

УДК 528.3

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ТРОПОСФЕРИ НА РЕЗУЛЬТАТИ GNSS-ВИМІРЮВАНЬ У МЕРЕЖІ АКТИВНИХ РЕФЕРЕНЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

Н. Каблак

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: технологія RTK, тропосферна затримка, GNSS.

Постановка проблеми

На території Закарпаття створена перша українська мережа активних референційних станцій ZAKPOS/UA-EUPOS [1]. Нині інтенсивно продовжуються науково-дослідні роботи з визначення та врахування похибок, що впливають на GNSS-спостереження у мережі активних референційних станцій, зокрема дослідження впливу нижньої частини атмосфери (тропосферних затримок електромагнітного сигналу). Похибки тропосферних затримок в GNSS-вимірюваннях впливають перш за все на точність визначення висоти пункту над рівнем моря та на горизонтальні координати пунктів спостережень. Враховуючи географічне розташування України і, зокрема, Закарпатської області, роверний приймач, що працює в мережі активних референційних станцій UA-EUPOS/ZAKPOS в режимі RTK (Real Time Kinematic – "кінематика у реальному часі"), може мати іншу висоту, ніж найближча референційна станція. При цьому відстань до найближчої референційної станції від роверного приймача в межах України може досягати близько 150–250 км. Тому актуальною проблемою і сьогодні залишається визначення та врахування тропосферних затримок у режимі RTK.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Отримання сантиметрової точності координат у режимі реального часу, наприклад, від мережі активних референційних станцій, обмежується умовою, яка передбачає, що відстань між роверною та референційною станціями не повинна перевищувати 70–80 км [1–4]. Це обмеження щодо відстані зумовлено нестабільністю атмосфери як у вертикальному, так і у горизонтальному напрямку [2, 4]. Багато провідних вчених вважають вплив тропосфери одним із основних джерел похибок під час GNSS-спостережень [5–11]. Згідно з [7, 8, 11] точність компенсації зенітних тропосферних затримок близько 30–40 мм. Під час проведення GNSS-спостережень у режимі реального часу неврахована тропосферна затримка на відстані 50 км може досягати в 3-D координати до 1 см, а на відстані 100 км – до 10 см [12]. За стандартної похибки цього методу в 2–5 см вона може бути недопустимою у багатьох застосуваннях та потребує введення відповідних поправок.

Основною характеристикою атмосфери як середовища поширення радіосигналу є індекс рефракції (N). У роботах [9, 10] розглянуто задачу визначення

висотного профілю показника заломлення (n) за вимірюваннями фази GNSS сигналу із розв'язку оберненої задачі. При цьому автори застосовують методи статистичної регуляції і метод Тихонова. В роботі [10] розглянуто підхід до розв'язання задачі встановлення профілю показника заломлення (індексу рефракції), що базується на розв'язку інтегрального рівняння безпосередньо для впливу атмосфери в фазу сигналу. Оцінено точність методу з використанням даних метеозондувань.

Висотний профіль індексу рефракції у пункті встановлення супутникового GNSS приймача дає змогу обчислити висотний хід тропосферної затримки в цьому пункті.

Сьогодні проектом у Центральній Європі, відповідно до якого визначають у майже реальному часі зенітні тропосферні затримки з мережі GNSS-станцій, є E-GVAP. Дію цього проекту планують продовжити з метою переходу від регіональних мереж до глобальних і навпаки [14].

Невирішені частини загальної проблеми

Приймають, що точність поправок за вплив тропосфери прямолінійно залежить від відстаней між референційними станціями (у разі застосування мережевого розв'язку) та від відстаней між окремою станцією та рухомим приймачем (у випадку застосування звичайних, не змодельованих поправок). У разі математичного моделювання поправок, тобто застосування мережевого розв'язку, завжди є змога автоматичного перемикавання в режим застосування звичайної поправки, тобто отримання поправки від найближчої до користувача GNSS-станції. При цьому вважається, що стан тропосфери над референційною станцією і над роверною однаковий. Отже, відстань між рухомим приймачем та референційними станціями важлива навіть у разі застосування мережевого розв'язку всередині зони покриття мережі. Тому потрібно побудувати просторово-часовий розподіл тропосферних затримок над усією територією мережі активних референційних станцій у реальному часі спостережень.

Постановка завдання

Для забезпечення відповідної точності GNSS-вимірювань виникла проблема визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті в межах території покриття мережею активних референційних станцій у режимі RTK.

Виклад основного матеріалу проблеми

Використання для обробки супутникових спостережень невідомих тропосферних параметрів дає змогу

для кожної референційної станції отримати значення тропосферної затримки на заданий момент часу $\Delta\rho_i$ [12]. Величину $\Delta\rho_i$ визначають із розв'язку рівняння псевдовідстані після вилучення інших похибок.

Для оцінювання впливу атмосфери на точність визначення координат будь-якого пункту в реальному часі спостережень на території покриття мережею активних референційних станцій використано 845 часових вимірювань тропосферної затримки на 19 станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS. Щохвилинні значення тропосферних затримок було усереднено на п'ятнадцятихвилинному інтервалі для кожної із 19 активних референційних GNSS станцій мережі UA-EUPOS/ZAKPOS. Після цього для кожного усередненого значення проведено інтерполяцію тропосферних затримок на точку розміщення роверного приймача. При цьому спочатку вибрано референційну станцію, розміщену найближче до роверного приймача, і позначено її умовно як опорну. Після вибору мінімально (4–6) активних референційних GNSS станцій, розташованих поблизу роверного приймача, складено систему рівнянь:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\Delta\rho_{on}} = c_0 + c_1(B_{on} - B_i) + c_2(L_{on} - L_i) + c_3(H_{on} - H_i) + c_4(H_{on} - H_i)^2, \quad (1)$$

де $\Delta\rho_i, B_i, L_i, H_i$ – зенітна тропосферна затримка та координати i -ї референційної станції, $\Delta\rho_{on}, B_{on}, L_{on}, H_{on}$ – зенітна тропосферна затримка та координати опорної референційної станції. Методом найменших квадратів (МНК) знаходимо коефіцієнти c_0, c_1, c_2, c_3 .

Кількість рівнянь у системі (1) залежить від кількості вибраних активних референційних станцій мережі. Для кожного моменту часу обчислюють коефіцієнти c_0, c_1, c_2, c_3 . Використовуючи отримані коефіцієнти, знаходили значення тропосферних затримок для кожної із 19 активних референційних станцій та на точку розміщення роверного приймача. За роверний приймач було взято станцію Міжгір'я (MIZG). Отримані значення тропосферних затримок порівнювали зі щохвилинними значеннями тропосферних затримок, за якими здійснено усереднення.

Результати виконаних досліджень показали, що середнє значення різниць тропосферних затримок становить 1,5–2 см із середньоквадратичним відхиленням 0,2 см, що дає похибку у визначення планових координат близько 1–2 см. Проте для знаходження тропосферних затримок на висотах понад 800 м над пунктами в межах території покриття мережею активних референційних станцій ZAKPOS/UA-EUPOS формула (1) не працює (дає похибку 15–20 см).

Тому ми розробили методу визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті та на будь-якій висоті в межах території покриття мережею активних референційних станцій у режимі RTK.

Як відомо, величину тропосферної затримки задають так:

$$\Delta\rho = 10^{-6} \int_H^{H_{\max}} N(h)dh. \quad (2)$$

Аналіз експериментальних значень індексу рефракції N показує, що його залежність від висоти добре апроксимується за допомогою формули [5]:

$$N(H) = N_0 \exp\left(-\frac{H - H_0}{\bar{H}}\right), \quad (3)$$

де N_0 і \bar{H} є функціями геодезичної довготи L і геодезичної широти B пункту, H_0 – висота пункту, для якої відомий коефіцієнт рефракції N_0 . Підставляючи (3) в (2) і обчислюючи інтеграл, отримуємо вираз для тропосферної затримки:

$$\Delta\rho = 10^{-6} N_0 \bar{H} \left[\exp\left(-\frac{H - H_0}{\bar{H}}\right) - \exp\left(-\frac{H_{\max} - H_0}{\bar{H}}\right) \right]. \quad (4)$$

Через великі значення H_{\max} ($H_{\max} \sim 50$ км) внесок від другого доданка в формулі (4) близько 1–2 мм. Враховуючи це, останнім доданком у формулі (4) можна знехтувати. Вибравши кілька – 4–6 активних референційних GNSS-станцій, які найближче розташовані до досліджуваної точки (ровера), і для яких відомі тропосферні затримки, та позначивши найближчу серед них як опорну, складемо систему рівнянь:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\Delta\rho_{on}} = [1 + c_1(B_i - B_{on}) + c_2(L_i - L_{on})] \exp\left(-\frac{H - H_{on}}{c_3}\right). \quad (5)$$

Коефіцієнти c_1, c_2, c_3 знаходять із системи рівнянь (5) за допомогою методу найменших квадратів (МНК).

З урахуванням (1) і (5) отримуємо:

$$N(H) = -10^6 \frac{\partial \Delta\rho}{\partial H} = \frac{10^6}{c_3} \Delta\rho_{on} \times [1 + c_1(B - B_{on}) + c_2(L - L_{on})] \exp\left(-\frac{H - H_{on}}{c_3}\right). \quad (6)$$

З іншого боку, індекс рефракції можна виразити через парціальний тиск e , температуру T і тиск p :

$$N = K_1 \frac{p - e}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2}, \quad (7)$$

де p – тиск повітря, мбар; e – парціальний тиск водяної пари, мбар; T – температура повітря абсолютна, К; K_1 – коефіцієнт, що характеризує поляризованість молекул сухого повітря, К·мбар⁻¹; K_2 – коефіцієнт, що враховує поляризацію молекул води, К·мбар⁻¹; K_3 – коефіцієнт, що відображає вплив зміни електричної орієнтації полярних молекул води, 10⁵ К²·мбар⁻¹.

Із (7) випливає, що

$$e = \frac{TN - K_1 p}{K_2 - K_1 + \frac{K_3}{T}}. \quad (8)$$

Для моделювання залежностей температури і тиску від висоти скористаємося такими формулами [5]:

$$T = T_0 - \gamma(H - H_0), \quad p = p_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{g_0}{R_d}}, \quad (9)$$

де T_0 і p_0 – значення температури і тиску на поверхні Землі, $R_d = 287.054 \text{ [м}^2 \cdot \text{с}^2 \cdot \text{град}^{-1}]$ – газова стала сухого повітря, g_0 – значення прискорення вільного падіння на поверхні Землі (стандартно можна брати $g_0 \approx 9.80616 \text{ м/с}^2$), γ – градієнт температури, який може змінюватися залежно від місцевості, пори року, часу доби (в стандартній моделі $\gamma = 0,0065 \text{ К/м}$).

Щоб знайти парціальний тиск з висотою, використовуємо формулу [5]:

$$e = e_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{4g_0}{R_d}}, \quad (10)$$

де парціальний тиск водяної пари на поверхні землі e_0 знаходимо через значення відносної вологості на поверхні землі W_0 , використовуючи формулу Магнуса:

$$e_0 = \frac{6.11W_0}{100} 10^{\frac{7.5(T_0 - 273.15)}{237.3 + T_0 - 273.15}}. \quad (11)$$

Для розрахунків брали дані аерологічного зондування атмосфери у Львові і на ці ж моменти часу значення тропосферних затримок із GNSS спостережень на референсних станціях мережі UA-EUPOS/ZAKPOS.

Для прикладу на рис. 1–3 для 02.09.2012 р., 10.07.2012 р., 08.12.2012 р. відповідно, показано залежність індексу рефракції N від висоти H над рівнем станції SULP (Львів), розраховану за форму-

лою (6) (червона пунктирна лінія), формулою (7) (зелена суцільна лінія), де значення температури і тиску обчислено з використанням (9), парціальний тиск – за формулою (10), (11). Поверхневі значення температури T_0 , тиску p_0 і відносної вологості W_0 брали з даних аерологічного зондування атмосфери. Зміну індексу рефракції N з висотою над рівнем станції SULP обчислено за формулою (7) (синя штрихпунктирна лінія), де парціальний тиск обчислено за формулою Магнуса: $e = \frac{6.11W}{100} 10^{\frac{7.5(T-273.15)}{237.3+T-273.15}}$, а значення температури, тиску і вологості на різних висотах взято з даних аерологічного зондування атмосфери в пункті Львів.

Як добре видно, результати для індексу рефракції, отримані з формули (6) та модельних формул (7), (9)–(11), дуже добре збігаються з експериментальними даними.

На рис. 4–6 для 02.09.2012 р., 10.07.2012 р., 08.12.2012 р., відповідно, показано залежність тропосферної затримки від висоти над рівнем станції SULP, розраховану за формулою (5) (червона пунктирна лінія) і точним обчисленням інтеграла в (2) (зелена суцільна лінія), де N – з (7), а температура, тиск і парціальний тиск – з (9) і (10). Градієнт температури обчислено на основі даних аерологічного зондування для п. Львів: $\gamma = 0.00569 \text{ К/м}$.

У таблиці, для прикладу, наведено числові значення індексів рефракції N (в N-одинацях), які обчислено за формулами (7) ($N(7)$), (6) ($N(6)$), із використанням даних аерологічного зондування атмосфери ($N_{\text{експерим}}$), та тропосферних затримок $\Delta\rho$ (у метрах) за формулами (5) ($\Delta\rho_i(5)$), (2) ($\Delta\rho_i(7)$) на різних висотах атмосфери над пунктом Львів на 10.07.2012 р.

Значення індексів рефракції та тропосферних затримок

$H, \text{м}$	$N(6)$	$N(7)$	$N_{\text{експерим}}$	$N_{\text{експ}} - N(6)$	$N_{\text{експ}} - N(7)$	$\Delta\rho_i(5)$	$\Delta\rho_i(7)$
323	341,049	344,025	344,025	2,976	0	2,395	2,461
497	332,925	333,501	331,801	-1,124	-1,7	2,336	2,403
1022	309,567	304,567	300,419	-9,148	-4,148	2,169	2,234
1499	289,768	281,487	285,687	-4,081	4,2	2,029	2,091
2325	258,431	247,391	251,999	-6,432	4,608	1,811	1,875
2478	253,01	241,767	246,355	-6,655	4,588	1,774	1,826
3114	231,668	220,324	225,15	-6,518	4,826	1,627	1,672
4058	203,264	193,283	198,372	-4,892	5,089	1,432	1,467
4589	188,846	180,083	185,243	-3,603	5,16	1,333	1,363
4926	180,23	172,33	177,51	-2,72	5,18	1,274	1,301
5197	173,588	166,409	172,293	-1,295	5,884	1,228	1,253
5582	164,571	158,436	160,179	-4,392	1,743	1,165	1,188
5780	160,117	154,521	157,833	-2,284	3,312	1,134	1,155
6013	155,031	150,064	153,703	-1,328	3,639	1,099	1,119
6466	145,599	141,829	139,116	-6,483	-2,713	1,033	1,051
7460	126,865	125,498	124,837	-2,028	-0,661	0,9	0,916
7909	119,213	118,799	119,117	-0,096	0,318	0,845	0,86
8221	114,169	114,362	114,714	0,545	0,352	0,809	0,824
8816	105,134	106,358	107,189	2,055	0,831	0,743	0,759

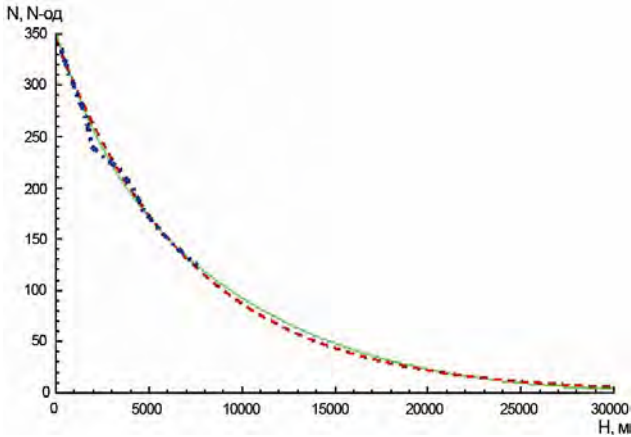


Рис. 1. Графіки залежностей показника рефракції від висоти (02.09.2012 р.)

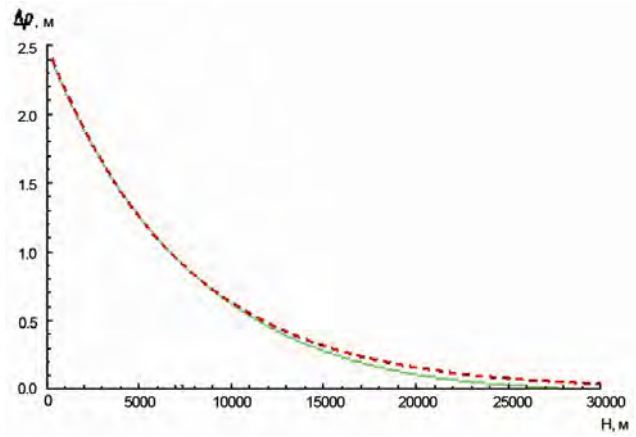


Рис. 4. Графіки залежностей тропосферної затримки від висоти (02.09.2012 р.)

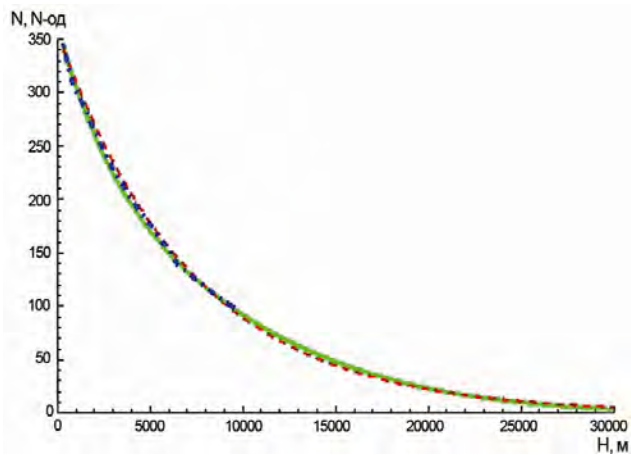


Рис. 2. Графіки залежностей показника рефракції від висоти (10.07.2012 р.)

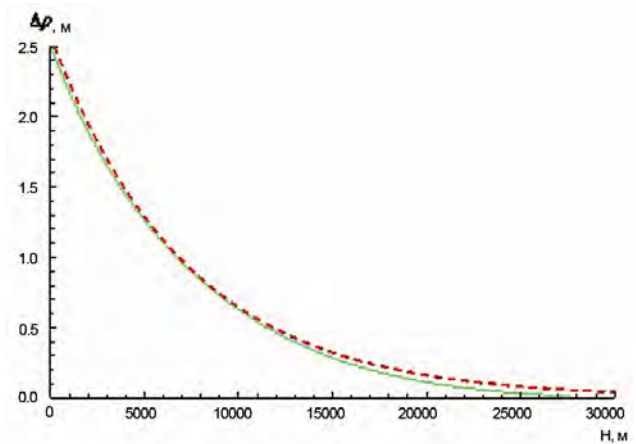


Рис. 5. Графіки залежностей тропосферної затримки від висоти (10.07.2012 р.)

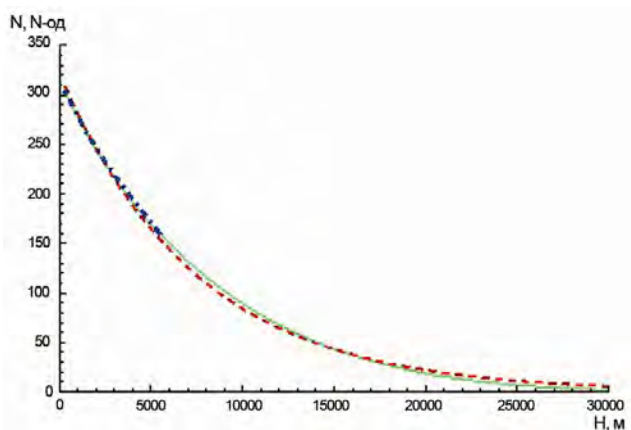


Рис. 3. Графіки залежностей показника рефракції від висоти (8.12.2012 р.)

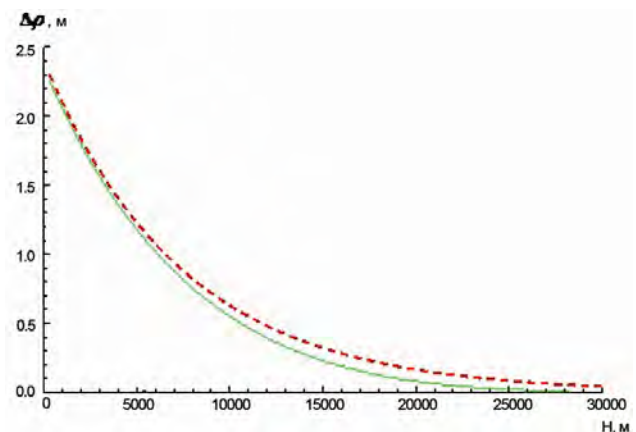


Рис. 6. Графіки залежностей тропосферної затримки від висоти (8.12.2012 р.)

Результати виконаних досліджень вказують на те, що розроблена методика дає змогу визначати тропосферні затримки у будь-якому пункті в межах території покриття мережею активних референсних станцій в режимі реального часу спостережень з точністю до 5–6 см без врахування метеопараметрів на поверхні Землі.

Висновки

Результати досліджень показали, що розроблену методику обчислення індексів рефракції та атмосферних затримок можна використовувати в будь-якому пункті та на будь-якій висоті атмосфери на території мережі ZAKPOS/UA-EUPOS у RTK-режимі. Оцінку точності методу здійснено з викорис-

танням даних аерологічних зондувань атмосфери в пункті Львів.

Література

- Офіційний сайт мережі референціальних станцій ZAKPOS: <http://zakpos.zakgeo.com.ua>
- Евстафьев О. Наземная инфраструктура для точного позиционирования / О. Евстафьев // Геопрофи. – 2008. – № 1. – С. 21–24; № 2. – С. 24–28; № 3. – С. 15–18.
- EPN – Європейська перманентна мережа. – <http://www.epncb.oma.be/>
- Standards and Guidelines EUPOS. – <http://www.eupos.org>
- Mendes V.B., Langley R.B. Tropospheric Zenith Delay Prediction Accuracy for Airborne GPS High-Precision Positioning // Proceedings of The Institute of Navigation 54th Annual Meeting, Denver, CO, U.S.A., 1–3 June 1998. – P. 337–347.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System. Theory and Practice. – Wien; N.Y.: Springer-Verlag, 1994. – 356 p.
- Devis M.S., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System // J. Geophys. Res. – 1992. – V. 97. – P. 15787–5801.
- Казаков Л.Я. Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере / Л.Я. Казаков, А.Н. Ломакин. – М.: Наука, 1976. – 165 с.
- Хуторова О.Г. О перспективах исследования неоднородной структуры тропосферы с помощью сети приемников GPS-ГЛОНАСС / О.Г. Хуторова, А.А. Васильев, В.Е. Хуторов // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – 23. – № 6. – С. 510–514.
- Азизов А.А. Использование сигналов навигационных ИСЗ для определения параметров атмосферы / А.А. Азизов, К.П. Гайкович, С.С. Кашкаров, М.Б. Черняева // Изв. ВУЗов. – Радиофизика, 1997. – Т. XLI, № 9. – С. 1093–1110.
- Schueler T., G.W. Hein and Eissfeller B. A New Tropospheric Correction Model for GNSS // Navigation Proceedings of GNSS 2001, V GNSS International Symposium, Spanish Institute of Navigation, Seville, Spain, 2001. – May 8–11.
- Schueler T. On Ground-Based GPS Tropospheric Delay Estimation Dissertation, Schriftenreihe 73, Studiengang Geodäsie und Geoinformation, Universität der Bundeswehr München, February 2001, online: <http://137.193.32.1/Forschung/TropAC/docs/phd/index>.
- Каблак Н.І. Сучасні підходи до визначення та використання тропосферних затримок / Н.І. Каблак // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – Львів, 2009. – Вип. 72. – С. 22–27.
- Каблак Н.І. Моніторинг осадженої водяної пари на основі обробки ГНСС-даних / Н.І. Каблак // Космічна наука і технологія. – 2011. – Т. 17, № 4. – С. 65–73.

Методика визначення впливу тропосфери на результати GNSS-вимірювань у мережі активних референціальних станцій

Н. Каблак

Розроблено методику визначення тропосферних затримок у будь-якому пункті в межах території покриття мережею активних референціальних станцій у режимі реального часу спостережень та на різних висотах над поверхнею Землі.

Методика определения влияния тропосферы на результаты GNSS-измерений в сети активных референциальных станций

Н. Каблак

Разработана методика определения тропосферных задержек в любом пункте в пределах территории покрытия сетью активных референциальных станций в режиме реального времени наблюдений и на разных высотах над поверхностью Земли.

Method for determining the influence of results troposphere GNSS-measurements in a network of active reference stations

N. Kablak

The technique of definition of tropospheric delays in any point within the covering territory by a network of active reference stations in real time supervision and at different heights over an earth surface is developed.

Interexpo
Geo
SIBERIA

24–26 April

Novosibirsk, Russian Federation

Interexpo Geo-Siberia–2013: Advanced Geospatial and Surveying Technologies for Environmental Management and Sustainable Development.

Organized by the Siberian State Academy of Geodesy and LLC "InterGeo-Siberia"