

УДК 520.874.7

О. Болотіна, М. Медведський

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України

03680, ГСП, вул. Академіка Заболотного, 27

Результати дослідження стабільності роботи українських ЛЛС-станцій

Досліджувалась стабільність роботи станцій української ЛЛС-мережі: «Сімеїз», «Кацівелі», «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 ЛЛС-СТАНЦИЙ, Болотина О., Медведский М.- Исследовалась стабильность определения координат станций украинской ЛЛС-сети: «Симеиз», «Кацивели», «Голосив-Киев», «Львов»,- по результатам анализа ЛЛС-наблюдений ИСЗ LAGEOS-1 и LAGEOS-2 за период 05.01.1989-11.11.2004 гг. Получена оценка стабильности определения координат каждой станции. Указаны причины, влияющие на стабильность работы украинской ЛЛС-сети.

RESULTS OF INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE UKRAINIAN SLR STATIONS, Bolotina O., Medvedskij M.- Stability of the network of the ukrainian SLR stations «Simeis», «Katzively», «Golosiiv-Kiev», «Lviv» were investigated on the basis of the results of reducing the LAGEOS-1 ma LAGEOS-2 observations during period 05.01.1989-11.11.2004. The estimations of the stability for such of the stations were obtained. The factors influencing on the stability of the network were outlined.

1. 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 [2, 3].

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

- неперервність ряду спостережень (розрив не більше тижня),
- відсутність систематичних зсувів та трендів у вимірюваннях відстаней до ШСЗ,
- відсутність збоїв апаратури, які можуть привести до спотворення результатів вимірювань.

Стабільність роботи українських ЛЛС-станцій оцінювалась за наступними критеріями:

- розглядалися ряди спостережень з метою визначення їх 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 їх 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 01.09.1983-31.12.01, фіксується координатами 119 ЛЛС-станцій на епоху 1997.0 (MJD 50449) та швидкостями 66 ЛЛС-станцій [1].

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_0 , тривалості періоду спостережень ΔT і сукупну кількість спостережень супутників N приведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Інформація про спостереження українських ЛЛС-станцій

Назва станції	CDP-номер станції	MJD_0	$\Delta T, \text{рік}$	N_t
«Голосіїв-Київ»	1824	51928.709	3.79	1359
«Львів»	1831	52397.994	2.79	757
«Сімеїз»	1873	47730.784	15.29	6105
«Кацівелі»	1893	47544.781	15.72	5630
Всього спостережень:				13851

Аналіз розподілу кількості спостережень N , отриманих на 15-добових інтервалах (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 як несприятливі для проведення спостережень погодні умови, так і 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 астроклімата на можливість проведення регулярних ЛЛС-спостережень.
- Помітні значні (від 0 до 200) варіації N що є наслідком несприятливих для спостережень метеорологічних умов та збоїв в роботі апаратних комплексів станцій.

3. Аналіз $|O-C|$

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

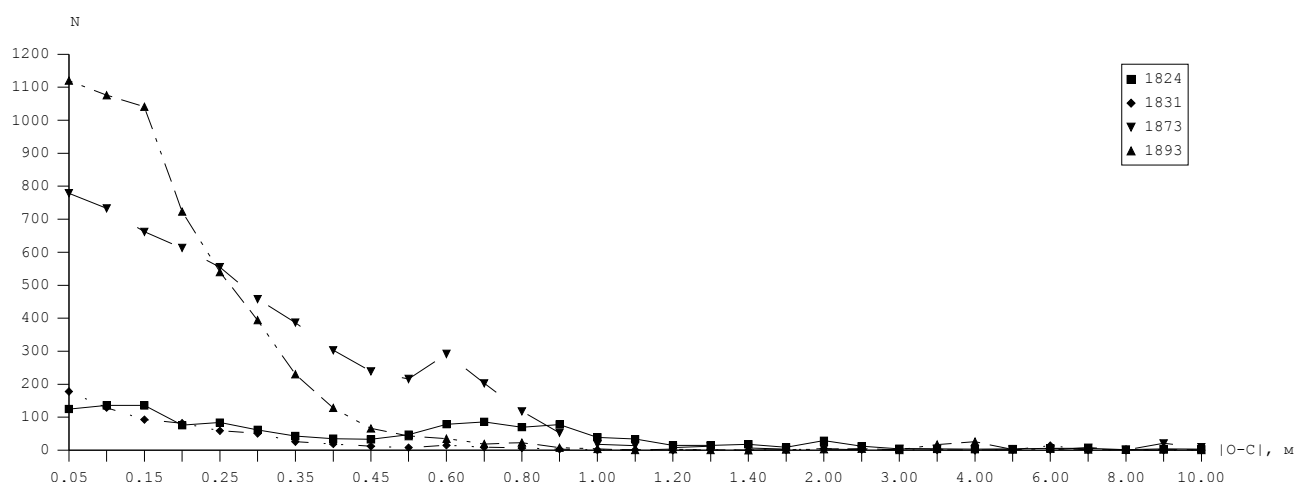


Рис. 1. Розподіл N по $|O-C|$ за період дослідження

Існування подвійних та додаткових максимумів свідчить про наявність систематичних похибок в 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» - з наслідком збоїв в системі калібровки. Результати виконаного нами детального дослідження розподілів N по $|O-C|$ українських ЛЛС-станцій приведено в [3].

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

4. Дослідження варіацій координат ЛЛС-станцій

Для визначення координат українських ЛЛС-станцій використовувались лише статистично значимі спостереження за критерієм 3σ . Значення $3\sigma=0.21$ м було визначене з попереднього аналізу, при якому в обробку була включена максимальна кількість спостережень.

Координати українських ЛЛС-станцій X , Y , Z визначались на 15-добових інтервалах. При цьому координати станцій не визначались на 15-добових інтервалах, на яких кількість значимих спостережень $n_d \leq 3$ (критерій 1). В аналіз 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 б однієї з координат від її середнього значення перевищувало 1 м (критерій 3, додаткові викиди). Загалом, оцінки координат станцій «Голосіїв-Київ», «Львів», «Сімеїз», «Кацівелі» отримані відповідно на 39.22%, 66.67%, 58.02% та 75.00% від загальної кількості тих 15-добових інтервалів, на яких проводились спостереження.

Діапазон змін X , Y , Z наведено в табл. 2. Максимальні варіації координат, визначених з 15-ти добовим кроком, перевищують похибки їх визначення. Суттєві, порядку 1 м, значення цих варіацій свідчать про невпевнене визначення координат станцій. Пояснюється це прийнятим значенням критерія 3 щодо виключення оцінок координат з аналізу та свідчить, з одного боку про недостатню кількість і якість спостережень, які отримують станції, а з іншого – про можливість реальних варіацій положень станцій.

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

Табл. 2. Діапазон змін координат українських ЛЛС-станцій

<i>Станція</i>	<i>Період</i>	$X_{max} - X_{min}, м$	$Y_{max} - Y_{min}, м$	$Z_{max} - Z_{min}, м$
«Голосіїв-Київ»	603-695	1.047	1.255	0.969
	603-616	0.404	0.334	0.259
	623-695	0.946	1.255	0.748
«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
	592-695	0.803	0.682	0.916
«Кацівелі»	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

По розподілу отриманих оцінок координат станції «Голосіїв-Київ» можна виявити два періоди тривалістю 1-2 роки в роботі станції: 603-616, 623-695 (табл. 2). Аналіз розподілу оцінок X , Y , Z для станції «Львів» не виявив існування систематичних зсувів, трендів та періодів у роботі станції за вказаними вище ознаками. Розподіл отриманих оцінок координат станції «Сімеїз» вказує на наявність трьох періодів тривалістю 4-6 років в роботі станції: 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 [2]. Виходячи з розподілу отриманих оцінок координат станції «Кацівелі» можна виділити чотири періоди в роботі станції: 310-426, 464-545, 570-647, 680-695. Виявлена систематична складова в коливаннях координати Z ЛЛС-станції «Кацівелі». Причини виявлення систематичних зсувів на даному етапі дослідження встановити неможливо, оскільки їх значення не перевищують похибки визначення координат станції. Детальна характеристика кожного з виявлених нами характерних періодів приведена в [2].

За отриманими оцінками X , Y , Z були визначені середні значення координат станцій за період дослідження \bar{X} , \bar{Y} , \bar{Z} . Інформація про інтервали спостережень кожної зі станцій, кількість спостережень N , кількість статистично значимих спостережень n , відсоток статистично значимих спостережень від загальної кількості спостережень K та отримані оцінки координат станцій, приведені в табл. 3.

Табл. 3. Середні оцінки координат ЛЛС-станцій

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

За визначенням, якщо розподіл спостережень близький до нормального, то в межі критерію 3σ повинно попадати 95% спостережень. Отримані для кожної зі станцій оцінки $K \leq 95\%$. 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 K 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 критерія 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 є залежними від кількості та якості спостережень, що використовувались для їх визначення.

5. Дослідження стабільності визначення координат ЛЛС-станцій

На основі отриманих значень координат станцій X, Y, Z були зроблені оцінки стабільності визначення координат $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ та оцінки загальної стабільності σ кожної з ЛЛС-станцій на річних інтервалах та за період дослідження. Чисельні значення оцінок стабільності визначень координат станцій приведені в [2].

Варіації отриманих оцінок $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma$ показані на рис. 2. Для станцій «Голосіїв-Київ», «Львів», «Сімеїз», «Кацівелі» стабільність визначень координат становить 0.251 м, 0.170 м, 0.165 м та 0.149 м відповідно. За описаним в [6] критерієм це на порядок нижче оцінки стабільності визначень координат для базових станцій і 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. Коливання оцінок $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma$ станцій «Львів», «Сімеїз», «Кацівелі» не перевищують 0.375 м. Зміна оцінок стабільності визначення координат станцій «Голосіїв-Київ», «Сімеїз» і «Кацівелі» підтверджує висновок про виявлені характерні періоди в їх роботі за варіаціями X, Y, Z .

Зауважимо, що оцінки стабільності за [6] є функціями кількості визначень координат,

проте не відображають якість отриманих оцінок. Оцінка стабільності за [6] фактично є середньою квадратичною похибкою окремого визначення координати станції. При цьому оцінки координат вважаються рівноточними – тобто отриманими за однакових умов. Як показало дане дослідження, оцінки координат станцій не можна вважати рівноточними: вони є залежними від кількості та якості спостережень, що використовувались для їх визначення.

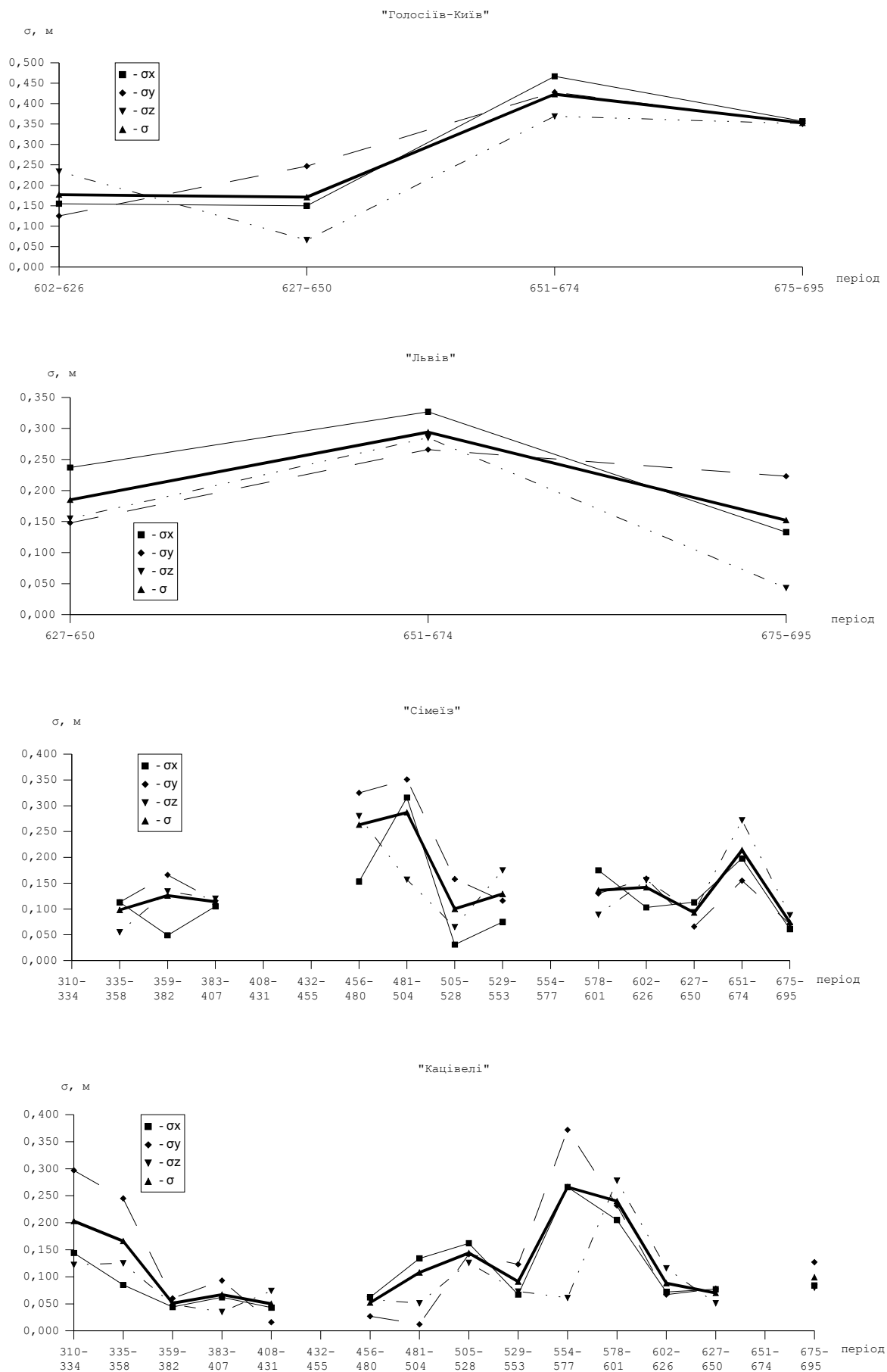


Рис. 2. Варіації оцінок стабільності визначення координат українських ЛЛС-станцій

6. 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 (від 60) розривами, викликаними несправностями в роботі 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 для спостережень метеорологічних умов та збоїв в роботі апаратних комплексів станцій.

Аналіз розподілів кількості спостережень, отриманих ЛЛС-станціями по $|O-C|$ дозволило констатувати наявність систематичних зсувів в результатах вимірювань відстаней до ШСЗ та пов'язати їх 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, які отримують станції.

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

Подяки

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

Література

1. Болотина О.В., Медведский М.М., Суберляк В.Р. О стабильности работы спутникового лазерного дальномера «Голосиив-Киев»// Кинематика и физика небесных тел.-2003.-Т.19, № 1.-С.77-86.
2. Болотина О.В., Медведський М.М. Дослідження стабільності роботи станцій української ЛЛС-мережі // Препринт ГАО-06-1У.-Київ: 2006.-40 с.
3. Яцків Я.С., Болотина О.В., Болотін С.Л., Медведський М.М., Хода О.О., Вольвач О.Є. Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки (Укргеокосмомережа).- 2005.- Київ: Компанія ВАІТЕ.- 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.