

УДК 520.874.7

**О. В. Болотіна, М. М. Медведський**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
03680 МСП, вул. Академіка Заболотного, 27

### **Результати дослідження стабільності роботи українських станцій лазерної локації**

*Досліджувалась стабільність роботи станцій української ЛЛС-мережі: «Сімеїз», «Кацивелі», «Голосіїв—Київ», «Львів», з аналізу ЛЛС-спостережень ШСЗ LAGEOS-1 та LAGEOS-2 за період 05.01.1989—11.11.2004 рр. Отримано оцінки стабільності визначення координат кожної станції. Вказані причини, що впливають на стабільність роботи української ЛЛС-мережі.*

*РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ РАБОТЫ УКРАИНСКИХ СТАНЦИЙ лазерной локации, Болотина О. В., Медведский М. М. — Исследовалась стабильность определения координат станций украинской ЛЛС-сети: «Симеиз», «Кацивели», «Голосиив—Киев», «Львов», по результатам анализа ЛЛС-наблюдений ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2 за период 05.01.1989—11.11.2004 гг. Получены оценки стабильности определения координат каждой станции. Указаны причины, влияющие на стабильность работы украинской ЛЛС-сети.*

*SOME RESULTS OF INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE UKRAINIAN SLR STATIONS, Bolotina O. V., Medvedskij M. M. — The stability of the network of the Ukrainian SLR stations «Simeiz», «Katzively», «Golosiiv—Kiev», «Lviv» are investigated on the basis of the results of reducing the LAGEOS-1 and LAGEOS-2 observations from 5 January 1989 to 11 November 2004. The stability of coordinate determination for every station are estimated. The factors influencing on the stability of the network are outlined.*

#### **ВСТУП**

Метою даної роботи є представлення результатів дослідження стабільності функціонування української мережі станцій лазерної локації (ЛЛС-мережі) за весь період спостережень ними (далі — період дослідження) штучних супутників Землі (ШСЗ) LAGEOS-1 та LAGEOS-2 [1, 3].

Міжнародна служба лазерної локації висуває ряд вимог щодо стабільності роботи станцій лазерної локації (ЛЛС-станцій):

- неперервність ряду спостережень (розрив не більше тижня),
- відсутність систематичних зсувів та трендів у вимірюваннях відстаней до ШСЗ,

— відсутність збоїв апаратури, які можуть призвести до спотворення результатів вимірювань.

Стабільність роботи українських ЛЛС-станцій оцінювалась за наступними критеріями:

- розглядалися ряди спостережень з метою визначення їхньої неперервності та розподілу кількості спостережень за період дослідження,
- аналізувався розподіл нев'язок  $|O - C|$  з метою виявлення систематичних зсувів та впливу збоїв апаратури на результати вимірювань відстаней до ШСЗ,
- визначались координати ЛЛС-станцій на коротких 15-добових інтервалах з метою виявлення та дослідження причин їхніх варіацій,
- оцінювалась стабільність визначення координат ЛЛС-станцій на 15-добових інтервалах.

Спостереження оброблялись програмним комплексом «Київ—Геодинаміка» [5]. Використовувались моделі і методи, рекомендовані IERS Conventions 1997 [4]. Як опорна використовувалась система SSC(GAOUA)01L01, яка отримана з аналізу спостережень ШСЗ LAGEOS-1 та LAGEOS-2 за період 01.09.1983—31.12.2001, фіксується координатами 119 ЛЛС-станцій на епоху 1997.0 (MJD 50449) та швидкостями 66 ЛЛС-станцій [2].

#### АНАЛІЗ РЯДІВ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

В роботі були використані спостереження спеціалізованих ШСЗ LAGEOS-1 та LAGEOS-2, отримані на ЛЛС-станціях України за період MJD 47544.781 — MJD 53314.811. Інформація про назви українських ЛЛС-станцій та відповідні їм CDP-номери, дати початку спостережень MJD<sub>0</sub>, тривалості періоду спостережень  $\Delta T$  і сукупну кількість  $N$  спостережень супутників приведена в табл. 1.

Таблиця 1. Інформація про спостереження українських ЛЛС-станцій

Назва станції	CDP-номер станції	MJD <sub>0</sub>	$\Delta T$ , рік	$N$
«Голосіїв—Київ»	1824	51928.709	3.79	1359
«Львів»	1831	52397.994	2.79	757
«Сімеїз»	1873	47730.784	15.29	6105
«Кацивелі»	1893	47544.781	15.72	5630
Всього спостережень				13851

Аналіз розподілу кількості спостережень  $N$ , отриманих на 15-добових інтервалах (далі — інтервалах) кожною із станцій протягом періоду дослідження показав, що ряди спостережень не є однорідними по кількості спостережень та не є неперервними:

- в рядах спостережень спостерігаються розриви до 43 інтервалів. Основними причинами короткотривалих розривів (тривалістю від 2 до 4 інтервалів) є несприятливі для проведення спостережень погодні умови, та несправності в роботі апаратних комплексів станцій. Довготривалі розриви (тривалістю більше 4 інтервалів) є наслідком збоїв в роботі обладнання;
- в рядах спостережень явно виражені сезонні коливання. Мінімальна кількість спостережень, як правило, характерна для зимових періодів, що є наслідком впливу астроклімату на можливість проведення регулярних ЛЛС-спостережень;

— значні варіації  $N$  (від 0 до 200) також є наслідком несприятливих для спостережень метеорологічних умов та збоїв в роботі апаратних комплексів станцій.

#### АНАЛІЗ $|O - C|$

Розподіл кількості спостережень  $N$  по утворених різницях  $|O - C|$  спостережених ( $O$ ) та змодельованих ( $C$ ) величин за період дослідження приведено на рис. 1. Видно, що розподіли для ЛЛС-станцій «Голосіїв-Київ», «Львів», «Сімеїз», «Кацивелі» відхиляються від нормального. Додатковий максимум спостерігається в розподілі для ЛЛС-станції «Сімеїз» на інтервалі 0.50--1.20 м по  $|O - C|$ . Розподіл для ЛЛС-станції «Голосіїв-Київ» показав наявність двох подвійних максимумів на інтервалах 0--0.45 та 0.45--1.20 м по  $|O - C|$ .

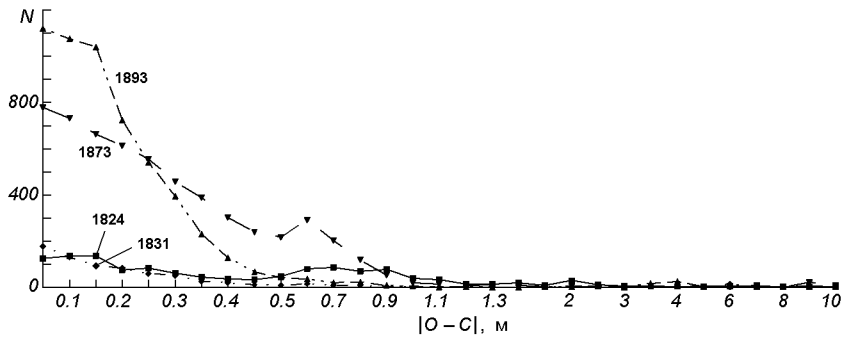


Рис. 1. Розподіл  $N$  по  $|O - C|$  за період дослідження

Існування подвійних та додаткових максимумів свідчить про наявність систематичних похибок у спостереженнях станцій «Голосіїв-Київ» та «Сімеїз». Зокрема, виникнення додаткових максимумів може бути пов'язане з нестабільною роботою лазера на станціях, а подвійних максимумів, характерних для станції «Голосіїв-Київ» — із збоями у системі калібровки. Результати виконаних нами детальних досліджень розподілів  $N$  по  $|O - C|$  українських ЛЛС-станцій приведено в роботі [1].

Таким чином, можна констатувати наявність систематичних зсувів у результатах вимірювань відстаней до ШСЗ, виникнення яких пов'язане зі збоями в роботі апаратних комплексів станцій.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ВАРІАЦІЙ КООРДИНАТ ЛЛС-СТАНЦІЙ

Для визначення координат українських ЛЛС-станцій використовувались лише ті спостереження, які попадали у межі критерію  $3\sigma$  (далі -- відібрані спостереження). Значення  $3\sigma = 0.21$  м отримано з попереднього аналізу, при якому в обробку було включено максимальну кількість спостережень.

Координати  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  визначались на 15-добових інтервалах. При цьому координати станцій не визначались на тих 15-добових інтервалах, на яких кількість відібраних спостережень становила  $n \leq 3$  (критерій 1). В аналізі не включались визначені на 15-добових інтервалах координати станцій, якщо середня квадратична похибка визначення хоча б однієї з координат перевищувала 1 м (критерій 2, явні викиди), а також якщо відхилення хоча

Таблиця 2. Діапазон змін координат українських ЛЛС-станцій

Станція	Період	$X_{\max} - X_{\min}$ , м	$Y_{\max} - Y_{\min}$ , м	$Z_{\max} - Z_{\min}$ , м	
«Голосіїв—Київ»	603—695	1.047	1.255	0.969	
	603—616	0.404	0.334	0.259	
	623—695	0.946	1.255	0.74	
«Львів»	634—695	0.570	0.630	0.414	
	«Сімеїз»	323—695	1.123	1.746	1.249
		323—405	0.552	0.673	0.419
		466—547	1.038	1.746	0.948
«Кацивелі»	592—695	0.803	0.682	0.916	
	310—695	1.036	1.014	0.965	
	310—426	0.405	0.744	0.647	
	464—545	0.790	0.744	0.597	
	570—647	0.764	0.988	0.965	
	680—695	0.299	0.374	0.268	

б однієї з координат від її середнього значення перевищувало 1 м (критерій 3, додаткові викиди). Загалом оцінки координат для станцій «Голосіїв—Київ», «Львів», «Сімеїз», «Кацивелі» отримано відповідно на 39.22, 66.67, 58.02 та 75.00 % від загальної кількості отриманих інтервалів, на яких провадилися спостереження.

Діапазон змін  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  наведено в табл. 2. Максимальні варіації координат, визначених з 15-добовим кроком, перевищують похибки їхнього визначення. Суттєві, порядку 1 м, значення цих відхилень свідчать про невпевнене визначення координат станцій. Це може бути наслідком прийнятого значення критерія 3, а також може свідчити, з одного боку, про недостатню кількість і якість спостережень, які отримують станції, а з іншого боку — про можливість реальних варіацій положень станцій.

Аналізуючи варіації отриманих оцінок координат ЛЛС-станцій, можна виділити характерні періоди в їхній роботі, які характеризуються різною густиною визначення координат і різною амплітудою варіацій координат.

За розподілом отриманих оцінок координат в роботі станції «Голосіїв—Київ» можна виявити два періоди тривалістю 1—2 роки: 603—616, 623—695 (табл. 2). З аналізу розподілу  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  для станції «Львів» систематичних зсувів, трендів та періодів у роботі станції за вказаними вище ознаками не виявлено. Для станції «Сімеїз» виявлено три періоди тривалістю 4—6 років: 323—405, 466—547, 592—695. Це повністю узгоджується з періодами роботи станції 310—407, 408—553, 554—695, виділеними за результатами аналізу розподілів  $N$  по  $|O - C|$ , отриманих станцією на річних інтервалах [1]. Виходячи з розподілу отриманих оцінок координат станції «Кацивелі», можна виділити чотири періоди в роботі станції: 310—426, 464—545,

Таблиця 3. Середні оцінки координат ЛЛС-станцій

Станція	Період	$N$	$n$	$n/N$ , %	$\bar{X}$ , м	$\bar{Y}$ , м	$\bar{Z}$ , м
«Голосіїв—Київ»	603—695	1359	472	34.73	3512989.338	2068968.712	4888817.240
					$\pm 0.086$	$\pm 0.129$	$\pm 0.084$
«Львів»	627—695	757	429	56.67	3760674.762	1670776.303	4857165.439
					$\pm 0.052$	$\pm 0.070$	$\pm 0.054$
«Сімеїз»	310—695	6105	2623	42.96	3783902.537	2551404.964	4441257.589
					$\pm 0.087$	$\pm 0.134$	$\pm 0.080$
«Кацивелі»	310—695	5630	3907	69.40	3785944.665	2550780.608	4439461.418
					$\pm 0.098$	$\pm 0.067$	$\pm 0.038$

570—647, 680—695. Виявлено систематичну складову коливань координати  $Z$  для цієї станції. Причини систематичних зсувів на даному етапі дослідження встановити неможливо, оскільки їхні значення не перевищують похибки визначення координат станції. Детальна характеристика кожного з виявлених нами характерних періодів приведена в роботі [1].

За отриманими оцінками  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  були визначені середні значення координат станцій за період дослідження. Інформація про інтервали спостережень кожної зі станцій, кількість спостережень  $N$ , кількість відібраних спостережень  $n$ , їхній відсоток  $n/N$  від загальної кількості спостережень та отримані середні значення координат станцій приведені в табл. 3.

За означенням нормального розподілу у межі  $3\sigma$  повинно попадати 95 % спостережень. Однак для кожної зі станцій  $n/N \leq 95\%$ . Це є наслідком систематичних похибок в результатах спостережень, пов'язаних зі збоями в роботі апаратних комплексів станцій і проявилось на рис. 2 як відхилення розподілів спостережень від нормального (поява додаткових максимумів, зміщення максимумів). Фактично  $n/N$  є «коефіцієнтом корисної дії» станції.

Таким чином, виявлено суттєві варіації оцінок  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , що свідчить про невпевнене визначення координат станцій. Можливими причинами виявлених варіацій є:

- прийняте значення критерію 3 щодо виключення оцінок координат з аналізу,
- недостатня кількість і якість спостережень, які отримують станції.

Зауважимо, що оцінки координат станцій  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  не можна вважати рівноточними: вони залежать від кількості та якості спостережень, що використовувались для їхнього визначення.

#### ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ЛЛС-СТАНЦІЙ

На основі отриманих значень координат станцій  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  за запропонованою у роботі [6] методикою були зроблені оцінки стабільності визначення координат  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$  та оцінки загальної стабільності  $\sigma$  кожної з ЛЛС-станцій на річних інтервалах та за період дослідження. Чисельні значення оцінок стабільності визначень координат станцій приведені в роботі [1].

Варіації отриманих оцінок  $\sigma_X$ ,  $\sigma_Y$ ,  $\sigma_Z$ ,  $\sigma$  показано на рис. 2. Для станцій «Голосіїв-Київ», «Львів», «Сімеїз», «Кацивелі» стабільність визначень координат становить 0.251, 0.170, 0.165 та 0.149 м відповідно. За описаним в [6] критерієм це на порядок нижче, ніж оцінка стабільності визначень координат для базових станцій, що свідчить про низьку стабільність визначення координат українських ЛЛС-станцій в цілому.

Варіації оцінок стабільності визначення координат станції «Голосіїв—Київ» є найбільшими і становлять 0.5 м, а для станцій «Львів», «Сімеїз», «Кацивелі» вони не перевищують 0.375 м. Зміна оцінок стабільності визначення координат станцій «Голосіїв—Київ», «Сімеїз» і «Кацивелі» підтверджує висновок про виявлені характерні періоди в їхній роботі за варіаціями  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

Зауважимо, що оцінки стабільності за [6] є функціями кількості визначень координат, проте вони не відображають якість отриманих оцінок. Оцінка стабільності за [6] фактично є середньою квадратичною похибкою окремого визначення координати станції. При цьому оцінки координат вважаються рівноточними. Як показало дане дослідження, оцінки координат станцій не можна вважати рівноточними: вони залежать від кількості та якості спостережень, що використовувались для їхнього визначення.

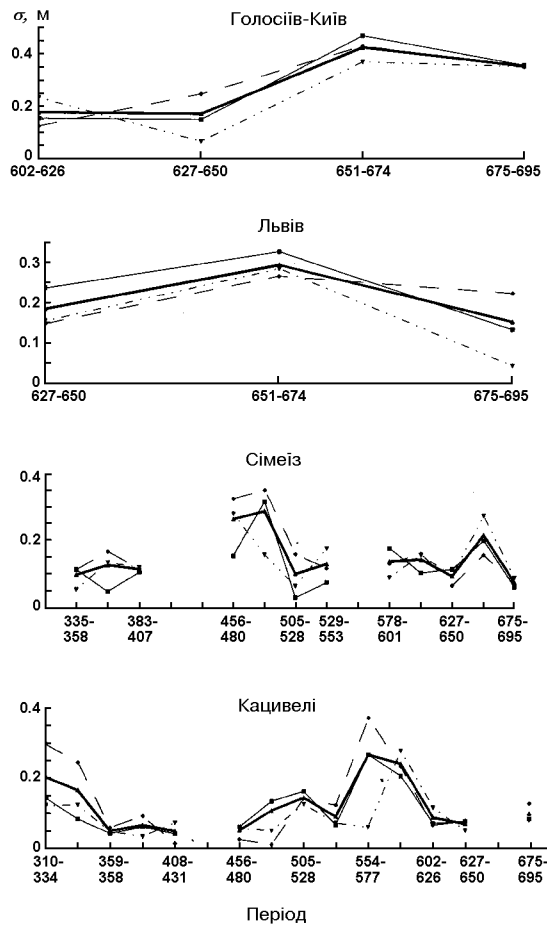


Рис. 2. Варіації оцінок стабільності визначення координат українських ЛЛС-станцій ( $\sigma_x$  — тонка лінія,  $\sigma_y$  — штрихова,  $\sigma_z$  — штрих-пунктирна,  $\sigma$  — жирна)

## ВИСНОВКИ

Таким чином, в результаті даного дослідження встановлено недостатню стабільність роботи станцій української ЛЛС-мережі.

Показано, що ряди спостережень не є неперервними і характеризуються як короткими (15—60 діб), так і довготривалими (понад 60 діб) розривами, викликаними несправностями роботи апаратних комплексів станцій. Виявлені явно виражені сезонні коливання в рядах спостережень. Вказано на значні, від 0 до 200, варіації кількості спостережень для різних 15-добових інтервалів, що є наслідком несприятливих метеорологічних умов та збоїв у роботі апаратних комплексів станцій.

Аналіз розподілів кількості спостережень, отриманих ЛЛС-станціями, по IO — C1, дозволило констатувати наявність систематичних зсувів у результатах вимірювань відстаней до ШСЗ та пов'язати їхнє виникнення зі збоями в роботі апаратних комплексів станцій.

Отримано оцінки координат ЛЛС-станцій на всьому інтервалі дослідження, на річних та на коротких 15-добових інтервалах. Виявлено суттєві варіації оцінок координат, визначених на коротких інтервалах. Вказані причини виявлених варіацій, зокрема наявність систематичних зсувів у спостереженнях.

Зроблено висновок про нерівноточність оцінок координат станцій: вони залежать від кількості та якості спостережень, що використовувались для їхнього визначення.

Робота виконана при підтримці гранту INTAS Infrastructure Actions Autumn 2003, INTAS Ref. Nr. 03-59-11.

1. *Болотіна О. В., Медведський М. М.* Дослідження стабільності роботи станцій української ЛЛС-мережі. — Київ, 2006.—40 с.—(Препринт / НАН України; ГАО-06-1У).
2. *Болотіна О. В., Медведський М. М., Суберляк В. Р.* О стабильности работы спутникового лазерного дальномера «Голосиив-Киев» // Кинематика и физика небес. тел.—2003.—19, № 1.—С. 77—86.
3. *Яцків Я. С., Болотіна О. В., Болотін С. Л. та ін.* Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки (Укргеокосмомережа). — Київ: Компанія ВАІТЕ, 2005.—60 с.
4. *IERS Conventions (1996) / Ed. D. D. McCarthy.* — Paris: Observatoire de Paris, 1996.—95 p.—(Technical Note 21).
5. *Rudenko S.* Terrestrial reference frame realization from the analysis of 15-year LAGEOA01 and LAGEOS-2 world network data // Proc. of the International Workshop on Geodetic Measurements by the Collocation of Space Techniques on Earth, Tokyo, Japan, January, 25—28, 1999. — Tokyo, 1999.—P. 201—207.
6. *Schillak S., Kuzmicz-Cielak M., Wnuk E.* Stability of coordinates of the SLR stations on the basis of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 ranging in 1999 // Artificial satellites.—2001.—36, N 3.—P. 85—96.

Надійшла до редакції 15.05.06