визначається станом приземного шару атмосфери, в значній мірі пов'язаним з температурою повітря.

Інтенсивність флуктуацій не залежить від азимутального напрямку приймання сигналу.

Підвищені значення СКВ флуктуацій сигналів GPS поблизу радіозаходу можуть свідчити про можливість появи в атмосфері оптично неспостережуваного явища ТЯН.

#### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Rocken C., Kuo Y.-H., Schreiner W., Hunt D., Sokolovskiy S. COSMIC System Description. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*. 2000. Vol. 11, Iss. 1. P. 21–52.
2. Anderson K.D. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements. *Radio Science*. 1982. Vol. 17, Iss. 3. P. 653–663.
3. Арманд Н.А., Андрианов В.А., Смирнов В.М. Восстановление профиля коэффициента преломления тропосферы по измерениям частоты сигналов искусственного спутника Земли. *Радиотехника и электроника*. 1987. Т. 32, № 4. С. 673–680.
4. Lowry A.R., Rocken C., Sokolovskiy S.V., Anderson K.D. Vertical profiling of atmospheric refractivity from ground-based GPS. *Radio Science*. 2002. Vol. 37, Iss. 3. P. 1–19.
5. Богатуров А.Н., Гайкович К.П., Гурвич А.С., Иванов В.К., Кашкаров С.С., Кривоножкин С.Н., Смирнов А.С., Фрейлихер В.Д., Шевцов Б.М. О возможности определения отражающих слоев в тропосфере над морем по вариациям уровня радиосигналов ИСЗ. *Докл. АН СССР*. 1990. Т. 315, № 4. С. 830–834.
6. Zamarajev V.B., Kabanov V.A., Morgun G.M., Sinitsky V.B. Variations of the Tropospheric Refraction over the Sea. Simultaneous Measurements at Ground-to-Ground and Satellite-to-Ground Radio Paths. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2006. Vol. 65, Iss. 8. P. 685–699. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i8.10.
7. Sinitsky V.B. On the Possibility of Sea State Diagnostics Using the Radio Signals from GPS Satellites at Low Angles. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2011. Vol. 70, Iss. 19. P. 1751–1761. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i19.40.
8. Sinitsky V.B. The Effect of Horizon Line upon Tropospheric Refraction Measurements Taken During Beyond-the-Horizon GPS Radiosetting over Dry Land. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2011. Vol. 70, Iss. 3. P. 189–200. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i3.10.
9. Луценко В.И., Попов Д.О., Луценко И.В. Исследование подстилающей поверхности при помощи излучения глобальной навигационной спутниковой системы. *Радиофизика и электроника*. 2016. Т. 7(21), № 1. С. 31–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.031>.
10. Винниченко Н.И., Пинус Н.З., Шметтер С.М., Шур Г.Н. *Турбулентность в свободной атмосфере*. Ленинград: Гидрометеоздат, 1976. 287 с.
11. Dutton M.J.O. Probability forecasting of clear air turbulence based on numerical model output. *Meteorol. Mag.* 1980. Vol. 109, Iss. 7. P. 293–310.
12. Белов Е.Н., Войтович О.А., Руднев Г.А., Ткачева Т.А., Хлопов Г.И., Хоменко С.И. Радиолокационное зондирование мелкомасштабной турбулентности в пограничном слое атмосферы. *Радиофизика и электроника*. 2012. Т. 3(17), № 1. С. 30–35.

Стаття надійшла 06.09.2020

REFERENCES

1. Rocken, C., Kuo, Y.H., Schreiner, W., Hunt, D., Sokolovskiy, S.V., 2000. COSMIC System Description. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science*, **11**(1), pp. 21–52.
2. Anderson, K.D., 1982. Inference of refractivity profiles by satellite-to-ground RF measurements. *Radio Science*, **17**(3), pp. 653–663.
3. Armand, N.A., Andrianov, V.A., Smirnov, V.M., 1987. Troposphere refractive index profile recovery from measurements of the artificial Earth satellite signals frequency. *Radiotekhnica i elektronika*, **32**(4), pp. 673–680 (in Russian).
4. Lowry, A.R., Rocken, C., Sokolovskiy, S.V., Anderson, K.D., 2002. Vertical profiling of atmospheric refractivity from ground-based GPS. *Radio Science*, **37**(3), pp. 1–19.
5. Bogaturov, A.N., Gaykovich, K.P., Gurchik, A.S., Ivanov, V.K., Kashkarov, S.S., Kryvonozhkin, S.N., Smirnov, A.S., Freylikher, V.D., Shevtsov, B.M., 1990. On the possibility of determining the reflecting layers in the troposphere over the sea from variations in the satellite radio signals level. *Dokl AN SSSR*, **315**(4), pp. 830–834 (in Russian).
6. Zamarajev, V.B., Kabanov, V.A., Morgun, G.M., Sinitsky, V.B., 2006. Variations of the Tropospheric Refraction over the Sea. Simultaneous Measurements at Ground-to-Ground and Satellite-to-Ground Radio Paths. *Telecommunications and Radio Engineering*, **65**(8), pp. 685–699. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v65.i8.10.
7. Sinitsky, V.B., 2011. On the Possibility of Sea State Diagnostics Using the Radio Signals from GPS Satellites at Low Angles. *Telecommunications and Radio Engineering*, **70**(19), pp. 1751–1761. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i19.40.
8. Sinitsky, V.B., 2011. The Effect of Horizon Line upon Tropospheric Refraction Measurements Taken During Beyond-the-Horizon GPS Radiosetting over Dry Land. *Telecommunications and Radio Engineering*, **70**(3), pp. 189–200. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i3.10.
9. Lutsenko, V.I., Popov, D.O., Lutsenko, I.V., 2016. Research of the underlying surface by radiation of global navigation satellite system. *Radiofiz. Elektron.*, **7**(21)(1), pp. 31–39 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.15407/rej2016.01.031>.
10. Vinnichenko, N.I., Pinus, N.Z., Shmetter, S.M., Shoor, G.N., 1976. *Turbulence in a free atmosphere*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ. (in Russian).
11. Dutton, M.J.O., 1980. Probability forecasting of clear air turbulence based on numerical model output. *Meteorol. Mag.*, **109**(7), pp. 293–310.
12. Belov, Ye.N., Voitovich, O.A., Rudnev, G.A., Tkachova, T.O., Khlopov, G.I., Khomenko, S.I., 2012. Radar Sounding Of Small Scale Turbulence In Boundary Layer Of Atmosphere. *Radiofiz. Elektron.*, **3**(17)(1), pp. 30–35 (in Russian).

Received 06.09.2020

V.B. Sinitsky

O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the NASU  
12, Acad. Proskury St., Kharkiv, 61085, Ukraine

INVESTIGATION OF GPS SIGNAL AMPLITUDE FLUCTUATIONS DEPENDING  
ON METEOROLOGICAL FACTORS WHEN PASSING THROUGH A TURBULENT ATMOSPHERE  
AT LOW ELEVATION ANGLES OVER THE LAND

**Subject and Purpose.** The paper investigates troposphericly caused fluctuations of signals from the GPS navigation system while the satellite is beyond the radio horizon. The intensity of GPS signal fluctuations under the influence of meteorological factors is studied, too. The purpose of the work is to determine relationship between the intensity of GPS signal fluctuations and the meteorological conditions when satellite elevation angles are small.

**Methods and Methodology.** The methodology of the work is based on the search for the intensity of amplitude fluctuations of GPS satellite's signals depending on the meteorological situation. The measurement approach is registration of the GPS satellite's signal level just before the satellite crosses the horizon. The data processing after a series of experimental studies is based on the extraction of tropospheric fluctuations from the complete GPS signal by the moving average method.

**Results.** Experimental studies of the turbulent component of signals from GPS satellites at low elevation angles have been carried out. It has been revealed that a conventional elevation boundary below which the tropospheric influence is predominant can be established due to the synchronism property which the orbits of the GPS satellites hold. It has been shown that variations in the mean square deviation (MSD) of GPS signal fluctuations caused by the troposphere and extracted from the complete signal are consistent with meteorological parameter changes.

**Conclusion.** Analysis has been carried out to show that a meteorological dependence of the MSD statistics of GPS signal tropospheric fluctuations exists. The intensity of fluctuations rises with the convective activity in the troposphere. The conducted experiments suggest that periods of increased turbulence in the atmosphere can be detected with the use of GPS signals. For this purpose, the optical methods will not do.

**Key words:** signals from GPS navigation system satellites, troposphere, surface, fluctuations, mean square deviation (MSD), meteorological parameters, rains, thunderstorms.