

doi: <https://doi.org/10.15407/knit2017.01.054>

УДК 528.3

Н. І. Каблак¹, М. П. Калюжний², О. В. Шульга², В. С. Вовк²

¹ Ужгородський національний університет

² Науково-дослідний інститут «Миколаївська астрономічна обсерваторія», Миколаїв

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ВИЯВЛЕННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ АТМОСФЕРИ У МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ UA-EUPOS/ZAKPOS

Сучасні мережі активних референційних станцій дають змогу розв'язувати не тільки практичні задачі з геодезії та навігації, але й суто наукові задачі, що мають важливе значення у всіх науках про Землю. Принцип роботи системи дистанційного моніторингу атмосфери базується на реєстрації і обробці радіосигналів ГЛОНАСС/GPS. Система дистанційного моніторингу атмосфери призначена для отримання інформації про стан атмосфери. На основі 845 часових вимірювань тропосферної затримки на 20 станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS досліджено просторово-часову нестабільність атмосфери над територією покриття активними референційними станціями

Ключові слова: GPS, атмосферна затримка, система дистанційного моніторингу атмосфери

ВСТУП

Із розвитком технічних можливостей ГНСС-вимірювань та підвищення точності координатного забезпечення появились роботи щодо застосування ГНСС-спостережень в інших галузях наук і техніки: метеорології, фізиці атмосфери, авіації і т. д. Зокрема досліджується вміст водяної пари в нейтральній атмосфері, провадиться моніторинг геомагнітного поля і хімічного складу атмосфери, досліджується висотний розподіл фізичних параметрів, нестабільність атмосфери,

парниковий ефект, визначаються орбіти дуже низьких ШСЗ тощо.

Тропосферну затримку Δr можна одержати за результатами ГНСС-вимірювань у мережі активних референційних станцій. У цьому випадку значення Δr враховують будь-які зміни, що проходять в атмосфері в даний момент часу. Тому актуальною проблемою на сьогоднішній день є дослідження стану нейтральної атмосфери в реальному часі спостережень, що дасть можливість передбачити виникнення та переміщення тропосферних збурень.

Основна мета роботи — дослідження та аналіз просторово-часової нестабільності атмосфери

© Н. І. КАБЛАК, М. П. КАЛЮЖНИЙ,
О. В. ШУЛЬГА, В. С. ВОВК, 2017

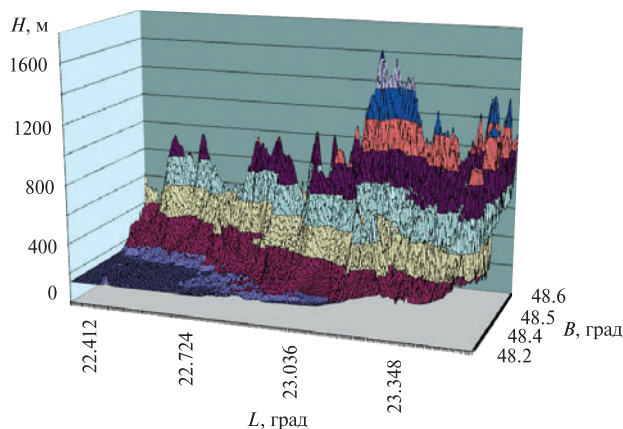


Рис. 1. Розподіл висот точок по території Закарпатської області

над територією покриття активними референтними станціями. Результати дослідження можна використати для підвищення якості передбачення погоди.

Важливим додатком даних досліджень може бути також вивчення умов виникнення такого явища, як загоризонтне поширення ультракоротких радіохвиль (УКХ). Інтерес до питання поширення ультракоротких радіохвиль пояснюється перш за все тим, що просторово-часові нестабільності індексу рефракції тропосфери обумовлюють зміну характеру поширення УКХ та призводить до появи таких явищ, як багатопроменевість і загоризонтне поширення радіохвиль (надрефракція), які негативно впливають на роботу радіокомунікаційних, навігаційних, радарних систем.

Іще одним механізмом наддалекого поширення є відбивання УКХ радіосигналів від іонізованих слідів метеороїдів, які згорають в атмосфері Землі. Розроблений в науково-дослідному інституті «Миколаївська астрономічна обсерваторія» (НДІ МАО) апаратно-програмний комплекс дозволяє в автоматичному режимі виявляти такі сигнали, реєструючи у Миколаєві на частоті 88.2 МГц сигнал загоризонтної FM-станції, розташованої в Кельце (Польща) [1, 7]. Враховуючи різницю часових характеристик, вдається при цьому виділяти групу сигналів, які не належать до метеорних, поява яких, мабуть, обумовлена

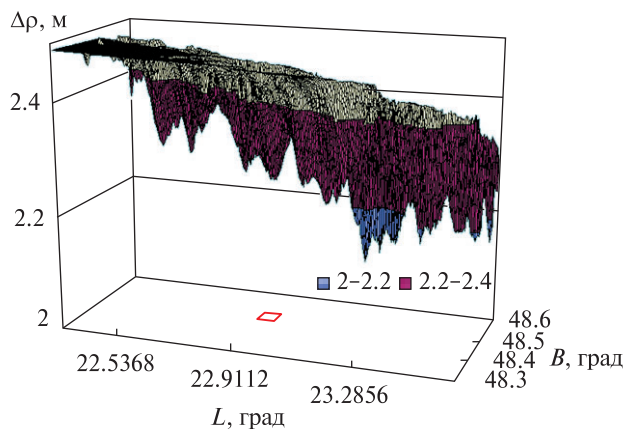


Рис. 2. Поверхня зміни тропосферної затримки на 13 липня 2012 р., UT = 12^h55^m (18 референцих станцій та 200 тис. вузлових точок сітки через кожні 250 м)

іншими механізмами наддалекого поширення УКХ. Як буде показано нижче, поява частини таких си-гналів, ймовірно, пов'язана з наявністю збурень коефіцієнта заломлення тропосфери на трасі поширення радіохвиль Миколаїв — Кельце. При цьому як критерій нестабільності атмосфери використовується величина перепаду висот ізоповірхнею тропосферної затримки. Алгоритм побудови ізоповірхні викладено у роботі [4].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

На даний час у мережі активних референцих станцій UA-EUPOS/ZAKPOS обробляються дані близько 90 ГНСС-станцій, розташованих на території України (GNSS-мережа Західної України — UA-EUPOS/ZAKPOS ¹), Польщі (ASG-EUPOS ²), Словаччини (SKPOS ³), Угорщини (GNSSnet.hu ⁴) та Румунії (ROMPOS ⁵) [6]. Ми розробили спосіб визначення тропосферної затримки у будь-якій точці на території покриття мережею UA-EUPOS/ZAKPOS в RTK [3, 5].

З цією метою територію Закарпатської області поділено сіткою квадратів розмірами 47.9...49.1° — по широті і 22.1...24.6° — по довготі через кожні

¹ www.zakpos.zakgeo.com.ua

² www.asgeupos.pl

³ www.skpos.gku.sk

⁴ www.gnssnet.hu

⁵ www.rompos.ro

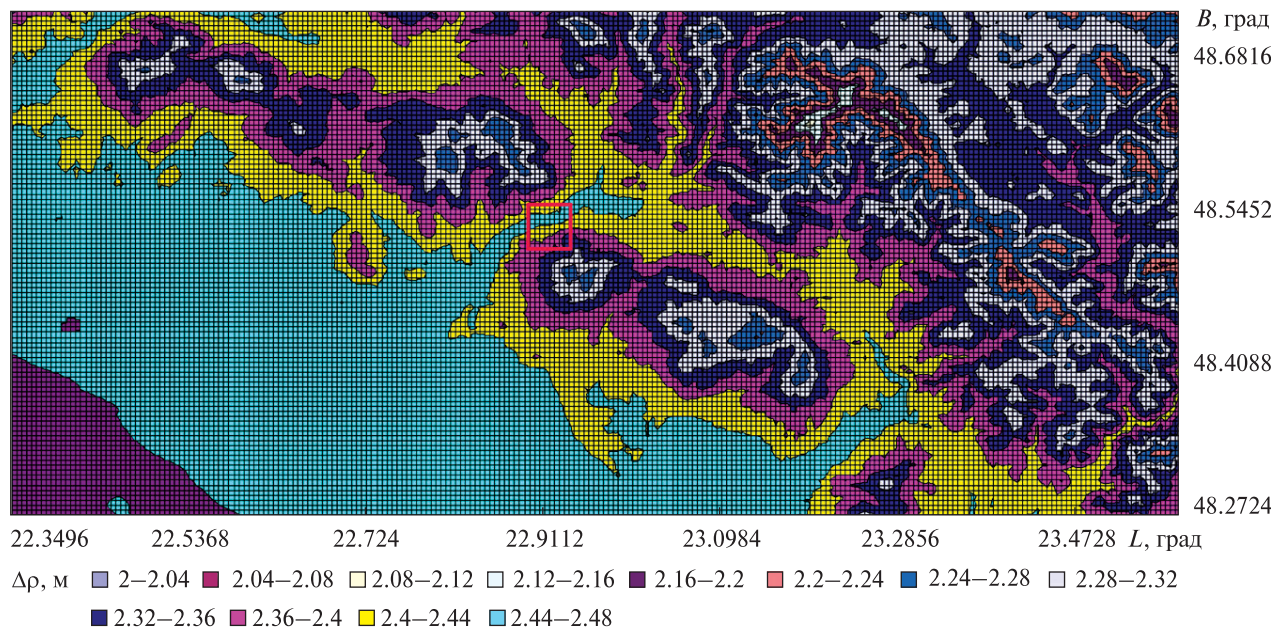


Рис. 3. Зміна тропосферної затримки на 13 липня 2012 р. у вигляді ізоліній

250 м. Отримано координати більш ніж 200 тисяч точок. Загальна площа Закарпаття складає 12800 кв. км, тобто 2.1 % усієї території України. Більшу частину території краю займають гори (найвища точка — вершина Говерла — 2061 м, а найнижча — в районі села Руські Геївці Ужгородського району — 101 м над рівнем моря). Перепад висот на частині території Закарпатської області наведено на рис. 1.

Для побудови поверхні зміни тропосферної затримки на території покриття мережею активних референсних станцій в реальному часі було використано 845 часових вимірювань тропосферної затримки на 20 станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS. Технологію визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті та на будь-якій висоті над цими пунктами мережі станцій UA-EUPOS/ZAKPOS описано в роботі [2]. Для прикладу на рис. 2 і 3 наведено поверхню зміни тропосферної затримки на частині території Закарпаття на 13 липня 2012 р. (UT = 12^h 55^m).

Тропосферні затримки на всіх референсних станціях мережі відомі з 1-хв інтервалом часу. Проведені дослідження дали підстави вважати можливим усереднення тропосферних затримок з 15-хв інтервалом часу.

Якщо будувати карти тропосферних затримок через певний інтервал часу, наприклад 15, 30 або (якщо потрібно) 1 хв, то можна визначити динаміку зміни стану тропосфери над територією покриття мережі референсних станцій. Переваги даної методики полягають не лише в оперативності, наочності та неперервності (через 1 хв), але й у тому, що вона не потребує знання метеопараметрів на рівні розташування референсних станцій чи проведення аерологічного зондування атмосфери. Достатньо знайти тропосферні затримки на референсних станціях мережі. При цьому так само оперативно можна знайти тропосферну затримку для будь-якого пункту з відомими геодезичними координатами.

Відмітимо, що Карпатський регіон непростий з точки зору опису (оскільки спостерігаються великі перепади висот), а розроблена методика побудови карти тропосферних затримок дає добрі результати (з точністю порядку 1.5 см). Цю методику можна застосовувати для побудови аналогічних карт для будь-якої мережі референсних станцій.

З метою дослідження стабільності атмосфери в реальному часі спостережень, було розроблено алгоритм побудови ізоповерхні тропосферних затримок

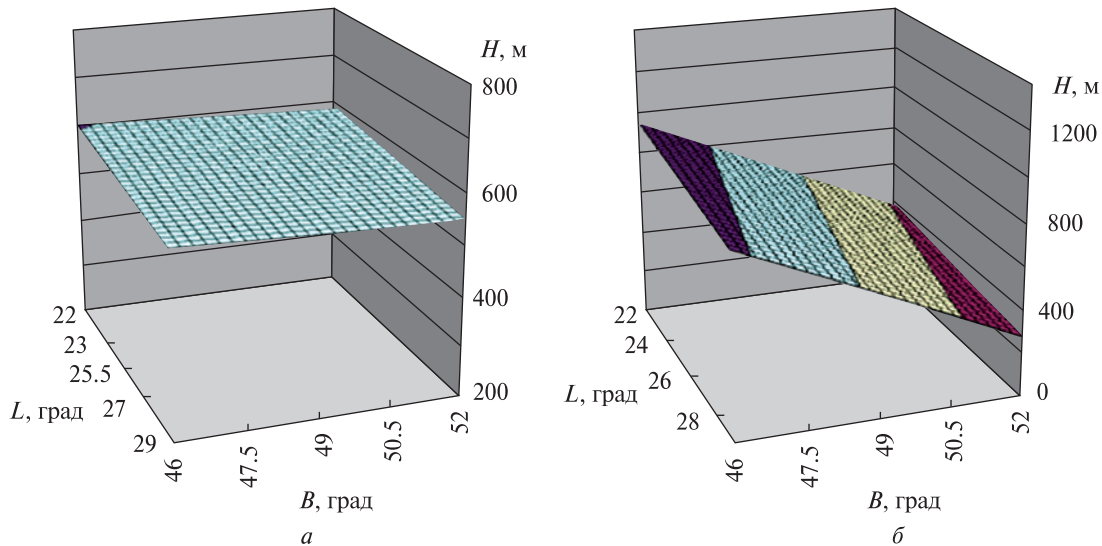


Рис. 4. Ізоповерхні для значення тропосферної затримки: *а* — станом на 7 липня 2012 р., UT = 00^h ($\Delta\rho_{\min} = 2.323$ м), *б* — станом на 15 липня 2012 р., UT = 12^h55^m ($\Delta\rho_{\min} = 2.329$ м)

[4]. За цією технологією побудовано ізоповерхні тропосферних затримок з 7 по 15 липня 2012 р. на різні моменти часу. На рис. 4 наведено для прикладу ізоповерхні на 7 липня (*а*) та 15 липня 2012 р. (*б*).

У таблиці наведено мінімальні та максимальні висоти над різними пунктами покриття мережі UA-EUPOS/ZAKPOS з фіксованим значенням $\Delta\rho$ та перепад висот ΔH на чотири дати спостережень.

Порівняння ізоповерхонь для чотирьох дат на конкретні моменти часу дає підстави ствер-

джувати, що 7 липня 2012 р. і 8 липня 2013 р. у тропосфері ситуація була стабільною, тобто над різними пунктами покриття мережі активних референцих станцій UA-EUPOS/ZAKPOS ізоповерхня розташована з перепадом висот $\Delta H = 58$ і 160 м відповідно. Натомість 13 і 15 липня 2013 р. тропосфера була нестабільною, а зміна висот, на яких $\Delta\rho_{\min} = 2.323$ м і $\Delta\rho_{\min} = 2.329$ м, — надзвичайно велика ($\Delta H = 670 \dots 1000$ м).

Висоти шарів тропосфери над референцими станціями мережі UA-EUPOS/ZAKPOS з фіксованим значенням $\Delta\rho$

Дата, липень 2012 р.	UT	$\Delta\rho$, м	H_{\min} , М	H_{\max} , М	ΔH , м
7	00 ^h 00 ^m	2.323	543.53	601.41	57.88
		2.423	257.06	314.95	57.89
		2.223	842.60	900.49	57.89
8	10 ^h 49 ^m	2.368	496.01	656.44	160.43
		2.468	157.01	317.44	160.43
		2.268	849.63	1010.06	160.43
13	12 ^h 55 ^m	2.335	6.22	965.40	959.18
		2.435	—	582.76	—
		2.235	393.91	1364.78	970.87
15	12 ^h 55 ^m	2.329	269.02	937.69	668.66
		2.429	—	604.11	—
		2.229	617.24	1278.63	661.39

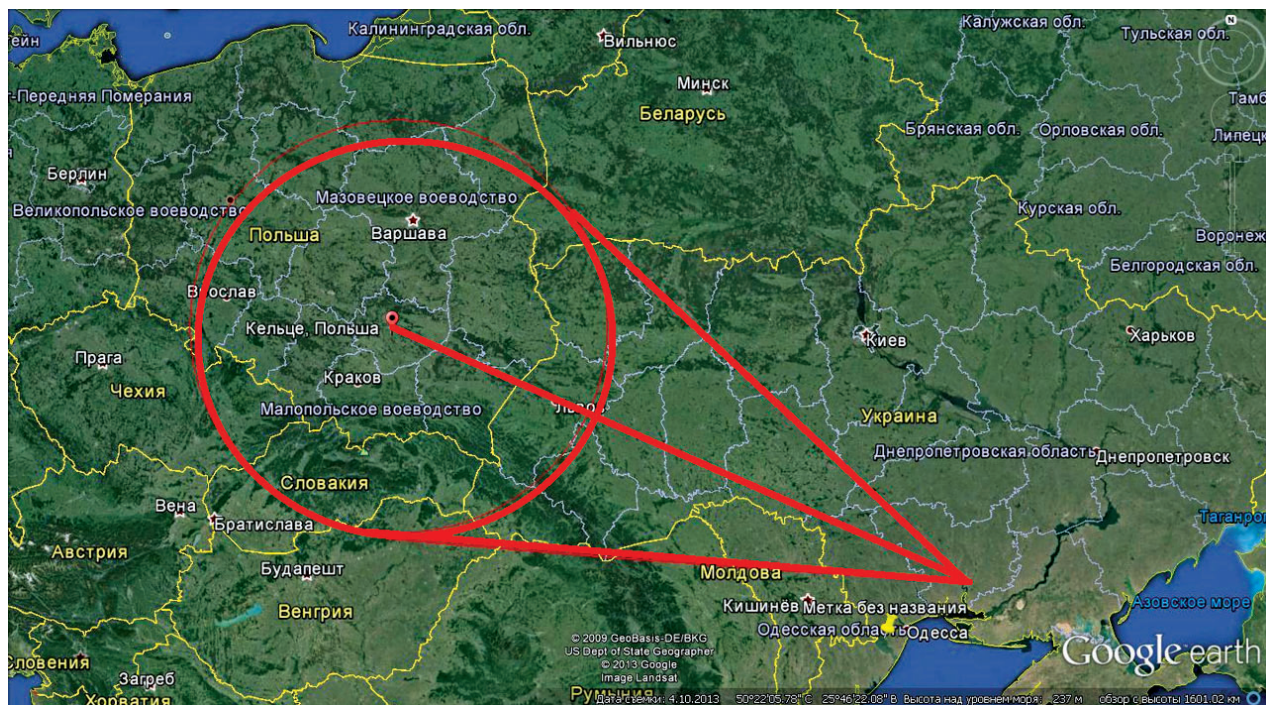


Рис. 5. Схема прийому сигналу загоризонтних FM-станцій на трасі Кельце — Миколаїв

Для аналізу ситуації, що склалася на період від 7 до 15 липня 2012 р. на конкретні моменти часу, було використано дані аерологічного зондування атмосфери у містах Чернівці, Львів на $UT = 00^h$, погодні умови на метеорологічних станціях Закарпатської області та дані наявності сигналів від загоризонтних FM-станцій на трасі Кельце — Миколаїв, що не були віднесені до метеорних.

Дані наявності таких сигналів на трасі Кельце — Миколаїв наведено у працях [1, 7], де розглянуто аспекти спостережень та результати досліджень метеорної активності радіотехнічними засобами в НДІ МАО. Обробка масивів даних провадиться за допомогою розробленої в НДІ МАО програми автоматичного детектування метеорів. Фрагменти аудіосигналу FM-радіостанції тривалістю менше 10 с вважаються метеорами, з більшою тривалістю — явищами, обумовленими іншими механізмами загоризонтного розповсюдження радіохвиль, в тому числі наявністю надрефракції внаслідок збурень коефіцієнта заломлення тропосфери. На рис. 6 чітко видно, що 7 та 8 липня 2012 р. практично не спостерігаються сигнали

загоризонтних FM-станцій, не віднесені до метеорів, і навпаки, 13 липня 2012 р. тривалість таких сигналів була значною. Ще більше неметеорних сигналів спостерігається 15 липня 2012 р.

Для конкретизації метеорологічної ситуації на трасі Кельце — Миколаїв на рис. 7 показано щогодинні зміни тривалості неметеорних загоризонтних сигналів (δ_h) з 13 липня 2012 р. до початку 16 липня 2012 р. Позначкою відмічено значення δ_h на 13 та 15 липня 2012 р. ($UT = 13^h$).

Отже, з 3 до 9 липня 2012 р. загоризонтних сигналів, не віднесених до метеорних, на трасі Кельце — Миколаїв не спостерігається (рис. 5). 7 липня 2012 р. ізоповерхня розташована з перепадом висот $\Delta H = 58$ м (таблиця, рис. 4, а) та різниця атмосферних затримок $\delta\Delta\tau = 0.15$ м. Погодні умови на метеостанціях у зоні покриття мережею референціальних станцій ZAKPOS були стабільними. Все це дає підстави стверджувати, що метеорологічна ситуація на висотах розміщення референціальних станцій і вище була стабільною.

Демо аналогічний аналіз на 13 та 15 липня 2012 р. Тривалість неметеорних сигналів 12 липня

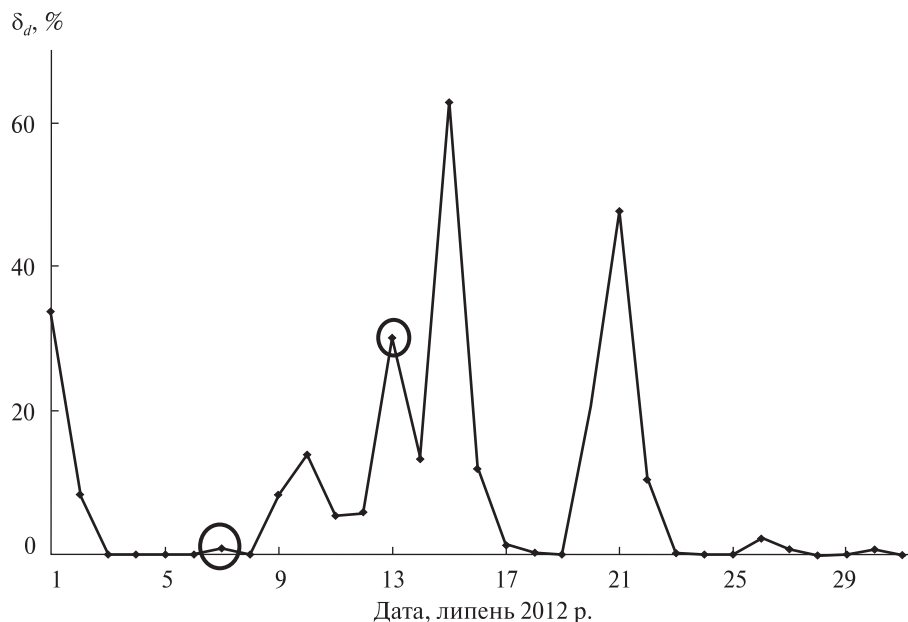


Рис. 6. Фрагмент тропосферних збурень у липні 2012 р. на трасі Кельце — Миколаїв; δ_d — тривалість спостереження (у процентах від тривалості доби) сигналів загоризонтних FM-станцій, не пов'язаних з метеорними відображеннями

була незначною (рис. 6), але вже о 6 год 13 липня їхня тривалість різко зростає (рис. 7) з наступним спадом, і з 9 год до 12 год вони практично не спостерігалися. О 13 год тривалість неметеорних сигналів досягла 30 %. На момент часу 12^h55^m побудовано три ізоповерхні тропосферних затримок, зміна висот ΔH на яких (таблиця) надзвичайно велика, а $\delta\Delta\rho = 0.16$ м. Сигнали загоризонтних FM-станцій, не віднесені до метеорних, спостерігалися аж до початку наступної доби.

14 липня 2012 р. спостерігалася більш стабільна атмосфера. Проте у першій половині ночі 14/15 липня ситуація змінюється на різке збільшення тривалості неметеорних сигналів. Так, 15 липня 2012 р. о UT = 00^h00^m спостерігається максимальне значення δ_h (рис. 7). Ізоповерхню побудовано на UT = 12^h55^m (рис. 4, б), значення δ_h на цей момент часу дорівнює 60 % (рис. 7), $\Delta H = 670$ м (таблиця), а $\delta\Delta\rho = 0.18$ м. З 14 до 20 год тривалість неметеорних сигналів різко зростала і досягла максимального значення.

Розглянуті зміни тривалості сигналів загоризонтних FM-станцій, не віднесені до метеорних, на трасі Кельце — Миколаїв дають підстави вважати, що ці сигнали, скоріше за все, зумовлені поя-

вою свержрефракції внаслідок збурень коефіцієнта заломлення тропосфери, а отже, на деякій частині (якщо не на всій) покриття мережею референціальних станцій ZAKPOS атмосфера була нестабільною.

На підтвердження такого висновку приведемо опис метеорологічної ситуації, яка спостерігалася протягом цього періоду. У Закарпатській області 7 і 8 липня 2012 р. була малохмарна погода без опадів. 12 липня 2012 р. з UT = 06^h до UT = 18^h спостерігався зливовий дощ, шквали вітру, 13 липня дощу не було, 14 липня вночі спостерігався дощ до UT = 06^h, а потім дощу не було. На 15 липня 2012 р. у Закарпатській області спостерігалися шквали вітру, буревій, зливи, гроза, град.

У Закарпатському центрі гідрометеорології повідомили такий факт. 12 липня 2012 р. на Березнянщині сильним шквалистим вітром позносило 200 покрівель, у результаті шторму розірвало електричні дроти. Потім циклонічний вихор зірвався з Карпатських гір і пройшов на територію Прикарпаття і далі на схід. Відтак наробив шкоди у п'яти областях України. Тому Львівський гідрометеоцентр завжди бере до уваги штормові попередження ужгородських синоптиків. Така ситуація, як стверджують спеціалі-

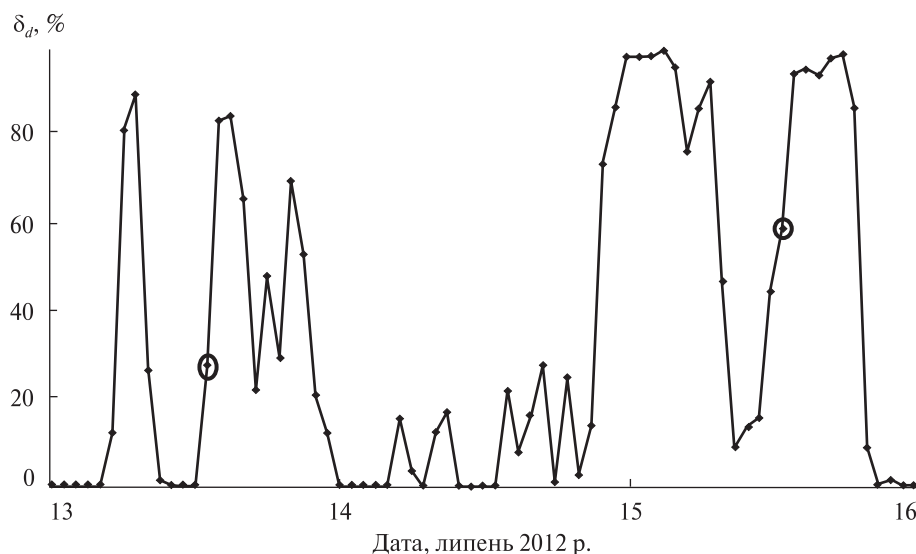


Рис. 7. Фрагмент щогодинних тропосферних збурень за період з 13 по 16 липня 2012 р. на трасі Кельце — Миколаїв; δ_h — тривалість спостереження сигналів загоризонтних ФМ-станцій, не пов'язаних з метеорними відображеннями (у процентах від 1 год)

ти, буває раз на 2—3 роки [<http://zakarpatty.net.ua/News/106203-Zakarpatski-synoptyky>].

Отже, побудувавши ізоповерхні тропосферних затримок на кожний момент часу спостережень, можна визначити області стабільного стану атмосфери на певних висотах протягом певного інтервалу часу.

Якщо побудовані ізоповерхні вказують на просторово-часову нестабільність атмосфери, потужність якої з плином часу зростає, то це означає перенесення тропосферних збурень над даною територією. Звідси висновок, що динамічна карта ізоповерхонь $\Delta\tau$ над мережею референціальних станцій дає можливість передбачити не лише сферично-симетричний стан тропосфери, а й виникнення та переміщення тропосферних збурень. 4D-поля тропосферних затримок можна використовувати для передбачення стихійних явищ, тобто застосовувати для потреб метеорології.

ВИСНОВКИ

Побудовано поверхню зміни тропосферної затримки на основі даних 18 референціальних станцій та інтерполяційних методів для визначення тро-

посферної затримки на 200000 вузлових точках регулярної планово-висотної сітки на прикладі Закарпатської області. Такий метод побудови поверхонь зміни тропосферної затримки можна застосовувати для будь-якої території, що покривається мережею референціальних ГНСС-станцій. Результати виконаних досліджень показали, що середня квадратична похибка просторової інтерполяції становить близько 2 см із середнім квадратичним відхиленням 0.2 см у межах території покриття мережі. Вперше розроблено технологію побудови ізоповерхонь тропосферних затримок. Ідея даної технології полягає у знаходженні висот над референціальними станціями з однаковими значеннями тропосферних затримок. Динамічна карта таких ізоповерхонь над територією покриття референціальними станціями дає можливість передбачити виникнення та переміщення тропосферних збурень, а 4D-поля тропосферних затримок можна використовувати для передбачення стихійних явищ.

Порівняльний аналіз зміни перепадів висот ізоповерхні тропосферної затримки и тривалості не метеорних сигналів загоризонтних ФМ-станцій, зареєстрованих на трасі Кельце — Миколаїв у пе-

ріод з 7 по 15 липня 2012 р., показав, що найбільш ймовірною причиною появи більшої частини таких сигналів є виникнення надрефракції, викликаного збуреннями коефіцієнта заломлення тропосфери внаслідок інтенсивних метеорологічних процесів, які спостерігались у цей час на радіотрасі Кельце — Миколаїв.

1. Бушув Ф. И., Калюжный Н. А., Сливинский А. П. и др. Использование сигналов вещательных FM-станций для исследований численности метеоров // Космична наука і технологія. — 2011. — 17, № 3. — С. 72—82.
2. Кабляк Н. И. Технология определения тропосферных задержек в сети активных референциальных станций ZAKPOS/UA-EUPOS // Кинематика и физика небес. тел. — 2013. — 29, № 4. — С. 73—80.
3. Кабляк Н. И. Розробка технології визначення тропосферних затримок для GNSS спостережень в реальному часі // Геодезія, картографія і аерофотознімання. — 2012. — Вип. 76. — С. 3—7.
4. Кабляк Н. И. Алгоритм побудови ізоплощин тропосферних затримок в реальному часі спостережень // Нові технології в геодезії, землевпорядкуванні та природокористуванні: Зб. матер. 6 міжнар.-практ. конф. — Ужгород, 2012. — С. 185—186.
5. Кабляк Н. И. Методика визначення впливу тропосфери на результати GNSS вимірювань у мережі активних референціальних станцій // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. — 2013. — № 1 (25). — С. 62—66.
6. Савчук С., Проданець І., Калінич І. Перша мережа активних референціальних станцій в Україні ZAKPOS. Етапи становлення та початок діяльності // Геопроект. — 2010. — № 1. — С. 16—23.
7. Сливинский А. П., Шульга А. В., Бушув Ф. И. и др. Исследование плотности метеорных потоков по сигналам FM станций в НИИ НАО // Дистанционное радиозондирование ионосферы: Сб. тез. конф. молодых ученых. — Харьков, 2011. — С. 35.

Стаття надійшла до редакції 01.02.17

REFERENCES

1. Bushuev F. I., Kalyuzhny N. A., Slivinsky A. P., Shulga A. V. The use of FM-signals of broadcasting stations for meteor activity investigation. *Kosm. nauka tehnol.*, 17 (3), 72—82 (2011) [In Russian].
2. Kablak N. I. The technology of the tropospheric delay in network of active reference stations ZAKPOS / UA-EUPOS. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 29 (4), 73—80 (2013).

3. Kablak N. I. Development of technology of tropospheric delay for GNSS observations in real time. *Geodesy and Cartography astrophoto pictures*, N 76, 3—7 (2012).
4. Kablak N. I. Algorithm for construction of isosurfaces of tropospheric delays in real-time observations / New technologies in geodesy, land management and environmental management: 6th Intern. Pract. Conf., October 24-27, 2012: Proc. - Uzhhorod: Hoverla, 2012.: 185—186.
5. Kablak N. I. Method of determining the impact on results troposphere GNSS — measuring network of active reference stations. *Recent advances in geodetic science and industry*, N 1 (25), 62—66 (2013).
6. Savchuk S., Prodanets I., Kalynych I. Creation of ZAKPOS active network reference stations for Transcarpathian region of Ukraine. — Berlin.(2008).
7. Slivinsky A. P., Shulga A. V., Bushuev F. I., Kalyuzhny N. A., Kozryev Ye. S., Vovk V. S. Investigation of the density of meteor showers in the RI NAO using signals of FM stations. The Abstract Book of the Young Sci. Conf. «Remote radio sounding of the ionosphere», P. 35 (2011).

Н. И. Кабляк¹, М. П. Калюжный²,
А. В. Шульга², В. С. Волк²

¹ Ужгородский национальный университет

² Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория», Николаев

ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ АТМОСФЕРЫ В СЕТИ АКТИВНЫХ РЕФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СТАНЦИЙ UA-EUPOS/ZAKPOS

Современные сети активных референциальных станций дают возможность решать не только практические задачи геодезии и навигации, но и чисто научные задачи, имеющие важное значение в науках о Земле. Принцип работы системы дистанционного мониторинга атмосферы базируется на регистрации и обработке радиосигналов ГЛОНАСС/GPS. Система дистанционного мониторинга атмосферы предназначена для получения информации о состоянии атмосферы. На основе 845 временных измерений тропосферной задержки на 20 станциях сети UA-EUPOS/ZAKPOS исследованы пространственно-временную нестабильность атмосферы над территорией покрытия активными референциальными станциями.

Ключевые слова: GPS, атмосферная задержка, система дистанционного мониторинга атмосферы.

N. I. Kablak¹, N. P. Kaliuzhnyi², A. V. Shulga², V. C. Vovk²

¹ Uzhgorod National University

² Research Institute “Mykolaiv Astronomical Observatory”

PRACTICAL IMPLEMENTATION OF DETECTION
OF SPATIOTEMPORAL ATMOSPHERE INSTABILITY
IN THE NETWORK OF ACTIVE REFERENCE
STATIONS UA-EUPOS/ZAKPOS

A modern network of active reference stations allows you to not only solve the practical tasks of geodesy and navigation but also purely scientific problems that are important in all geo-

sciences. The principle of operation of an atmosphere remote monitoring system is based on the registration and processing of GLONASS/GPS signals. Such system is designed to obtain information about the state of the atmosphere. Basing on 845 time measurements of troposphere delay by 20 stations of UA-EUPOS/ZAKPOS network, we have studied the spatiotemporal instability of the atmosphere over the territory covering active reference stations.

Keywords: GPS, Atmospheric delay, System for remote monitoring of the atmosphere.