

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ GPS-СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПРИ ЗАКРИТИХ ЧАСТИНАХ ГОРИЗОНТУ

© Черняга П., Янчук О., 2009

Исследована возможность использования GPS-наблюдений в условиях частично закрытого горизонта. Проанализирована точность определения базовой линии в зависимости от минимальной высоты спутников над горизонтом и интервалом спутниковых наблюдений.

Possibility of the use of GPS-observations with the partly closed horizon is investigated. Accuracy of baseline vector determination in dependence of elevation mask and period of satellite observations is analyzed.

Вступ. В даний час при вирішенні задач геодинаміки все частіше використовують глобальну систему позиціонування GPS. Її потенційна точність визначення різниці координат між двома точками оцінюється на рівні 2 мм [5]. Таку точність можуть забезпечити перманентні станції, спостереження яких використовуються для глобального та регіонального моніторингу. Дані таких спостережень використовуються міжнародною службою геодезії для уточнення загальноземних систем координат, виявлення рухів материків і тектонічних плит тощо [1, 7, 8]. Крім того значного поширення набуває використання супутникових технологій і на локальних геодинамічних полігонах [2, 4]. В залежності від конкретних умов території та швидкості просторових рухів земної поверхні і споруд на ній вимоги до точності спостережень, можуть становити від десятих долей міліметра до десятків сантиметрів. Відповідно до цього необхідно вибирати методику спостережень і прилади. В даний час система GPS використовується в основному при визначенні координат пунктів для різних задач геодезії, земельного кадастру, моніторингу земель. При цьому приймачі для супутникових спостережень, як правило, встановлюють на відкритій місцевості. Однак, не слід забувати, що значна частина таких визначень виконується на забудованих територіях. На них є значна кількість перешкод для супутникових спостережень, тому в таких випадках необхідно поєднувати їх з класичними методами.

Постановка завдання. В даній статті авторами зроблена спроба проаналізувати можливість використання GPS-спостережень для моніторингу територій при закритій видимості на значні частини неба (в тому числі і забудованих). Метою роботи є дослідження можливості заміни без втрати точності традиційних методів геодезичного моніторингу – супутниковими. В роботі не враховуються похибки за багатошляховість поширення сигналу і рефракцію, які виникають на забудованих територіях, а аналізується лише можливість видимості необхідної кількості супутників та точність розв'язку. Подібних задач в літературі автори ще не зустрічали. Це перша спроба такого аналізу і безумовно вона потребує подальших досліджень, хоча можна стверджувати, що при певних умовах можливе використання супутникових методів в інженерній геодезії на забудованих територіях.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження використовувались файли добових спостережень на дві перманентні станції P695 та P696, розташованих на широті 46°, отриманих з web-сторінки SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center). Відстань між станціями, визначена на основі координат останнього тижня спостережень, становить 1081,974 м. Спостереження на них виконуються двочастотними приймачами з дискретністю 15 секунд. Кут відсічки на обох станціях 0°. На захід від станції P696 розташована перешкода, з кутом підвищення до 20° (рис. 1).

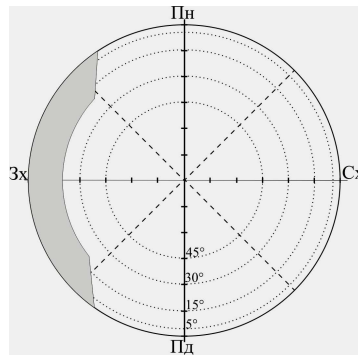


Рис. 1. Абрис перешок на станції P696

Суть дослідження полягає аналізі точності визначення базової лінії при закритій частині горизонту в залежності від кута відсічки на приймачі (або під час обробки). При цьому з файлу добових спостережень формату RINEX усувались спостереження на супутники, які знаходяться з певної сторони світу (почергово з півночі, півдня, сходу і заходу). На рис. 2 показане змодельоване розташування перешок для видимості горизонту. Для усунення певних спостережень супутників використовувалась програма Remover, за написання якої автори висловлюють вдячність інженеру з геоінформатики (ОКР – магістр) Лагоднюку Р.А. Після цього виконувалась обробка базової лінії в Trimble Geomatics Office при кутах відсічки 0°, 5°, 15°, 30°, 45°. Обробка виконувалась за годинними та 30-ти хвилинними інтервалами супутникових спостережень.

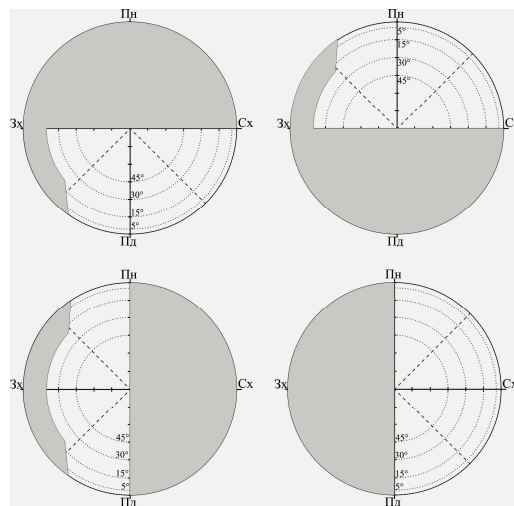


Рис. 2. Змодельоване розташування перешок

Для перевірки надійності визначення базової лінії використовувались стандартні характеристики оцінки точності, а саме: відношення (ratio), коефіцієнт дисперсії (reference variance) та середньоквадратична похибка СКП (RMS). Рішення вважалось успішним, якщо відношення було більше 3, коефіцієнт дисперсії менше 5 та СКП менше 0,02 м. Якщо хоча б одна із перерахованих умов не виконувалась – вважалось, що рішення отримане з недостатньою точністю. Результати дослідження можливості отримання надійного рішення наведено у табл. 1, а графічне представлення – на рис. 3. Позначення “не вирішена” означає, що кількість супутників в межах видимості була менше 4.

Таблиця 1
Можливість визначення базової лінії при частково закритому горизонті, %

Т від січ	Умова надійного визначення	Горизонт закритий зі сторін світу			
		північної	південної	західної	східної

		інтервали спостереження, хв							
		60	30	60	30	60	30	60	30
0°	задовільна	50,0	54,2	62,5	60,4	50,0	56,3	50,0	45,8
	недостатня	45,8	37,5	37,5	31,2	50,0	37,6	33,3	31,3
	не вирішена	4,2	8,3	0,0	8,3	0,0	6,3	16,7	22,9
5°	задовільна	66,7	66,7	70,8	64,6	70,8	62,5	50,0	45,8
	недостатня	29,1	22,9	29,2	22,9	25,0	25,1	29,2	27,1
	не вирішена	4,2	10,4	0,0	12,5	4,2	12,5	20,8	27,1
15°	задовільна	79,2	75,0	91,7	64,6	79,2	60,4	50,0	45,8
	недостатня	8,3	2,1	4,2	4,2	0,0	0,0	25,0	16,7
	не вирішена	12,5	22,9	4,2	31,3	20,8	39,6	25,0	37,5
30°	задовільна	45,8	25,0	58,3	35,4	41,7	20,8	50,0	33,3
	недостатня	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	4,2	2,1
	не вирішена	54,2	75,0	41,7	64,6	54,2	79,2	45,8	64,6
45°	задовільна	12,5	8,3	8,3	2,1	4,2	2,1	8,3	6,3
	недостатня	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	не вирішена	87,5	91,7	91,7	97,9	95,8	97,9	91,7	93,8

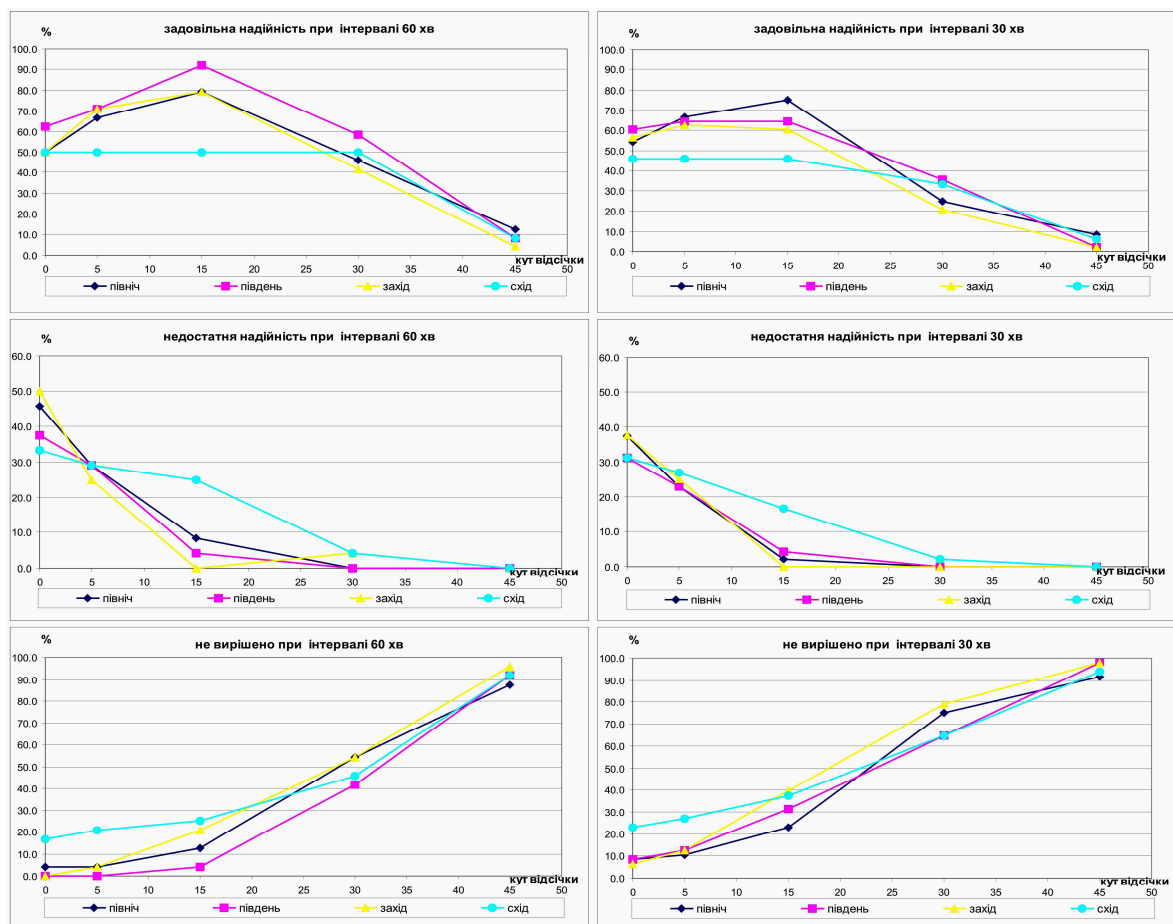


Рис. 3. Можливість визначення базової лінії при частково закритому горизонті

Як видно з наведених результатів, при кутах відсічки 0° та 5° не вирішеними залишаються практично менше 10% результатів. Однак якість цих рішень залишається під питанням, оскільки 30-40% з них має недостатню надійну оцінку точності. З кутом відсічки 15° ймовірність задовільного вирішення становить – 75-90% при інтервалі спостережень 60 хв. та 60-75% при інтервалі – 30 хв. Деяка відмінність результатів спостерігається при горизонті закритому зі сходу.

1).

рис. 3.

Точність отриманих розв'язків за осями координат, %

кут відсічки	точність рішення, см	Горизонт закритий зі сторін світу																							
		північної			південної			західної			східної														
		інтервали спостереження, хв																							
		60			30			60			30			60			30			60			30		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z		
0°	<0,5	33,4	33,4	8,3	42,3	34,6	15,4	26,7	26,7	46,7	38,0	31,1	24,1	75,0	0,0	0,0	59,3	14,9	7,5	8,4	58,3	8,4	31,9	45,5	27,3
	0,5-1	8,3	8,4	25,0	11,5	11,5	19,2	46,7	53,3	20,0	34,5	37,9	13,8	8,3	8,3	8,3	22,2	3,7	18,5	33,3	25,0	50,0	18,2	40,9	22,7
	1-3	41,7	33,3	50,0	38,5	38,5	50,0	26,6	20,0	33,3	24,1	27,6	41,4	16,7	75,0	75,0	11,1	44,4	48,1	50,0	16,7	33,3	40,9	13,6	50,0
	3-5	0,0	8,3	16,7	7,7	7,7	15,4	0,0	0,0	0,0	3,4	3,4	6,9	0,0	16,7	16,7	3,7	25,9	22,2	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0
	5-10	8,3	8,3	0,0	0,0	7,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	13,8	0,0	0,0	0,0	3,7	3,7	3,7	0,0	0,0	8,3	4,5	0,0	0,0
>10	8,3	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,4	0,0	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
5°	<0,5	25,0	31,3	6,2	40,6	34,4	12,5	29,5	23,5	41,2	29,0	29,0	25,8	58,8	0,0	0,0	63,4	6,7	6,7	8,4	58,3	8,4	31,9	50,0	27,3
	0,5-1	25,0	12,5	18,8	21,9	12,5	25,0	52,9	64,7	23,5	35,5	35,5	12,9	17,6	11,8	11,8	16,7	6,7	16,7	33,3	25,0	50,0	22,7	36,4	27,3
	1-3	43,8	31,3	62,5	34,4	43,8	50,0	17,6	11,8	29,4	29,0	29,0	41,9	11,8	58,8	70,6	13,3	46,6	46,7	50,0	16,7	33,3	36,4	13,6	45,4
	3-5	0,0	12,5	12,5	3,1	6,3	12,5	0,0	0,0	0,0	6,5	6,5	9,7	5,9	17,6	11,8	3,3	30,0	26,6	0,0	0,0	0,0	4,5	0,0	0,0
	5-10	0,0	6,2	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	0,0	9,7	0,0	5,9	5,8	3,3	0,0	3,3	0,0	0,0	8,3	4,5	0,0	0,0
>10	6,2	6,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	5,9	0,0	0,0	10,0	0,0	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
15°	<0,5	36,8	31,6	10,6	41,6	44,5	22,2	45,5	50,0	50,0	48,4	48,4	38,7	73,7	10,5	5,3	69,0	13,8	3,5	16,7	58,3	16,7	36,4	54,6	36,4
	0,5-1	47,4	36,8	52,6	27,8	11,1	41,7	50,0	40,9	27,3	45,2	38,7	22,6	26,3	15,8	36,8	27,6	20,7	51,7	41,7	25,0	58,3	22,7	31,8	22,7
	1-3	15,8	31,6	36,8	27,8	36,1	36,1	4,5	9,1	22,7	6,4	9,7	29,0	0,0	73,7	57,9	3,4	65,5	41,4	41,6	16,7	25,0	40,9	13,6	40,9
	3-5	0,0	0,0	0,0	2,8	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	6,5	0,0	0,0	0,0	0,0	3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5-10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
>10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
30°	<0,5	90,9	72,7	54,5	58,4	66,7	66,6	78,6	71,4	57,1	88,2	70,6	35,3	90,0	60,0	70,0	90,0	50,0	60,0	41,7	83,3	66,7	25,0	62,5	56,3
	0,5-1	0,0	0,0	36,4	33,3	8,3	16,7	21,4	28,6	14,3	11,8	29,4	29,4	10,0	20,0	30,0	10,0	40,0	40,0	50,0	16,7	33,3	43,8	25,0	18,7
	1-3	0,0	18,2	9,1	0,0	16,7	16,7	0,0	0,0	28,6	0,0	0,0	29,4	0,0	20,0	0,0	0,0	10,0	0,0	8,3	0,0	0,0	31,2	12,5	25,0
	3-5	9,1	9,1	0,0	8,3	8,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	5-10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
>10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
45°	<0,5	66,7	66,7	100	100	100	100	50,0	50,0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	50,0	100	50,0	33,4	66,7	66,7
	0,5-1	33,3	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	33,3	33,3	33,3	
	1-3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	33,3	0,0	0,0	
	3-5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
	5-10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
>10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

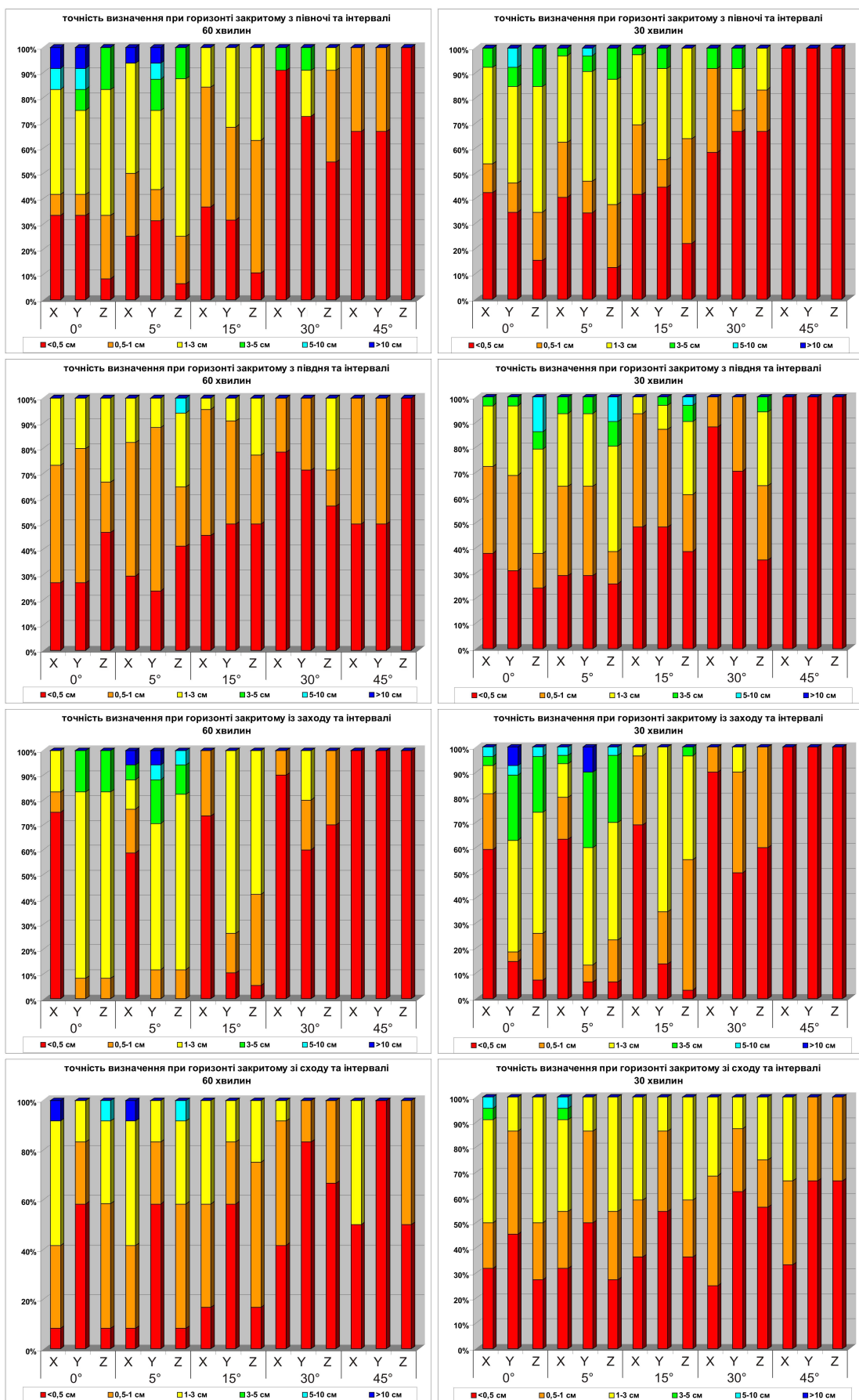


Рис. 4. Точність отриманих розв'язків за осями координат

Середньоквадратичні похибки отриманих розв'язків за осями координат наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Середньоквадратичні похибки отриманих розв'язків за осями координат, мм

кут відсічки	Горизонт закритий зі сторін світу																							
	північної						південної						західної						східної					
	інтервали спостереження, хв																							
	60			30			60			30			60			30			60			30		
	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z
0°	38	40	20	16	28	20	9	10	10	12	11	29	6	25	22	16	42	27	41	7	19	19	9	13
5°	30	36	19	13	24	18	9	9	16	14	13	28	83	72	29	16	47	28	41	7	19	19	9	13
15°	8	12	11	11	17	13	7	7	9	7	9	19	5	14	13	5	14	13	11	6	9	13	8	11
30°	12	16	8	12	16	9	4	5	9	5	5	14	4	8	6	4	7	6	8	4	6	13	6	8
45°	5	4	3	4	3	3	7	7	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12	6	7	10	5	6

З даних представлених у табл. 2 видно, що навіть за умови задовільної оцінки точності, при кутах відсічки 0° та 5° можливі відхилення отриманих розв'язків більше ніж на 10 см. Інтервали спостережень, в яких є такі відхилення, характеризуються великими значеннями GDOP (понад 25). Тому проведено відбраковування результатів у періоди спостережень, протягом яких середнє значення GDOP > 10. Варто відмітити, що у випадку закритої половини горизонту мінімальні значення GDOP збільшуються від 2,1-2,5 (при куті відсічки 0°) до 2,6-3,4 (при куті відсічки 15°) та 5-8 (при куті відсічки 30°). На рис. 5 наведено графіки зміни значення GDOP протягом доби при кутах відсічки 0° та 15°. Як можна перекоонатися з рис. 5, в таких умовах інтервали часу, протягом яких середнє значення GDOP < 10, при збільшенні кута відсічки значно зменшуються. Внаслідок цього, при кутах відсічки 0° та 5° можливість отримання задовільного рішення зменшується з 50-70% до 30-40%, а при куті відсічки 15° – з 60-90% до 20-25%. При кутах відсічки 30° та 45° недоцільно виконувати таке відбраковування, оскільки при наведених кутах відсічки значно зменшується кількість видимих супутників та зростають значення DOP.

Завдяки такому відбраковуванню підвищується точність визначення. Середньоквадратичні похибки розв'язків при кутах відсічки до 15° та середніх значеннях GDOP протягом інтервалів спостереження менше 10 наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Середньоквадратичні похибки отриманих розв'язків за осями координат при умові, що середнє значення GDOP протягом інтервалу спостереження менше 10, мм

кут відсічки	Горизонт закритий зі сторін світу																							
	північної						південної						західної						східної					
	інтервали спостереження, хв																							
	60			30			60			30			60			30			60			30		
	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z	m _x	m _y	m _z
0°	14	28	20	15	30	20	8	10	11	15	14	33	5	26	23	17	46	30	14	8	13	22	10	15
5°	13	19	16	15	30	20	9	10	9	11	10	12	6	26	21	16	45	31	14	8	13	14	10	14
15°	8	8	10	8	12	11	6	6	6	8	7	11	4	13	11	3	14	10	11	9	11	10	7	10

Порівняння середньоквадратичних похибок отриманих розв'язків за осями координат, без обмеження за GDOP та з умовою, що середнє значення GDOP протягом інтервалу спостереження менше 10, представлено на рис. 6.

Як можна перекоонатися на основі порівняння таблиць 3 та 4, для кутів відсічки 0° та 5° при умові, що середнє значення GDOP протягом інтервалу спостереження < 10, середньоквадратичні похибки визначення приростів координат зменшуються, але можуть досягати 3-4 см. Для кута відсічки 15° точність визначення покращується, але значно зменшується можливість одержання задовільного рішення протягом доби.

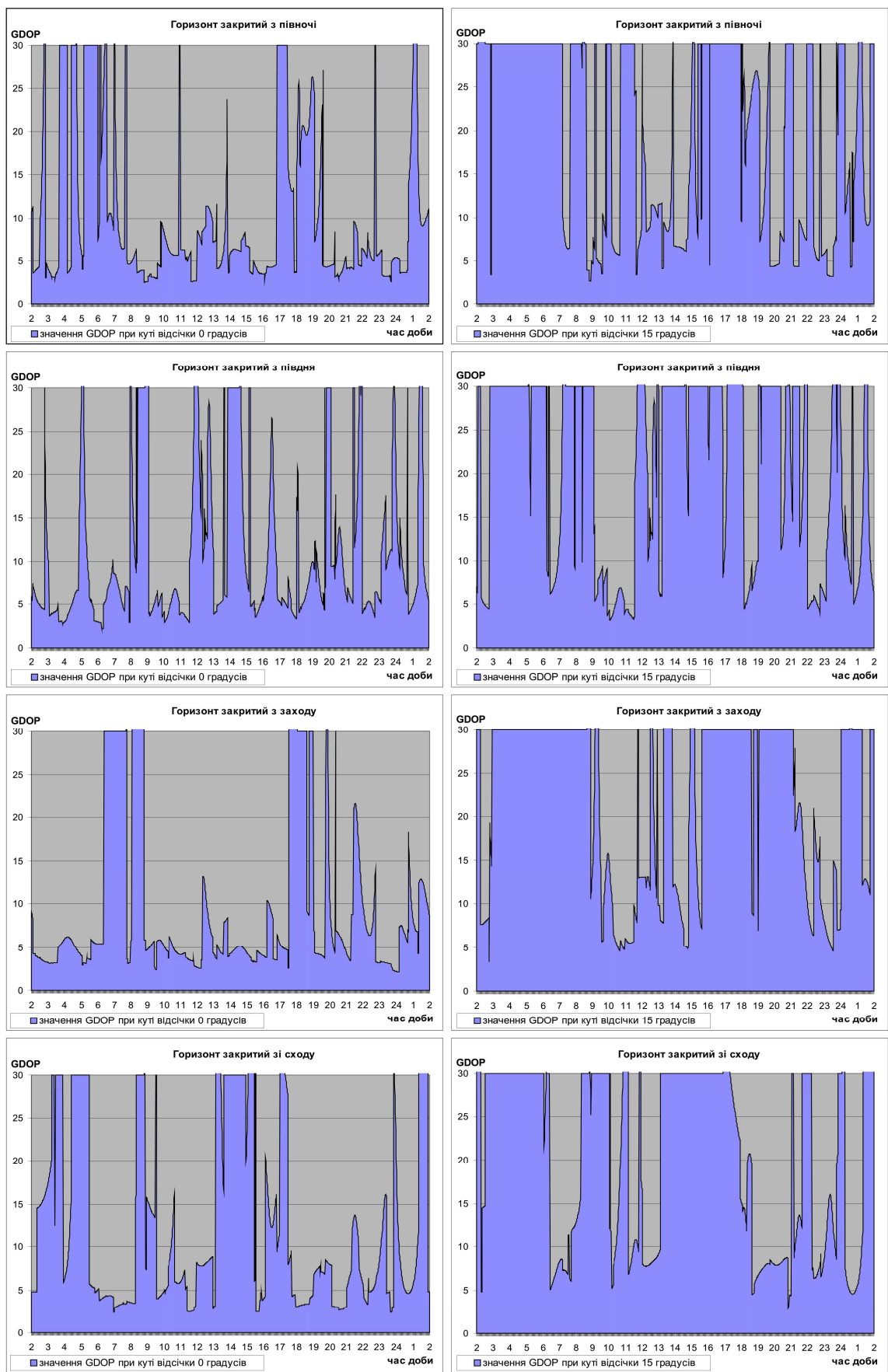


Рис. 5. Значення GDOP при закритих частинах горизонту при кутах відсічки 0° та 15°

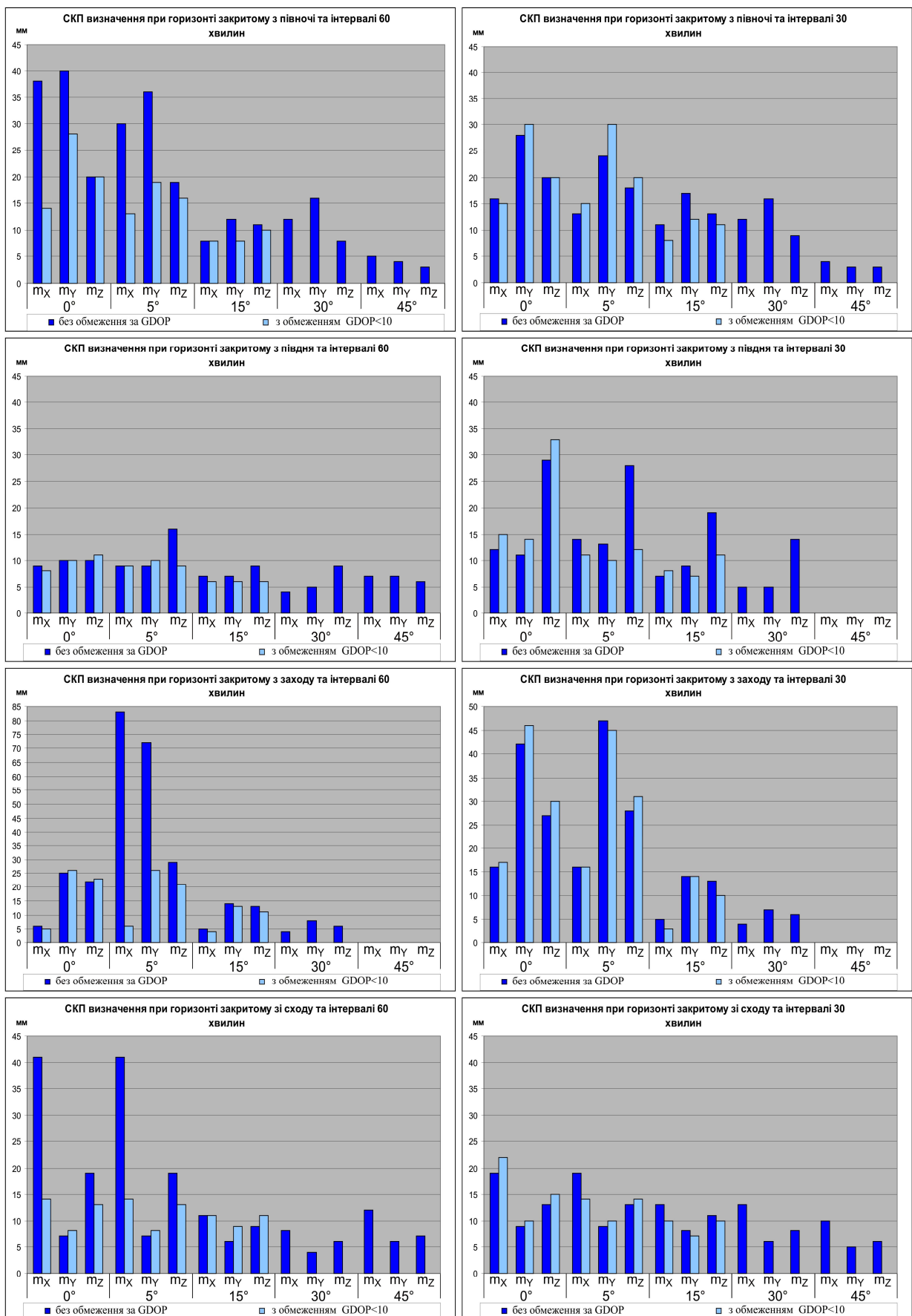


Рис. 6. Середньоквадратичні похибки отриманих розв'язків за осями координат

Висновки.

Резюмуючи наші дослідження, можна зробити висновок про можливість використання супутникових спостережень на забудованих територіях для виконання кадастрових зніманих, моніторингу територій та об'єктів нерухомості, а також при розв'язанні задач інженерної геодезії, а саме при визначенні вертикальних і горизонтальних рухів земної поверхні та споруд з точністю IV класу.

1. Антонович К.М., Карпик А.П., Клепиков А.Н. Спутниковый мониторинг земной поверхности // *Геодезия и картография*. – 2004. – № 1. – С. 4-11. 2. Баран П., Сушко В., Чорнокін В. Досвід інженерно-геодезичних спостережень за зсувами території міського житлового масиву з висотними будинками // *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва: Зб. наук. пр.* – Л.: Ліга-Прес, – 2000. – С. 132-139. 3. Баран П., Сушко В., Чорнокін В. Обґрунтування точності інженерно-геодезичних вимірювань на зсувах // *Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва: Зб. наук. пр.* – Л.: Ліга-Прес, – 2000. – С. 128-132. 4. Геніке А.А., Черненко В.Н. Исследование деформационных процессов Загорской ГАЭС спутниковыми методами // *Геодезия и картография*. – 2003. – № 2. – С. 27-33. 5. Геніке А.А., Черненко В.Н. Комплексные исследования на локальных геодинамических полигонах // *Геопрофи*. – 2003. – № 2. – С. 11-15. 6. ГОСТ 24846-81. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – М., 1981. – 26 с. 7. Татевян С.К., Кузин С.П., Ораевская С.П. Использование спутниковых позиционных систем для геодинамических исследований // *Геодезия и картография*. – 2004. – № 6. – С. 33-43. 8. Третьак К.Р., Серант О.В. Результати визначення сучасних горизонтальних деформацій земної поверхні на території Центральної Європи // *Вісник геодезії та картографії*. – 2002. – № 2. – С. 13-19.