

## **ДО ПИТАННЯ ТРИВАЛОСТІ GPS-ВИМІРІВ ПРИ ПОБУДОВІ ДЕРЖАВНИХ МЕРЕЖ 1-ГО ТА 2-ГО КЛАСІВ**

© Третяк К.Р., Шушкова Т.М., 2001

**За результатами спостережень постійних GPS-станцій і експериментальних GPS-вимірювань визначені функціональні залежності точності вимірювання компонент векторів методом GPS від тривалості спостережень і довжини векторів. Отримані залежності відповідають векторам довжини яких не перевищують меж від 2 до 50 км. Представлені залежності можуть бути використані при розробці оптимальної з економічної точки зору методики побудови державних мереж 1-го і 2-го класу.**

**By the results of GPS permanent stations observations and GPS experimental measurements were determined the functional dependences of measurement accuracy of vectors components in dependence from duration of observations and vectors length by means of GPS method. The determined dependences correspond to vectors, lengths of which do not exceed the limits from 2 up to 50 km. The submitted dependences can be used at the development of optimum technique of the construction of state networks of the 1-st and 2-nd classes.**

Побудова та модернізація сучасної державної мережі України вимагає розробки оптимальних, з економічної точки зору, GPS-технологій. У зв'язку з цим є актуальною проблема попереднього розрахунку тривалості GPS-вимірювань на базах різної довжини із заданою точністю визначення компонент векторів. Основними факторами, які впливають на точність GPS-вимірювань, є:

- 1) тривалість спостережень;
- 2) довжина вектора;
- 3) іоносферна та тропосферна рефракції;
- 4) геометрична конфігурація сузір'я супутників.

Найбільш суттєвий вплив на точність вимірювань при тривалих спостереженнях мають перші два фактори. У роботі [1] на основі експериментальних вимірів отримано такі залежності для векторів у межах від 2 до 10 км і тривалості спостережень у межах від 10 хв до 2 год. Так точність визначення довжини вектора подана такою залежністю

$$m_s = (3,90 \pm 2,50) + (2,40 \pm 0,56)L - (0,53 \pm 0,33)L \cdot t, \quad (1)$$

де  $t$  – тривалість спостережень у год;  $L$  – довжина вектора у км; у дужках наведені емпірично визначенні значення коефіцієнтів і точність їх визначення. При обчисленні  $m_s$  у виразі (1) нехтуємо розмірностями величин і отримуємо остаточний результат у мм. За виразом (1) побудовано відповідну номограму апріорного визначення точності вимірювання довжини вектора.

Для точності визначення перевищень отримано таку залежність

$$m_h = (2,59 \pm 0,34)L - (0,50 \pm 0,37) \cdot L \cdot t. \quad (2)$$

Розрахунок виконується аналогічно, як і для виразу (1). За виразом (2) побудовано номограму апріорного визначення точності визначення перевищень.

Оскільки, згідно з [2] довжина векторів у мережах 2-го та 3-го класів може коливатись у межах від 2 до 12 км, то спектр представлених на номограмах векторів практично охоплює всі можливі за довжиною вектори у мережах включно до 2-го класу.

Для того, щоб встановити аналогічні функціональні залежності для векторів завдовжки у межах (10 – 50 км), які домінують у мережах 1-го класу, необхідно провести експериментальні дослідження на відповідних еталонних полігонах. Однак за відсутністю таких полігонів на території України ми скористались іншим шляхом.

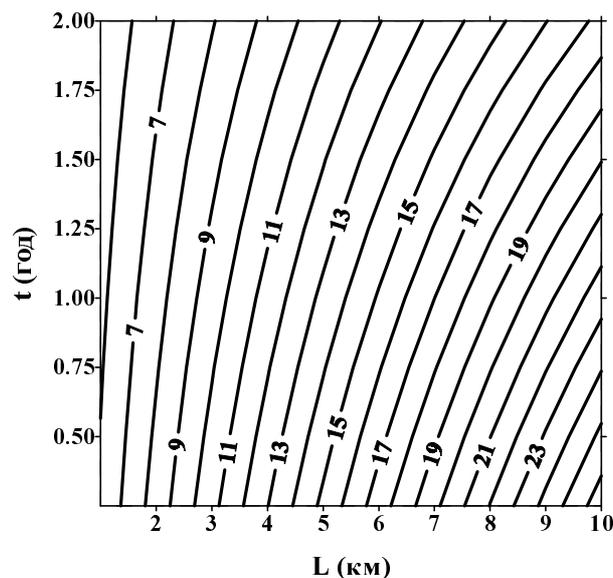


Рис. 1. Номограма визначення точності вимірювання довжини вектора від тривалості спостережень і його довжини (для векторів завдовжки 2 – 10 км)

**Перманентні GPS-станції використані у дослідженні точності векторів  
завдовжки 10 – 50 км\***

№ п/п	Повна назва пункту і його місце розташування	Скорочена назва пункту	Організація (власник станції)	B, °	L, °	H, м
1	Longdon Yard, Irwindale, California, USA.	LONG	SCIGN	34,11	-118	74,29
2	Azusa, Azusa, California, USA.	AZU1	SCIGN	34,13	-117,9	144,78
3	Whiteman Airport, Pacoima, California, USA.	WMAP	SCIGN	34,26	-118,41	268,12
4	SCU Dominguez, Carson, California, USA.	CSDH	SCIGN	33,86	-118,26	-9,16
5	SCU Northridge, Northridge, California, USA.	CSN1	SCIGN	34,25	-118,52	261,53
6	Occidental College, Eagle Rock, California, USA	OXYC	SCIGN	34,13	-118,21	209,83
7	Point Blunt 1, Point Blunt, California, USA.	PBL1	BARD	37,85	-122,42	-8,06
8	Chabot, San Leandro, California, USA.	CHAB	BARD	37,72	-122,12	213,98
9	Beatty, Nye County, Nevada, USA.	BEAT	BARGN	37,04	-116,62	1465,34
10	Little Skull, Nye County, Nevada, USA.	LITT	BARGN	36,75	-116,31	1041,13
11	Bullfrog, Nye County, Nevada, USA.	BULL	BARGN	36,92	-116,87	1411,95
12	Chloride, Beatty, Nevada, USA.	CHLO	BARGN	36,75	-116,77	892,00
13	Coon, Magma, Utah, USA.	COON	BARGN	40,65	-112,12	1700,00
14	Wasatch, Red Butte, Salt Lake City, Utah, USA.	RBUT	EBRY	40,78	-111,81	1667,73
15	Horn Point Enviromental Lab., Cambridge, Maryland, USA.	HNPT	IGS	38,59	-76,13	-27,48
16	Solomons Island, Maryland, USA.	SOL1	IGS	38,32	-76,45	-18,07
17	College Observatory, Alaska, USA.	CLGO	AKDA	64,87	-147,86	260,00
18	Gilmore Creek Observatory, Fairbanks, Alaska, USA.	FAIR	IGS-C	64,98	-147,5	319,01

- \*1. BARD – Bay Area Deformation Array – USGS/UC Berkeley  
 2. SCIGN – Southern California Integrated GPS Network  
 3. IGS – International GPS Service for Geodynamics  
 4. BARGN – Bay Area Regional Deformation GPS Network  
 5. EBRY – Eastern Basin Range Yellowstone  
 6. AKDA – Alaska Deformation Array

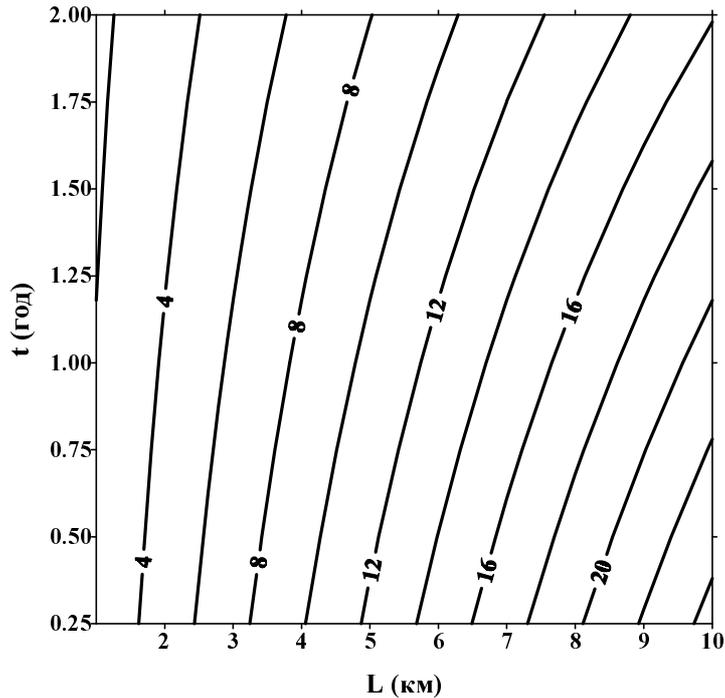


Рис. 2. Номограма визначення точності перевищень від тривалості спостережень і довжини вектора (для векторів завдовжки 2 – 10 км)

Результати спостережень оброблялись в пакеті програми SKI на ПК. Файли результатів спостережень імпортувались у пакет SKI з P-кодом, але перед тим у проект вводились точні ефемериди супутників, запозичені із WEB-сторінці SOPAC . Перед обробкою вибраних векторів вводились такі параметри :

- модель іоносфери – стандартна;
- модель тропосфери – Хопфілда;
- мінімальна висота супутників над горизонтом –  $15^\circ$ .

Для встановлення залежності між точністю визначення компонент векторів і тривалістю спостережень, кожна 12-та годинна сесія вимірів була розділена на 12 інтервалів:

- 1 інтервал – 30 хв з початку сесії;
- 2 інтервал – 30 хв в кінці сесії;
- 3 інтервал – 60 хв з початку сесії;
- 4 інтервал – 60 хв в кінці сесії;
- 5 інтервал – 120 хв з початку сесії;
- 6 інтервал – 120 хв в кінці сесії;
- 7 інтервал – 240 хв з початку сесії;
- 8 інтервал – 240 хв в кінці сесії;
- 9 інтервал – 360 хв з початку сесії;
- 10 інтервал – 360 хв в кінці сесії;
- 11 інтервал – 720 хв з початку сесії;
- 12 інтервал – 720 хв в кінці сесії.

**Назви векторів та істинні координати перманентних станцій**

№ п/п	Назва пунктів	Наближена довжина вектора L, км.	Геоцентричні прямокутні координати у системі ITRF - 97 (м)		
			X	Y	Z
1	AZU1	10	-2472979,28	-4671338,17	3558107,72
	LONG		-2482077,49	-4667439,15	3556771,62
2	CLGO	20	-2299609,38	-1444753,13	5751925,84
	FAIR		-2281621,51	-1453595,80	5756961,84
3	BULL	20	-2308136,88	-4555161,30	3810897,66
	CHLO		-2304646,7	-4569254,46	3795405,64
4	COON	30	-1825218,74	-4490247,45	4134278,90
	RBUT		-1797278,79	-4491525,90	4145132,59
5	CSDH	30	-2510006,47	-4670036,59	3533692,73
	OXYC		-2498227,88	-4657747,94	3558400,72
6	CHAB	30	-2685744,91	-4278240,82	3881399,49
	PBL1		-2703286,44	-4256586,11	3892573,45
7	BEAT	40	-2284553,37	-4557948,98	3821772,33
	LITT		-2268192,49	-4587678,06	3795464,71
8	CHLO	40	-2304646,7	-4569254,46	3795405,64
	LITT		-2268192,49	-4587678,06	3795464,71
9	HNPT	40	1196626,46	-4846358,53	3956723,11
	SOL1		1173608,84	-4871160,87	3933263,09
10	AZU1	50	-2472979,28	-4671338,17	3558107,72
	WMAP		-2511185,62	-4641573,57	3570417,73
11	CSDH	50	-2510006,47	-4670036,59	3533692,73
	CSN1		-2520225,87	-4637082,42	3569875,37

Для кожного вектора виконувались визначення для денних та нічних інтервалів спостережень тривалістю (0,5 , 1, 2, 3, 6, 12 год.=). За результатами обробки спостережень визначено виміряні довжини векторів і похибки їх вимірювання. Загалом виконано 120 визначень векторів для різних інтервалів тривалості спостережень. Отримані результати порівнювались з компонентами векторів, які визначені за координатами, наведеними у табл. 2. Ці координати отримані опрацюванням річних рядів безперервних спостережень. Точність координат пунктів, наведених у табл. 2 є у межах 2 – 3 мм. Крім цього, ці координати є редуковані за рух тектонічних плит на епоху вимірів.

Для встановлення функціональної залежності між точністю вимірювань довжин векторів та тривалістю спостережень і їх довжинами, було за результатами обробки побудовано 3D – поверхню похибок вимірів (рис. 3). Як видно при мінімальній тривалості спостережень і зростанні довжин векторів гладкість поверхні суттєво порушується, що свідчить про низьку достовірність отриманих результатів при таких параметрах.

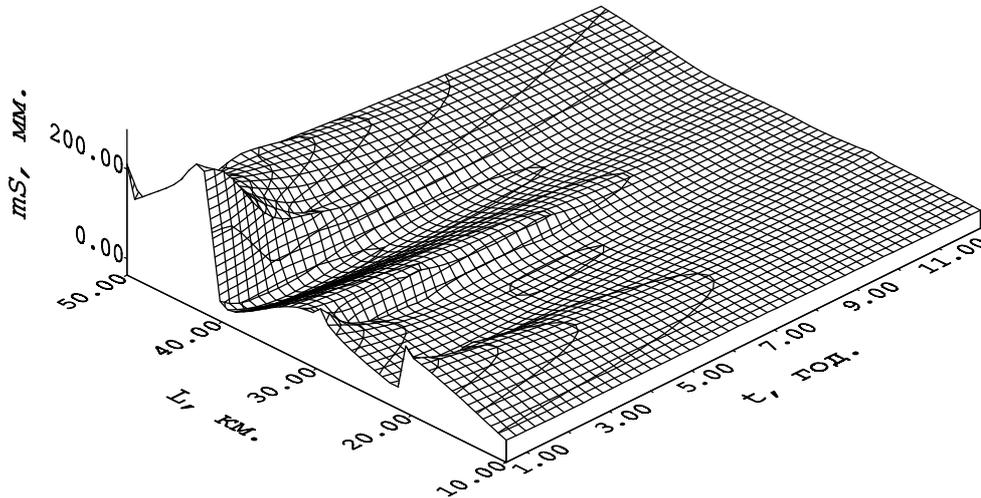


Рис. 3. 3D – поверхня залежності  $m_s$  від  $L$  і  $t$  для векторів завдовжки 10 – 50 км

Встановлено, що похибки вимірювання довжин векторів залежно від довжини вектора змінюється за експоненціальним законом, а від тривалості спостережень – за кривою другого порядку. Поверхню, яка буде найкраще описувати похибки виміру довжин векторів, можна задати у вигляді експоненціальної функції у такому вигляді:

$$m = e^{\left(\frac{a}{\Delta t} + b\right) \cdot \sqrt{L}}, \quad (3)$$

де  $a$  та  $b$  – невідомі коефіцієнти, які визначаються із розв'язання параметричних рівнянь отриманих за результатами вимірів.

За результатами обробки складено 120 параметричних рівнянь. Після розв'язання за способом найменших квадратів одержаної системи рівнянь визначено невідомі коефіцієнти і їх похибки. Встановлена функціональна залежність подається таким виразом

$$m_s = e^{\left(\frac{(0,1413 \pm 0,0205)}{t} + (0,5675 \pm 0,0198)\right) \cdot \sqrt{L}}. \quad (4)$$

У дужках наведені знайдені значення коефіцієнтів і їх похибки. Точність визначення  $m_s$  дорівнює 16 мм. Обчислення за виразом (4) виконуються аналогічно, як у попередніх формулах. Як видно з результатів розв'язання рівнянь, похибки знайдених коефіцієнтів є суттєво нижчими від самих їх значень. За виразом (4) побудовано номограму (рис. 4).

В мережі Інтернет на WEB-сторінці SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) були запозичені обсерваційні і навігаційні файли GPS-спостережень, виконаних на пунктах перманентних станцій і наведених у табл. 1. Ця інформація була вибрана на 01.07.2000 р. Станції були вибрані так, щоб між ними утворювався спектр векторів, довжина яких приблизно дорівнювала 10, 20, 30, 40 та 50 км. Інформація про вибрані вектори наведена у табл. 2.

З аналізу (рис. 5) встановлено, що поверхня, яка буде найкраще описувати похибки виміру перевищень, можна задати у вигляді експоненціальної функції у такому вигляді:

$$m_h = e^{(\frac{a}{t}+b)\cdot\sqrt{L}+c}, \quad (5)$$

де  $a, b, c$  – невідомі коефіцієнти, які визначаються із розв'язанням параметричних рівнянь, отриманих за результатами вимірів.

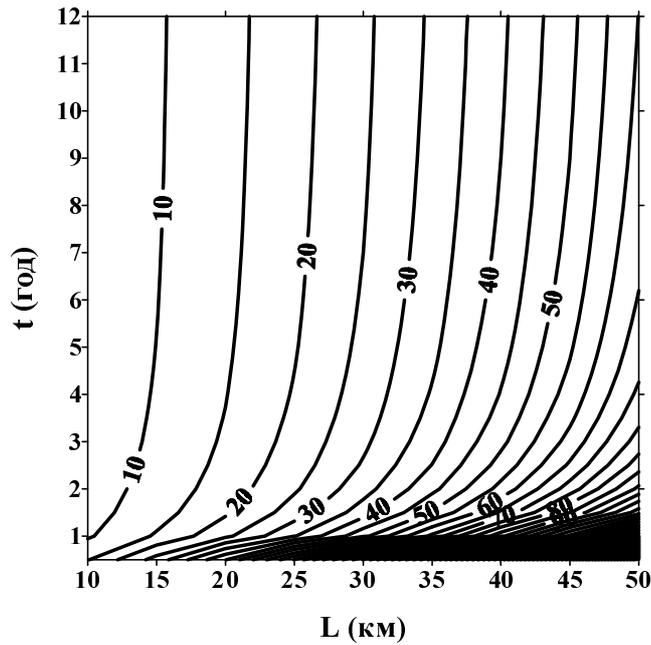


Рис. 4. Номограма визначення точності вимірювання довжини вектора від тривалості спостережень і його довжини (для векторів завдовжки 10 – 50 км)

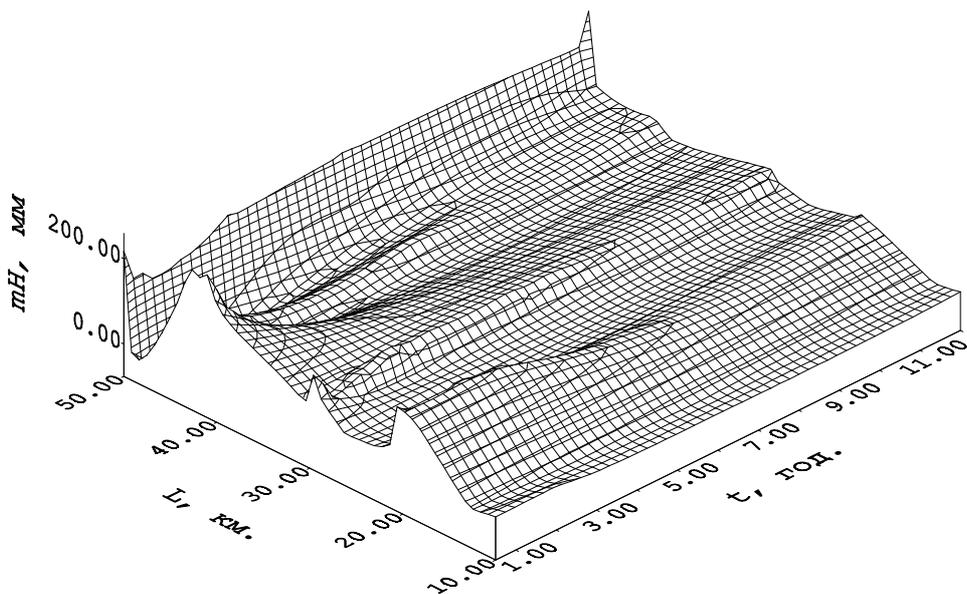


Рис. 5. 3D – поверхня залежності  $m_h$  від  $L$  і  $t$  для векторів завдовжки 10 – 50 км

Розв'язавши систему, складену із 120 рівнянь, визначено шукані коефіцієнти і їх похибки, які наведені у встановленій функції (6) залежності похибки перевищень від довжини вектора та тривалості спостережень

$$m_h = e \left( \frac{(0,0541 \pm 0,0262)}{t} + (0,3922 \pm 0,0806) \right) \cdot \sqrt{L} + (1,8720 \pm 0,4332) \quad (6)$$

Точність визначення  $m_h$  дорівнює 17 мм. Як видно з результатів розв'язання системи рівнянь, похибки коефіцієнтів є суттєво нижчими, ніж значення коефіцієнтів, що свідчить про достовірно встановлену функціональну залежність. За формулою (6) побудовано відповідну номограму (рис. 6).

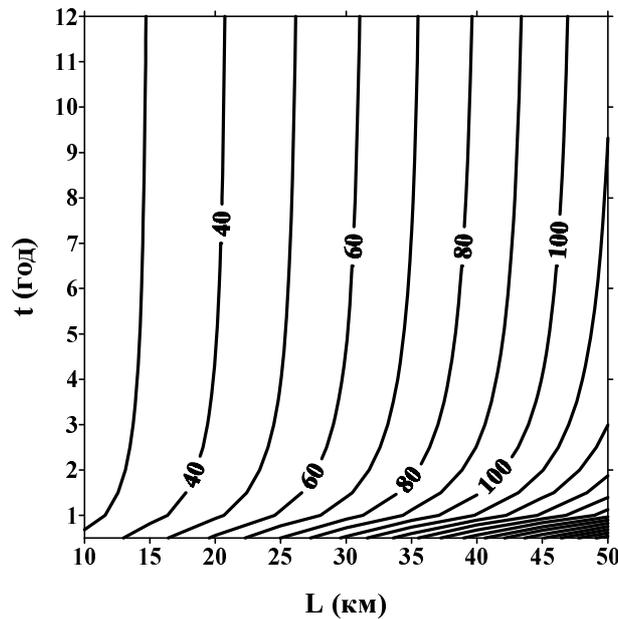


Рис. 6. Номограма визначення точності вимірювання перевищень від тривалості спостережень і довжини вектора (для векторів завдовжки 10 – 50 км)

Аналізуючи отримані номограми у роботі [1] і за результатами обробки даних перманентних станцій, слід зауважити збіжність отриманих результатів у межах точності поданих номограм. Результати апріорного розрахунку наведені у табл. 3 для вектора завдовжки 10 км і при тривалості спостережень 2 год.

Таблиця 3

**Результати апріорного розрахунку точності вимірювання складових вектора завдовжки 10 км, при тривалості спостережень 2 год**

Тип номограми	$m_S$ , мм	Похибка визначення $m_S$ , мм	$m_h$ , мм	Похибка визначення $m_h$ , мм
(рис. 1)	18	8		
(рис. 4)	8	16		
(рис. 2)			16	9
(рис. 6)			24	17

Як видно з табл. 3, величина  $m_s$  є значно меншою за номограмою, зображеною на рис.1, ніж за номограмою на рис. 4. Це можна пояснити, тим що використані результати вимірів у роботі [1] були проведені у 1998 р. , а результати перманентних станцій відповідали епосі 2000 р. Відповідно результати 1998 р. були обтяжені спотвореннями селективного доступу (SA), який був відключений у травні 1999 р. Що стосується величини  $m_h$ , то розбіжність між номограмами, наведеними на рис. 2 та рис. 6, пояснюється ненадійним визначенням  $m_h$  на номограмі рис. 6 при короткій тривалості спостережень. Крім цього, слід зауважити, що максимально ефективна тривалість GPS-спостережень при вимірюванні векторів із довжинами у межах 10 – 50 км є від 3 до 6 год і ця величина зростає пропорційно довжині вектора. Подальше видовження часу спостережень не дає ефективного підвищення точності вимірів.

На закінчення необхідно зазначити, що отримані функціональні залежності між точністю вимірювання компонент вектора методом GPS і його довжиною та тривалістю спостережень може бути використано при оптимальному проектуванні державних геодезичних побудов і раціональному використанні парку GPS-приймачів.

*1. Третьяк К., Черепанов Е. Експериментальне дослідження точності GPS-системи SR-9500 LEICA / Зб. наук. пр. науково-технічної конференції присвяченої святу працівників геології, геодезії та картографії. Львів, 1999. 2. Основні положення створення державної мережі України: Постанова Кабінету Міністрів України від 8 червня 1998 р. – К., 1998. – № 844.*