

34

ЗАХІДНЕ ГЕОДЕЗИЧНЕ ТОВАРИСТВО
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"
УКРАЇНСЬКЕ ТОВАРИСТВО ГЕОДЕЗІЇ ТА КАРТОГРАФІЇ
ДЕРЖАВНА СЛУЖБА ГЕОДЕЗІЇ, КАРТОГРАФІЇ ТА КАДАСТРУ
ДЕРЖАВНЕ НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ ПІДПРИЄМСТВО "КАРТОГРАФІЯ"
ДП "КИЇВГЕОІНФОРМАТИКА"
ЗАТ "ІНСТИТУТ ПЕРЕДОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ"
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО "АЗОВІНЖГЕОДЕЗІЯ"
• ВАТ "ОДЕСАГАЗ"

СУЧАСНІ ДОСЯГНЕННЯ ГЕОДЕЗИЧНОЇ НАУКИ ТА ВИРОБНИЦТВА

*Збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК
Видається з 1996 р.*

Випуск I (11)

Головний редактор – доктор технічних наук, професор І.С. Тревого

*Присвячено 11-й річниці професійного свята
працівників геології, геодезії і картографії України
та 100-річчю з дня народження
видатного українського вченого
професора М.К. Мигаля*

Львів
Видавництво Національного університету "Львівська політехніка"
2006

УДК 528.28:629.783/521.371:528.14

НЕСТАБІЛЬНІСТЬ АТМОСФЕРИ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА СПОСТЕРЕЖЕННЯ НЕБЕСНИХ ТІЛ

Н. Каблак

Лабораторія космічних досліджень
Ужгородського національного університету, Ужгород

Постановка проблеми

За останні півтора десятка років став доступним для використання значний потенціал Глобальної системи визначення місцеположення (GPS). Головним фактором бурливого розвитку GPS є її всепогодність, оперативність, висока точність та порівняно невелика вартість. Якщо на глобальному рівні такі методи космічної геодезії, як радіоінтерферометрія з наддовгими базами, лазерна локація ШСЗ можуть конкурувати з GPS, то використання GPS на регіональному рівні та на локальних геодинамічних зонах є поза конкуренцією через її простоту експлуатації та мобільність груп спостерігачів. Вплив атмосфери (тропосфери і стратосфери) на поширення електромагнітних хвиль (EMX) визначається характером зміни показника заломлення повітря. Мета роботи – дослідження атмосферних фізичних процесів та їхнього впливу на точність розв'язків задач космічної геодезії.

Викладення основного матеріалу. Тропосферна затримка

Вплив нейтральної тропосфери (атмосферна поправка) на поширення GPS-сигналу визначається співвідношенням:

$$\Delta\rho = 10^{-6} \int N ds + (L - G),$$

де $N = N(S)$ – індекс рефракції вздовж кривої поширення сигналу, L – шлях поширення сигналу, G – геометрична відстань, $\Delta\rho = 10^{-6} \int N ds$ – складова поправки за рахунок зміни швидкості. Атмосферна поправка $\Delta\rho$ складається з двох компонент: зенітної статистичної затримки $\Delta\rho_s$, яка залежить від стану сухої складової атмосфери, і зенітної затримки $\Delta\rho_w$, яка залежить від вологості повітря. Для найточнішого визначення поправки $\Delta\rho$ необхідно знати реальні, миттєві значення метеопараметрів вздовж шляху поширення електромагнітної хвилі [1–3]. У разі відсутності таких даних $\Delta\rho$ шукають, використовуючи модельне представлення поправки. На основі даних аерологічного зондування атмосфери (температури T , тиску P та відносної вологості повітря W) в пункті Львів за 2002–2004 рр. досліджено значення поправок $\Delta\rho_e$ (еталонні значення), визначених за даними аерологічного зондування, значень поправок $\Delta\rho_{GPS}$, знайдених при обробці GPS-спостережень, а також значень $\Delta\rho_s$, обчислених за моделлю Саастамойнена, з використанням тільки наземних значень метеопараметрів p_0 , T_0 , W_0 [2]. В табл. 1 подано еталонні значення різниць $\Delta\rho_e - \Delta\rho_s$ і $\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$ та середнє квадратичне відхилення σ від еталонного значення.

Розходження між значеннями $\Delta\rho_e$ і $\Delta\rho_s$ пояснюється тим, що $\Delta\rho_s$ не враховує випадковий розподіл змін метеорологічних параметрів. У радіодіапазоні великий вплив має вологість температури, які зумовлюють зростання парціального тиску атмо-

сфери, який впливає на значення поправки і не враховується при застосуванні формули Саастамойнена.

Одним із шляхів підвищення точності врахування впливу атмосфери є використання даних аерологічного зондування атмосфери, якщо не безпосередньо для обчислення атмосферних поправок $\Delta\rho$, то принаймні для знання детальної структури атмосфери. Використання даних аерологічного зондування атмосфери дає можливість дослідити особливості розподілу метеорологічних величин з висотою, характер їхньої зміни протягом року і у такий спосіб розробляти локальні моделі атмосфери, які будуть ближче до реальних умов.

Таблиця 1

Середні значення та середнє квадратичне відхилення різниць атмосферних поправок

Роки	2002		2003		2004		2002 - 2004	
	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_s$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_s$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_s$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_s$	$\Delta\rho_e - \Delta\rho_{GPS}$
Різниця поправок, м								
Середнє значення	0,006	0,014	0,005	0,008	0,006	0,015	0,005	0,013
Квадратичне відхилення, σ	0,015	0,015	0,020	0,017	0,018	0,023	0,018	0,020

Дослідження змін індексів рефракції з висотою для сухої та вологої атмосфери

Для дослідження фізичного стану атмосфери, тобто зміни індексів рефракції сухої N_s та вологої N_v атмосфери з висотою було використано миттєві профілі метеонапараметрів (тиску P , температури T , та відносної вологості W) за 1999 рік для п'яти досліджуваних пунктів (Ужгород, 235 зондувань; Львів, 185 зондувань; Київ, 319 зондувань; Харків, 120 зондувань; Сімферополь, 236 зондувань). Кількість рівнів, на яких вимірювали метеорологічні параметри, залежить від частоти запиту радіозонда і висоти $h_{вр}$ верхньої границі вимірювань. Висота $h_{вр}$ коливається в межах від 10 до 30 км. Кількість рівнів при одній зондуванні лежить в межах від 18 до 45. Час запуску радіозонда в 1999 р. - в усі часи доби. Точність вимірювань метеорологічних параметрів залежить від типу радіозонда. У нашому випадку вона становить відповідно 1 мб, 0,5°C і 5% при вимірюванні тиску, температури і відносної вологості.

Зміна індексів заломлення сухої і вологої атмосфери з висотою близька до експоненціальної функції:

$$N = N_0 \exp[-a(h - h_0) - b], \quad (1)$$

де N є однією з величин N_s або N_v . Параметр b є оцінкою відмінності початкового значення N_0 від деякого усередненого N_0' . Якщо $h = h_0$, з (1) одержимо $N_0 = N_0' \cdot \exp(b)$. Основною характеристикою зміни величини N з висотою є параметр a . Він різниться в різних пунктах і залежить від сезону року.

Рівність (1) подамо лінійною функцією:

$$y = ax + b.$$

де введемо нові змінні

$$y = -\ln \frac{N}{N_0}, \quad x = h - h_0 \quad (3)$$

які залежать від h і N . Величина y в (3) переважно додатна, що рівнозначно умові $N < N_0$. Параметри a і b обчислюємо як коефіцієнти лінійної регресії (2) за сукупністю точок (x_i, y_i) , обчислених за формулами (3) і значеннями (N_i, h_i) . Масив точок (N_i, h_i) , необхідних для визначення (x_i, y_i) , отримали з аерологічних даних в певному пункті протягом сезону (зима, весна, літо, осінь).

Підставивши a і b в рівність (1), одержимо усереднену криву зміни N з висотою в цьому пункті. Результати обчислень коефіцієнта a в трьох пунктах наведені в табл. 1, 2 відповідно для індексу заломлення сухої атмосфери N_c і вологої атмосфери N_v . Для обчислень використовувалися значення N_v в тропосфері, висота якої не перевищувала 13 – 14 км. Значення N_c брали до висоти 40 км. Для точної оцінки зміни N_c з висотою проміжок ділили на два інтервали висот: до висоти 11 км і від 11 км до 40 км. Коефіцієнти a зміни N_c в табл. 2 наведені окремо для цих двох інтервалів. Похибка визначення коефіцієнта a змінюється в межах від 0,01 до 0,001.

Таблиця 2

Значення коефіцієнта a зміни індексу заломлення сухої атмосфери N_c з висотою в п'яти пунктах для висот до 11 км і 11 – 40 км

Пори року	Зима		Весна		Літо		Осінь	
	0–11	11–40	0–11	11–40	0–11	11–40	0–11	11–40
Ужгород	0,115	0,157	0,109	0,157	0,105	0,156	0,106	0,157
Львів	0,113	0,157	0,108	0,158	0,107	0,157	0,110	0,157
Київ	0,114	0,157	0,110	0,157	0,104	0,157	0,109	0,157
Харків	0,113	0,157	0,112	0,156	0,107	0,156	0,111	0,157
Сімферополь	0,112	0,157	0,111	0,157	0,105	0,157	0,109	0,157

Таблиця 3

Значення коефіцієнта a зміни індексу заломлення вологої атмосфери N_v у тропосфері з висотою в п'яти пунктах

Пори року	Зима	Весна	Літо	Осінь
Ужгород	0,439	0,499	0,501	0,497
Львів	0,421	0,464	0,502	0,447
Київ	0,497	0,506	0,517	0,523
Харків	0,450	0,526	0,547	0,504
Сімферополь	0,404	0,424	0,517	0,444

Коефіцієнт регресії p залежності величини $y_c = -\ln(N_c/N_{c0})$ від $x = h - h_0$ на висотах до 11 км змінюється в межах від 0,997 до 0,999, на висотах від 11 до 40 км – в межах від 0,998 до 0,999. Коефіцієнт регресії p залежності величин $y_v = -\ln(N_v/N_{v0})$ від $x = h - h_0$ змінюється в межах від 0,94 до 0,98. Значення коефіцієнта a зміни індексу заломлення

сухої атмосфери N_c з висотою на проміжку 11 – 40 км мало змінюється протягом року (табл. 2) і в межах похибки однакова для п'яти пунктів. На висотах 0 – 11 км відчутні лише сезонні зміни. Усереднені для п'яти пунктів значення коефіцієнта a влітку менші, ніж взимку (див. табл. 4).

З (1) випливає, що при менших значеннях параметра a індекс заломлення більший для тих самих висот. Крива (1) зміни N_c від h для літнього сезону увігнутіша, що пояснюється більшими влітку значеннями індексу N_c на низьких висотах.

Таблиця 4

Усереднені значення коефіцієнта a для індексу N_c

Пори року	Зима	Весна	Літо	Осінь
Середній коефіцієнт a зміни N_c	0,113	0,110	0,106	0,109

Значення коефіцієнта a зміни індексу заломлення вологої атмосфери N_b з висотою (табл. 5) різне в п'яти пунктах. Найменше воно в Сімферополі, найбільше – в Києві.

Переходити від значень a_k для Києва до значень a для Ужгорода, Львова, Харкова і Сімферополя можна за формулою: $a = k a_k$, де середні значення коефіцієнтів k для Ужгорода, Львова, Харкова і Сімферополя:

$$k_{\text{Сімфер}} = 0,875 \pm 0,068; \quad k_{\text{Львів}} = 0,898 \pm 0,048; \quad k_{\text{Ужг}} = 0,947 \pm 0,044; \\ k_{\text{Харків}} = 0,994 \pm 0,051.$$

Сезонні зміни усереднених значень коефіцієнта a для вологої атмосфери протилежні до сезонних змін значень a для сухої атмосфери (табл. 5).

Таблиця 5

Сезонні зміни усереднених значень коефіцієнта a для індексу N_b

Пори року	Зима	Весна	Літо	Осінь
Середній коефіцієнт a зміни N_b	0,442	0,484	0,517	0,483

Збільшення коефіцієнта a зміни N_b в літній період зумовлене зменшенням вологості на низьких висотах влітку.

Для побудови усереднених залежностей N від h за (1) крім a , необхідні ще три параметри: h_0 , N_0 , b . Замість них можна використати лише один параметр N_0'' , якщо співвідношення (1) привести до вигляду:

$$N = N_0'' \exp(-ah), \quad (4)$$

де параметр $N_0'' = N_0 \cdot \exp(ah_0 - b)$. Значення параметра N_0'' , а також середні квадратичні відхилення σ точок $y_i = -\ln(N_i/N_0)$, отриманих з аерологічних даних, від лінії регресії (2) наводимо в табл. 6 і 7 відповідно для індексу заломлення сухої атмосфери N_c і вологої атмосфери N_b .

Таблиця 6

Значення коефіцієнта N_0'' зміни індексу заломлення сухої атмосфери N_c з висотою і середнє квадратичне відхилення σ значень N_c від кривої зміни індексу в 5 пунктах для висот до 11 км і 11 – 40 км

Пори року		Зима		Весна		Літо		Осінь	
Висоти, км		0-11	11-40	0-11	11-40	0-11	11-40	0-11	11-40
Ужго- род	N_0''	290,3	430,6	279,7	444,4	269,2	466,7	272,4	464,4
	σ	3,4	1,3	4,1	1,0	2,1	0,8	3,2	0,7
Львів	N_0''	285	448	276	486	272	458	279	457
	σ	3	0	7	5	3	1	3	0
Київ	N_0''	289	435	281	440	268	469	280	462
	σ	4	1	5	1	3	1	5	1
Хар- ків	N_0''	289	444	285	438	271	454	284	453
	σ	4	1	5	1	4	1	6	1
Сім- феро- поль	N_0''	285	458	281	459	266	458	278	457
	σ	3	1	4	0	3	0	4	1

Таблиця 7

Значення коефіцієнта N_0'' зміни індексу заломлення вологої атмосфери N_e з висотою і середнє квадратичне відхилення σ значень N_e від кривої зміни індексу в 5 пунктах

Пункти \ Пори року	Зима		Весна		Літо		Осінь	
	N_0''	σ	N_0''	σ	N_0''	σ	N_0''	σ
Ужгород	31,9	4,3	55,4	8,3	102,8	11,1	71,2	8,9
Львів	34,7	3,8	52,6	5,9	107,5	11,4	48,7	7,7
Київ	38,3	5,5	54,2	8,0	110,6	13,2	59,0	9,9
Харків	34,1	4,5	47,0	7,7	99,9	8,8	42,5	8,4
Сімферополь	34,4	3,8	41,3	6,8	104,4	8,9	50,0	7,6

У табл. 8–12 наведено параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у пунктах відповідно Київ, Львів, Ужгород Харків та Сімферополь по сезонах в нижній (до 1,5 км), середній (1,5 – 6,5 км) і верхній (6,5 – 11,5 км) тропосфері за даними вимірювань в 1999 році: середні значення коефіцієнтів a , N'' експоненціальної залежності (4), коефіцієнти регресії p лінійної залежності (2), середні квадратичні відхилення значень N від кривої (4), кількість значень n індексу заломлення, що використовували в розрахунках, мінімальні N_{min} , середні N_{sr} і максимальні N_{max} значення індексу заломлення.

Таблиця 8

**Параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у пункті Київ
в нижній, середній і верхній тропосфері за даними вимірювань в 1999 р.**

Сезон	h , км	a	N''	P	σ	n	N_{min}	N_{sr}	N_{max}
Зима	до 1,5	0,127	315	0,955	5	377	250	289	316
	1,5-6,5	0,121	309	0,996	4	518	140	199	269
	6,5-11,5	0,132	341	0,985	3	535	68	105	145
Весна	до 1,5	0,132	319	0,904	8	425	248	292	331
	1,5-6,5	0,122	310	0,986	6	587	140	201	277
	6,5-11,5	0,129	333	0,993	2	476	70	104	143
Літо	до 1,5	0,136	342	0,808	13	421	258	314	364
	1,5-6,5	0,136	338	0,988	7	751	140	205	297
	6,5-11,5	0,118	307	0,998	1	489	75	104	144
Осінь	до 1,5	0,148	329	0,908	9	345	248	299	341
	1,5-6,5	0,123	313	0,988	6	479	140	204	281
	6,5-11,5	0,123	318	0,991	2	361	69	104	153

У табл. 9–12 подано результати досліджень внеску різних шарів атмосфери у формування атмосферної поправки. На основі даних аерологічного зондування атмосфери знайдено локальні коефіцієнти для залежностей зміни індексів показника заломлення сухої N_c та вологої N_v атмосфери з висотою у досліджуваних пунктах. Знайдено параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у вищезазначених пунктах у нижній, середній і верхній тропосфері за даними вимірювань протягом року.

Таблиця 9

**Параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у пункті Львів
в нижній, середній і верхній тропосфері за даними вимірювань в 1999 р.**

Пори року	h , км	a	N''	P	σ	n	N_{min}	N_{sr}	N_{max}
Зима	до 1,5	0,123	313	0,971	3	91	258	283	315
	1,5-6,5	0,123	312	0,996	3	160	140	195	260
	6,5-11,5	0,124	316	0,998	1	315	75	105	142
Весна	до 1,5	0,141	326	0,890	8	75	251	288	323
	1,5-6,5	0,120	307	0,916	14	168	129	200	272
	6,5-11,5	0,121	314	0,986	2	280	71	104	140
Літо	до 1,5	0,149	348	0,827	11	115	266	306	362
	1,5-6,5	0,136	340	0,977	11	267	143	208	398
	6,5-11,5	0,123	317	0,998	1	469	75	101	144
Осінь	до 1,5	0,138	327	0,832	11	100	256	293	334
	1,5-6,5	0,127	317	0,993	5	210	143	204	277
	6,5-11,5	0,123	319	0,997	1	379	75	102	142

Таблиця 10

Параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у пункті Ужгород в нижній, середній і верхній тропосфері за даними вимірювань в 1999 р.

Пори року	h , км	a	N''	ρ	σ	n	N_{min}	N_{sr}	N_{max}
Зима	до 1,5	0,120	313	0,978	2	302	258	289	316
	1,5-6,5	0,123	313	0,997	3	445	141	204	264
	6,5-11,5	0,132	340	0,983	2	505	67	101	143
Весна	до 1,5	0,131	318	0,902	9	446	252	292	339
	1,5-6,5	0,125	316	0,993	5	704	140	202	278
	6,5-11,5	0,127	328	0,993	2	603	71	104	143
Літо	до 1,5	0,144	344	0,912	9	368	257	314	362
	1,5-6,5	0,134	334	0,988	6	671	140	204	297
	6,5-11,5	0,119	309	0,975	6	390	73	105	207
Осінь	до 1,5	0,162	334	0,895	11	139	244	301	348
	1,5-6,5	0,124	316	0,985	7	235	140	202	281
	6,5-11,5	0,120	310	0,996	1	131	72	104	141

Таблиця 11

Параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у пункті Харків в нижній, середній і верхній тропосфері за даними вимірювань в 1999 р.

Пори року	h , км	a	N''	ρ	σ	n	N_{min}	N_{sr}	N_{max}
Зима	до 1,5	0,133	317	0,974	4	239	252	290	318
	1,5-6,5	0,120	311	0,995	3	390	139	193	263
	6,5-11,5	0,126	327	0,991	2	588	68	106	147
Весна	до 1,5	0,131	319	0,916	8	249	256	294	337
	1,5-6,5	0,123	316	0,997	3	397	141	196	271
	6,5-11,5	0,128	330	0,994	2	452	64	106	143
Літо	до 1,5	0,130	345	0,859	12	158	270	317	364
	1,5-6,5	0,139	338	0,987	7	437	137	187	291
	6,5-11,5	0,121	307	0,995	2	566	75	105	146
Осінь	до 1,5	0,135	321	0,937	7	466	250	295	343
	1,5-6,5	0,122	311	0,993	5	731	138	199	272
	6,5-11,5	0,124	319	0,993	2	630	69	105	145

Таблиця 12

Параметри зміни сумарного індексу заломлення N з висотою у пункті Сімферополь в нижній, середній і верхній тропосфері за даними вимірювань в 1999 р.

Пори року	h , км	a	N''	ρ	σ	n	N_{min}	N_{sr}	N_{max}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зима	до 1,5	0,126	317	0,922	7	172	249	287	321

Продовження табл. 12

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1,5-6,5	0,120	310	0,993	5	361	140	199	273
	6,5-11,5	0,123	320	0,997	1	1249	75	106	145
Весна	до 1,5	0,134	322	0,849	10	216	249	291	337
	1,5-6,5	0,122	313	0,991	6	400	143	199	281
	6,5-11,5	0,124	322	0,997	1	1466	75	105	143
Літо	до 1,5	0,144	346	0,805	13	307	257	314	358
	1,5-6,5	0,135	335	0,984	8	515	139	208	302
	6,5-11,5	0,121	313	0,997	1	1222	75	99	143
Осінь	до 1,5	0,144	330	0,860	10	365	250	297	344
	1,5-6,5	0,125	314	0,988	7	655	137	199	281
	6,5-11,5	0,123	318	0,995	2	2157	75	104	144

Висновки

Для підвищення точності розв'язання задач космічної геодезії в роботі досліджено фізичний стан атмосфери у п'яти пунктах регіону України (Київ, Львів, Ужгород, Харків, Сімферополь). Запропоновано емпіричні залежності зміни індексів показника заломлення сухої N_c та вологої N_b атмосфери з висотою у досліджуваних пунктах. Щоб визначити вплив атмосфери на віддалемірні спостереження ШСЗ у пунктах Київ, Львів Ужгород, Харків, Сімферополь, ми рекомендуємо застосовувати експоненціальні моделі зміни з висотою N_c , N_b , N із визначеними нами коефіцієнтами.

Література

1. Mendes V.B. Modelling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick, Fredericton // Technical report. – 1999. – N 199.
2. Паляниця Б.Б. Методи визначення атмосферної поправки у супутникові виміри в оптичному та радіодіапазонах. Дисертація на здобуття наук. ступ. канд. тех. н. – Львів, 2004. – 149 с.
3. Каблак Н.И., Климик В.У., Швалагин И.В., Каблак У.И. Приземные слои атмосферы и точность наблюдений искусственных спутников Земли // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів: НУЛП. – 2005. – С. 123–127.

Нестабильность атмосферы и ее влияние на наблюдения небесных тел

Н. Каблак

Исследовано физическое состояние атмосферы по материалам зондирований, которые осуществляли в пяти пунктах Украины. Предложено эмпирическую зависимость изменения индекса рефракции сухой и влажной атмосферы.

Instability of atmosphere and its influence on observations of celestial bodies

N. Kablak

The physical condition of atmosphere on materials of the explorations which have been carried out in five points of locale Ukraine is researched. The empirical-formula dependences of change of an index of a refraction of dry and wet atmosphere are offered.