

УДК 520.874.7

Дослідження стабільності роботи станцій української ЛЛС-мережі

О. Болотіна, М. Медведський
Головна астрономічна обсерваторія
Національної академії наук України
03680, ГСП, вул. Академіка Заболотного, 27

Анотація

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ РОБОТЫ СТАНЦИЙ УКРАИНСКОЙ ЛЛС-СЕТИ, Болотина О., Медведский 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. Получена оценка стабильности определения координат каждой станции. Указаны причины, влияющие на стабильность работы украинской ЛЛС-сети.

INVESTIGATION OF THE STABILITY OF THE UKRAINIAN SLR NETWORK, 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 та 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 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].

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 спеціалізованих ШСЗ,
- відсутність збоїв апаратури, які можуть привести до спотворення результатів вимірювань.

Стабільність роботи ЛЛС-станцій оцінювалась за наступними критеріями:

- розглядались 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 річних і на коротких 15-добових інтервалах з метою виявлення та дослідження причин їх варіацій,
- оцінювалась стабільність визначення координат ЛЛС-станцій на річних і на 15-добових інтервалах.

Спостереження оброблялись програмним комплексом «Київ-Геодинаміка» [4]. Використовувались моделі і методи, рекомендовані IERS Conventions 1997 [3]. 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 , кількість спостережень кожного із супутників окремо $N_{LAGEOS-1}$ і $N_{LAGEOS-2}$ та їх сукупності N_t приведена в таблиці 1.

Таблиця 1. Інформація про спостереження українських ЛЛС-станцій

Назва станції	CDP-номер станції	MJD_0	ΔT , рік	$N_{LAGEOS-1}$	$N_{LAGEOS-2}$	N_t
«Голосіїв-Київ»	1824	51928.709	3,79	769	610	1359
«Львів»	1831	52397.994	2,79	429	328	757
«Сімеїз»	1873	47730.784	15,29	3625	2480	6105
«Кацівелі»	1893	47544.781	15,72	3261	2369	5630
Всього спостережень:						13851

У зв'язку з малою кількістю спостережень $N_{LAGEOS-1}$ і $N_{LAGEOS-2}$, визначення координат ЛЛС-станцій проводилось по сукупності спостережень N_t супутників LAGEOS-1 та LAGEOS-2.

Розподіл кількості спостережень N_y , отриманих на річних інтервалах кожною із станцій протягом періоду дослідження, подано на рис. 1. Інформацію про відповідність сукупності 15-добових інтервалів річним періодам спостережень приведено в табл. 2. Нумерація 15-добових інтервалів відповідає внутрішньому порядку програмного комплексу «Київ-Геодинаміка».

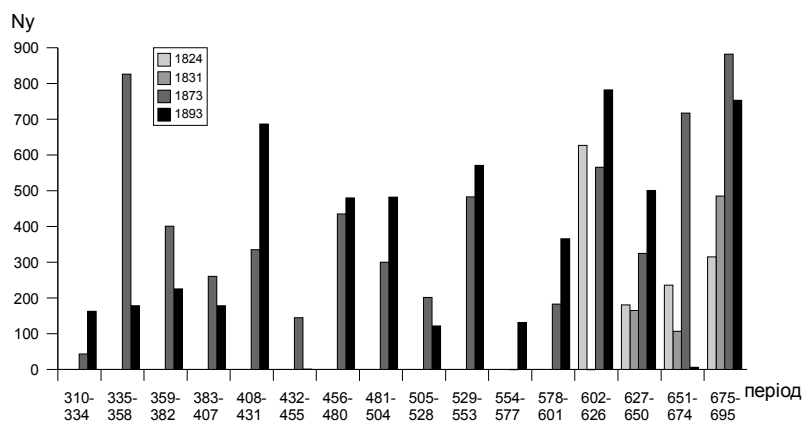


Рис. 1. Розподіл N_y за період дослідження

Таблиця 2. Відповідність 15-добових інтервалів річним періодам

15-добові інтервали	Річний період	15-добові інтервали	Річний період
310-334	05.01.1989-14.01.1990	505-528	08.01.1997-02.01.1998
335-358	15.01.1990-09.01.1991	529-553	03.01.1998-12.01.1999
359-382	10.01.1991-04.01.1992	554-577	13.01.1999-07.01.2000
383-407	05.01.1992-13.01.1993	578-601	08.01.2000-01.01.2001
408-431	14.01.1993-08.01.1994	602-626	02.01.2001-11.01.2002
432-455	09.01.1994-03.01.1995	627-650	12.01.2002-06.01.2003
456-480	03.01.1995-13.01.1996	651-674	07.01.2003-01.01.2004
481-504	14.01.1996-07.01.1997	675-695	02.01.2004-11.11.2004

Для річних рядів спостережень характерні розриви, існування яких можна пояснити лише проблемами з апаратними комплексами станцій. Кількість спостережень, отриманих станціями, змінюється для різних річних інтервалів від 0 до 826. В середньому за рік N_y для ЛЛС-станцій «Голосіїв-Київ», «Львів», «Сімеїз», «Кацівелі» становить 340, 252, 381, 351 спостережень відповідно.

Розподіл кількості спостережень N_d , отриманих на 15-добових інтервалах кожною із станцій протягом періоду дослідження, приведено на рис. 2. Пунктиром відображено границі річних інтервалів. Очевидно, що ряди спостережень не є однорідними по кількості спостережень та не є неперервними:

- Спостереження проводяться нерегулярно. Розриви в рядах спостережень коливаються від 1 до 43 15-добових інтервалів. Основними причинами короткотривалих розривів (тривалістю до двох 15-добових інтервалів для станцій «Сімеїз» та «Кацівелі», до чотирьох 15-добових інтервалів для станцій «Голосіїв-Київ» та «Львів») є як несприятливі для проведення спостережень погодні умови, так і несправності в роботі апаратних комплексів станцій. Довготривалі розриви в рядах спостережень (тривалістю більше чотирьох 15-добових інтервалів) є наслідком збоїв в роботі обладнання.
- В рядах спостережень явно виражені сезонні коливання. Мінімальна кількість спостережень, як правило, характерна для зимових періодів. Це є наслідком впливу астроклімата на можливість проведення регулярних ЛЛС-спостережень.
- Помітні значні (від 0 до 200) варіації N_d , що є наслідком несприятливих для спостережень метеорологічних умов та збоїв в роботі апаратних комплексів станцій.

3. Аналіз $|O-C|$

В процесі аналізу були утворені різниці спостережених (O) та змодельованих (C) величин.

Розподіл кількості спостережень N_t по значенням різниць $|O-C|$ за період дослідження приведено на рис. 3. Відзначимо, що розподіл N_t 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_t 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 $|O-C|$.

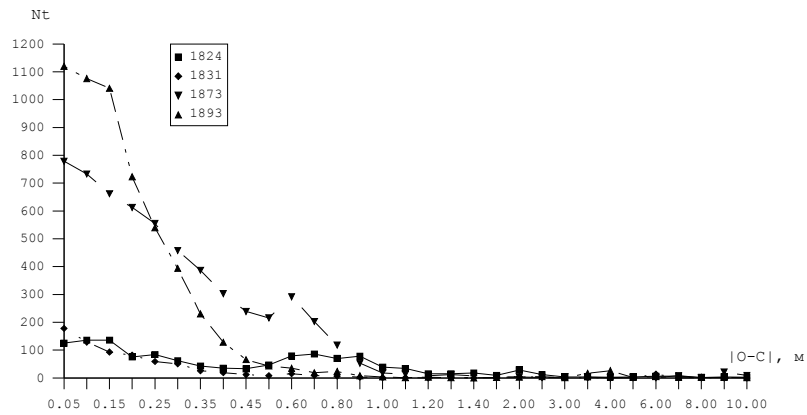


Рис. 3. Розподіл N_t по $|O-C|$ за період дослідження

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.

Для більш детального дослідження періодів та причин виникнення систематичних зсувів досліджувались розподіли кількості спостережень N_y , отриманих кожною з ЛЛС-станцій на річних інтервалах, по $|O-C|$ (рис. 4).

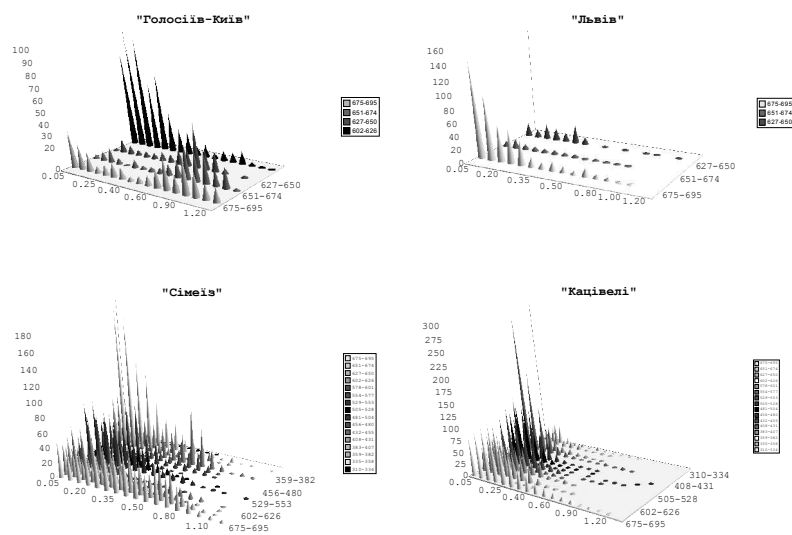


Рис. 4. Розподіл N_y по $|O-C|$

Виявлено річні інтервали, на яких розподіл $|O-C|$ не відповідає нормальному. Це свідчить про наявність систематичних похибок в спостереженнях ЛЛС-станцій протягом цих періодів.

В розподілах N_y по $|O-C|$, отриманих станцією «Голосіїв-Київ» на річних інтервалах 627-650 та 651-674, спостерігається зміщення максимумів від нуля на 0.5 м. Це є наслідком відсутності калібровки в спостереженнях за ці періоди. Існування додаткового максимуму на річному інтервалі 675-695 пов'язане з нестабільною роботою лазера станції.

В розподілі кількості спостережень N_y по $|O-C|$, отриманих станцією «Львів» на річному інтервалі 627-650, спостерігається повільне спадання N_y зі збільшенням $|O-C|$.

Аналізуючи розподіли кількості спостережень N_y по $|O-C|$, отриманих станцією «Сімеїз» на річних інтервалах, можна виділити три характерні періоди в роботі станції: 310-407, 408-553, 578-695 (рис. 5).

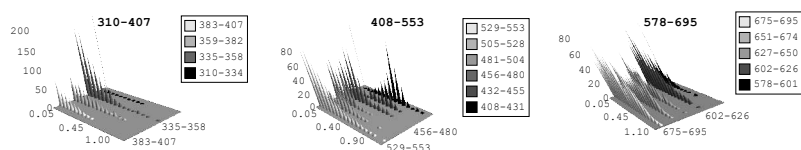


Рис. 5. Розподіл N_y , отриманих станцією «Сімеїз», по $|O-C|$

Для періоду 310-407 розподіли N_y по $|O-C|$ є близькими до нормального на кожному з річних інтервалів і характеризуються швидким спаданням N_y зі збільшенням $|O-C|$.

Період 408-553 характеризується зміщенням максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ в цілому. В розподілах N_y по $|O-C|$, отриманих станцією «Сімеїз» на річних інтервалах 408-431 та 432-455, спостерігаються зміщення максимумів від нуля на

0.5 м та 0.6 м відповідно. Це є наслідком нестабільної роботи лазера станції. Зміщення максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ на цих інтервалах пояснюють існування додаткового піку в розподілі N_t по $|O-C|$ на рис. 3, характерного для станції «Сімеїз». Зміщення максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ на 0.10 м спостерігається для річних інтервалів 456-480, 481-504, 505-528, 529-553. Для річних інтервалів 481-504 та 529-553 є також характерною наявність додаткових піків по $|O-C|$ на 0.25 м.

Для періоду 578-695 розподіли N_y по $|O-C|$ характеризуються повільним спаданням N_y зі збільшенням $|O-C|$ на кожному з річних інтервалів. Спостерігаються зміщення максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ на 0.15 м і 0.25 м для річних інтервалів 602-626 та 675-695 відповідно. На річному інтервалі 651-674 спостерігається додатковий максимум N_y по $|O-C|$ на 0.40 м.

Розподіли кількості спостережень N_y по $|O-C|$, отриманих станцією «Кацівелі», характеризуються зміщенням максимумів розподілів відносно нуля від 0.10 до 0.35 м для 62% річних інтервалів та швидким спаданням N_y зі збільшенням $|O-C|$ в цілому (рис.4, 6).

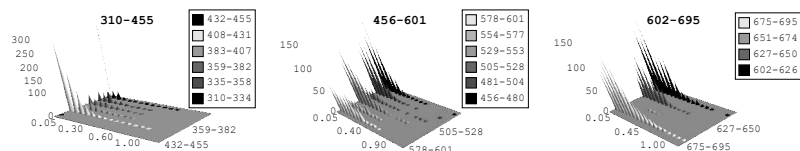


Рис. 6. Розподіл N_y , отриманих станцією «Кацівелі», по $|O-C|$

В розподілах кількості спостережень N_y по $|O-C|$, отриманих станцією «Кацівелі» на річних

інтервалах 310-334, 335-358, 383-407, 505-528 та 627-650, спостерігається зміщення максимумів від нуля на 0.15 м. Річні інтервали 481-504 та 529-553 характеризуються зміщеннями максимума розподілу відносно нуля на 0.10 м, річні інтервали 554-577 та 675-695 - зміщенням на 0.20 м, інтервал 578-601 - зміщенням на 0.25 м. В розподілі для річного інтервала 651-674 спостерігається додатковий максимум N_y по $|O-C|$ на 0.35 м.

Таким чином, аналіз розподілів кількості спостережень, отриманих ЛЛС-станціями за період дослідження та на річних інтервалах, по $|O-C|$ дозволив констатувати наявність систематичних зсувів в результатах вимірювань відстаней до ШСЗ та пов'язати їх виникнення 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 визначались для періоду дослідження (I), на річних інтервалах (II) та на коротких 15-добових інтервалах (III).

I) Координати українських ЛЛС-станцій X_t , Y_t , Z_t визначались на повному інтервалі спостережень. Інформація про періоди спостережень кожної зі станцій та відповідні їм кількості спостережень N_t і статистично значимих спостережень n_t , а також відсоток статистично значимих спостережень від загальної кількості спостережень K_t і отримані оцінки координат станцій, приведені в табл. 3.

Табл. 3. Оцінки координат українських ЛЛС-станцій, визначені за період дослідження

Станція	Період	N_t	n_t	$K_t, \%$	$X_t, \text{ м}$	$Y_t, \text{ м}$	$Z_t, \text{ м}$
«Голосіїв-Київ»	603-695	1359	494	36.35	3512989.333 ± 0.009	2068968.688 ± 0.010	4888817.313 ± 0.009
«Львів»	627-695	757	491	64.86	3760674.794 ± 0.011	1670776.279 ± 0.012	4857165.413 ± 0.010
«Сімеїз»	310-695	6105	2895	47.42	3783902.527 ± 0.005	2551404.958 ± 0.005	4441257.646 ± 0.004
«Кацівелі»	310-695	5630	4077	72.42	3785944.652 ± 0.003	2550780.624 ± 0.003	4439461.459 ± 0.003

За визначенням, якщо розподіл спостережень близький до нормального, то в межі критерію 3σ повинно попадати 95% спостережень. Отримані для

кожної зі станцій оцінки $K_t \leq 95\%$. Це є наслідком систематичних похибок в результатах спостережень, пов'язаних зі збоями в роботі апаратних комплексів станцій і проявилось раніше (рис. 3, 4, 5) як відхилення розподілів спостережень від нормального (поява додаткових максимумів, зміщення максимумів). Фактично K_t (а далі також K_y, K_d) є «коефіцієнтом корисної дії» станції.

II) Координати українських ЛЛС-станцій X_y, Y_y, Z_y визначались на річних інтервалах. Інформація про кількість спостережень на річних інтервалах N_y та відповідні їм кількості статистично значимих спостережень n_y , відсоток статистично значимих спостережень від загальної кількості спостережень K_y та отримані оцінки координат станцій приведені в табл. 4.

Табл. 4. Оцінки координат українських ЛЛС-станцій, визначені на річних інтервалах.

Станція	Період	N_y	n_y	$K_y, \%$	$X_y, \text{ м}$	$Y_y, \text{ м}$	$Z_y, \text{ м}$
«Голосіїв-Київ»	602-626	627	350	52.82	3512989.329 ± 0.012	2068968.690 ± 0.012	4888817.308 ± 0.010
	627-650	181	29	16.02	3512989.255 ± 0.045	2068968.69 4 ± 0.059	4888817.399 ± 0.057
	651-674	236	32	13.56	3512989.415 ± 0.037	2068968.65 5 ± 0.036	4888817.315 ± 0.040
	675-695	314	83	26.43	3512989.358 ± 0.018	2068968.65 3 ± 0.026	4888817.266 ± 0.027
«Львів»	627-650	143	86	60.14	3760674.653 ± 0.022	1670776.301 ± 0.036	4857165.557 ± 0.024
	651-674	70	39	55.71	3760674.748 ± 0.046	1670776.213 ± 0.050	4857165.406 ± 0.041
	675-695	480	366	76.25	3760674.869 ± 0.012	1670776.279 ± 0.011	4857165.35 2 ± 0.011

Продовження табл. 4.

Станція	Період	N_y	n_y	$K_y, \%$	$X_y, м$	$Y_y, м$	$Z_y, м$
«Сімеїс»	310-334	44	20	45.45	3783902.408 ± 0.058	2551404.884 ± 0.074	4441257.519 ± 0.065
	335-358	826	596	72.15	3783902.507 ± 0.013	2551404.975 ± 0.009	4441257.629 ± 0.006
	359-382	401	230	57.36	3783902.481 ± 0.016	2551404.002 ± 0.016	4441257.656 ± 0.015
	383-407	261	200	76.63	3783902.481 ± 0.016	2551404.957 ± 0.014	4441257.659 ± 0.014
	408-431	335	15	4.48	3783902.635 ± 0.036	2551404.043 ± 0.019	4441257.842 ± 0.019
	432-455	145	7	4.83	3783902.716 ± 0.062	2551404.986 ± 0.056	4441257.704 ± 0.071
	456-480	435	244	56.09	3783902.524 ± 0.018	2551404.966 ± 0.019	4441257.574 ± 0.021
	481-504	300	233	77.67	3783902.561 ± 0.018	2551404.971 ± 0.021	4441257.706 ± 0.010
	505-528	202	82	40.59	3783902.566 ± 0.022	2551404.040 ± 0.025	4441257.754 ± 0.021
	529-553	483	309	63.98	3783902.592 ± 0.018	2551404.017 ± 0.019	4441257.668 ± 0.017
	554-577	0	0				
	578-601	183	131	71.58	3783902.567 ± 0.023	2551404.970 ± 0.018	4441257.638 ± 0.020
	602-626	566	278	49.12	3783902.584 ± 0.016	2551404.946 ± 0.015	4441257.559 ± 0.016
	627-650	325	164	50.46	3783902.489 ± 0.015	2551404.968 ± 0.014	4441257.564 ± 0.016
	651-674	717	149	26.78	3783902.507 ± 0.016	2551404.972 ± 0.016	4441257.627 ± 0.027
	675-695	882	237	26.87	3783902.499 ± 0.013	2551404.950 ± 0.012	4441257.539 ± 0.012

Продовження табл. 4.

Станція	Період	N_y	n_y	$K_y, \%$	$X_y, \text{ м}$	$Y_y, \text{ м}$	$Z_y, \text{ м}$
«Кацівелі»	310-334	163	126	77.30	3785944.620 ± 0.017	2550780.680 ± 0.013	4439461.377 ± 0.010
	335-358	179	147	82.12	3785944.517 ± 0.018	2550780.590 ± 0.016	4439461.516 ± 0.010
	359-382	226	131	57.96	3785944.765 ± 0.026	2550780.687 ± 0.023	4439461.514 ± 0.010
	383-407	179	124	69.27	3785944.677 ± 0.020	2550780.668 ± 0.014	4439461.699 ± 0.012
	408-431	687	629	91.56	3785944.678 ± 0.007	2550780.636 ± 0.006	4439461.513 ± 0.004
	432-455	1	0				
	456-480	480	413	86.04	3785944.734 ± 0.011	2550780.691 ± 0.010	4439461.466 ± 0.012
	481-504	482	410	85.06	3785944.713 ± 0.010	2550780.595 ± 0.012	4439461.520 ± 0.006
	505-528	122	91	74.59	3785944.651 ± 0.028	2550780.669 ± 0.022	4439461.514 ± 0.026
	529-553	571	413	72.33	3785944.648 ± 0.009	2550780.601 ± 0.012	4439461.382 ± 0.009
	554-577	132	78	59.09	3785944.616 ± 0.018	2550780.739 ± 0.026	4439461.362 ± 0.011
	578-601	366	234	63.93	3785944.633 ± 0.012	2550780.634 ± 0.014	4439461.394 ± 0.014
	602-626	782	506	64.71	3785944.669 ± 0.009	2550780.607 ± 0.009	4439461.397 ± 0.010
	627-650	501	326	65.07	3785944.684 ± 0.011	2550780.587 ± 0.010	4439461.357 ± 0.009
	651-674	6	0				
	675-695	753	448	59.50	3785944.642 ± 0.008	2550780.648 ± 0.008	4439461.318 ± 0.008

Варіації X_y , Y_y , Z_y (з врахуванням цілих значень) відображені на рис. 7. Суцільними лініями поєднані оцінки координат, отримані на послідовних річних інтервалах. Тонкими лініями відображено середні значення координат ЛЛС-станцій.

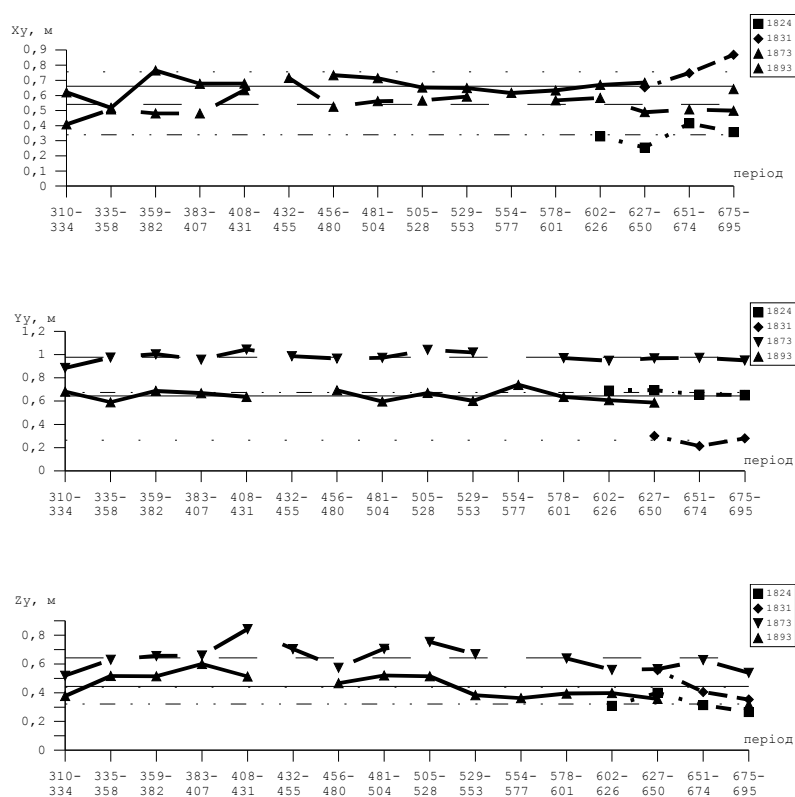


Рис. 7. Варіації оцінок координат українських ЛЛС-станцій з річним кроком

Діапазон змін X_y , Y_y , Z_y наведено в табл. 5. Варіації координат, отриманих з річним кроком, перевищують похибки їх визначення. Це свідчить, з одного боку, про недостатню кількість і якість спостережень, які отримують станції, а з іншого – про наявність реальних варіацій положень станції.

Табл. 5. Діапазон змін координат українських ЛЛС-станцій з річним кроком

Станція	$X_{y_{\max}} - X_{y_{\min}}$, м	$Y_{y_{\max}} - Y_{y_{\min}}$, м	$Z_{y_{\max}} - Z_{y_{\min}}$, м
«Голосіїв-Київ»	0,160	0,041	0,133
«Львів»	0,216	0,088	0,205
«Сімеїз»	0,308	0,159	0,323
«Кацівелі»	0,248	0,152	0,283

Як вказувалось в [1], варіації оцінок координат X_y , Y_y вказують на існування великих систематичних похибок служб часу ЛЛС-станцій.

Коливання оцінок координат Z_y є наслідком неврахованих апаратних затримок в результатах спостережень. Причинами їх виникнення є нестабільність роботи систем калібровок на ЛЛС-станціях. Зокрема, це проявилось як зміщення максимумів розподілів кількості спостережень по $|O-C|$ (рис. 4-6).

Не виявлено існування трендів та зсувів у варіаціях оцінок координат, визначених на річних інтервалах.

За отриманими річними оцінками координат X_y , Y_y , Z_y були визначені середні значення координат станцій за період дослідження \bar{X}_y , \bar{Y}_y , \bar{Z}_y . Інформація про інтервали спостережень кожної зі станцій та відповідні їм кількості спостережень N_y , кількості статистично значимих спостережень n_y , відсоток статистично значимих спостережень від

загальної кількості спостережень K_y та отримані оцінки координат станцій приведені в табл. 6.

Табл. 6. Середні значення координат станцій за період дослідження $\bar{X}_y, \bar{Y}_y, \bar{Z}_y$

Станція	Період	N_y	n_y	$K_y, \%$	$\bar{X}_{y, M}$	$\bar{Y}_{y, M}$	$\bar{Z}_{y, M}$
«Голосіїв-Київ»	603-695	1359	494	36.35	3512989.339 ± 0.036	2068968.673 ± 0.043	4888817.322 ± 0.044
«Львів»	627-695	757	491	64.86	3760674.757 ± 0.037	1670776.264 ± 0.044	4857165.438 ± 0.035
«Сімеїз»	310-695	6105	2895	47.42	3783902.541 ± 0.030	2551404.976 ± 0.030	4441257.643 ± 0.031
«Кацівели»	310-695	5630	4076	72.42	3785944.661 ± 0.016	2550780.645 ± 0.016	4439461.445 ± 0.012

III) Координати українських ЛЛС-станцій X_d, Y_d, Z_d визначались на 15-добових інтервалах. Дані про кількість спостережень на 15-добових інтервалах N_d та відповідні їм значення n_d, K_d і оцінки координат станцій не приводяться, що пов'язано з їх великим об'ємом.

Зміни X_d, Y_d, Z_d ЛЛС-станцій по 15-добовим інтервалам представлені на рис. 8-11. Суцільними лініями поєднані оцінки координат, отримані на послідовних інтервалах. Тонкими пунктирними лініями відображено середні значення координат ЛЛС-станцій.

Зазначимо, що 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). В аналіз не включались визначені на 15-добових інтервалах координати станцій, якщо відхилення хоча б однієї з координат від її

середнього значення перевищувало 1 м (критерій 3, додаткові викиди).

Координати станції «Голосіїв-Київ» не визначались на 15-добових інтервалах 606, 637, 687 (згідно критерію 1); 662 (за критерієм 2); 630 (у відповідності до критерію 3). Оцінки координат станції не були визначені на 15-добових інтервалах 646-647, 649-653, 656-659, 663-664, 667-668, 679-682, 685-686, 688, 690-691, 694 через відсутність значимих спостережень, що є наслідком збою в роботі системи калібровки станції і проявилось у зміщенні максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ на відповідних інтервалах (рис. 2).

Координати станції «Львів» не визначались на 15-добових інтервалах 678 (згідно критерію 1); 653, 665 (згідно критерію 2). Оцінки координат станції не були визначені на інтервалах 639 і 689 через відсутність значимих спостережень.

Координати станції «Сімеїз» не визначались на 15-добових інтервалах 329, 356, 363, 371, 393, 397, 419, 437, 440, 443, 446, 453, 519-521, 599, 601, 605, 610, 612, 630, 660-661, 678, 685 - (згідно критерію 1); 323, 326, 337, 398, 402, 471, 492, 494, 514, 518, 545, 548, 593, 638 (за критерієм 2); 491 і 597 (керуючись критерієм 3). Оцінки координат станції не були визначені на інтервалах 328, 421-423, 425-426, 438, 465, 517, 591, 637, 657, 670, 672-676, 679, 686, 691, 694-695 через відсутність значимих спостережень, що є наслідком збою в роботі системи калібровки станції і проявилось у зміщенні максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ (рис. 2).

Координати станції «Кацівелі» не визначались на 15-добових інтервалах 433, 474-475, 595, 645, 649, 684 (згідно критерію 1); 316, 319, 374, 427, 428, 516, 523, 528, 586, 593, 597, 618, 631, 643 (за критерієм 2); 380, 472, 685 (згідно критерію 3). Оцінки координат станції не були визначені на інтервалах 372, 392, 517, 540, 640, 644, 655 через відсутність на них значимих спостережень.

Інформація про загальну кількість 15-добових

інтервалів за період спостережень кожної зі станцій L, про кількість 15-добових інтервалів, на яких станціями проводились спостереження L_0 та про кількість 15-добових інтервалів, на яких були отримані оцінки координат станцій L_c представлена в табл. 10. Відмітимо, що 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. Цей факт підтверджується порівнянням рис. 2 з рис. 8-11.

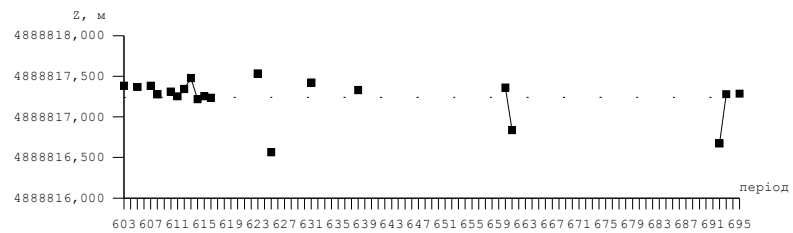
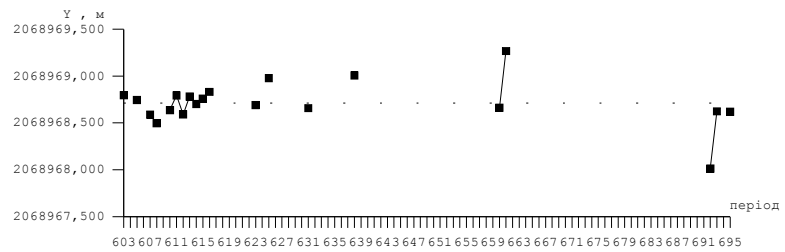
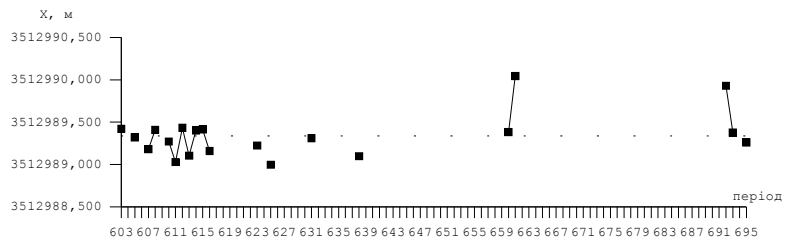


Рис. 8. Варіації координат станції «Голосіїв-Київ», визначених на 15-добових інтервалах

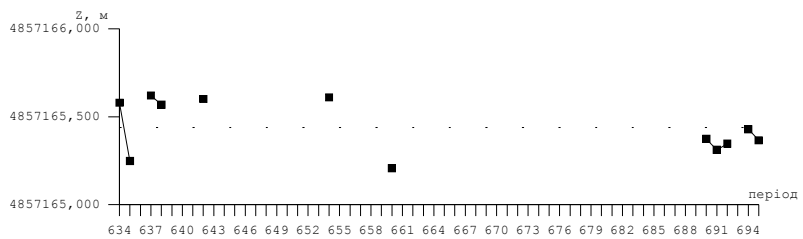
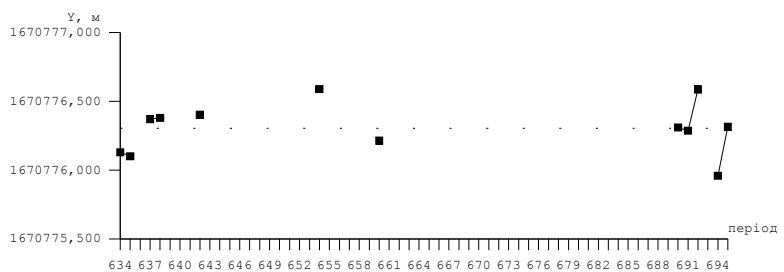
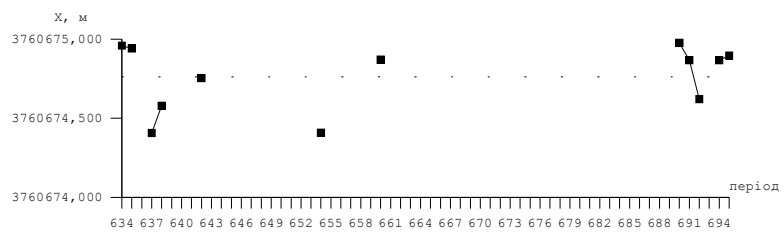


Рис. 9. Варіації координат станції «Львів», визначених на 15-добових інтервалах

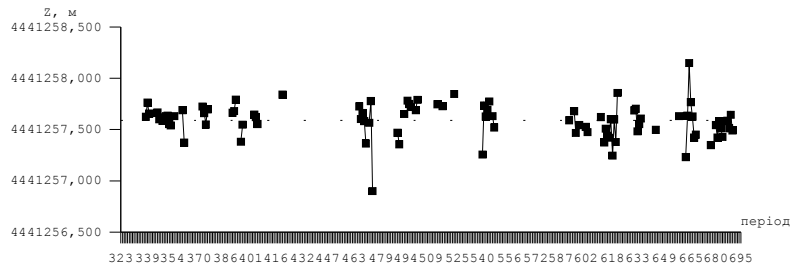
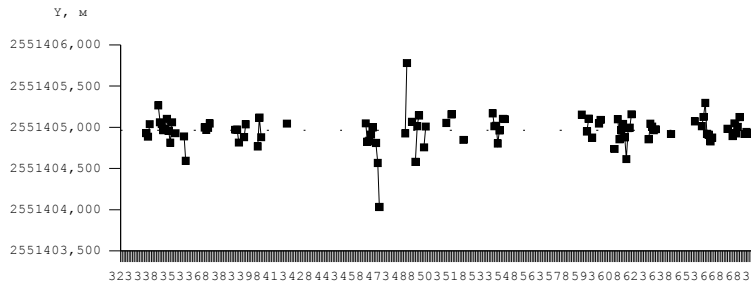
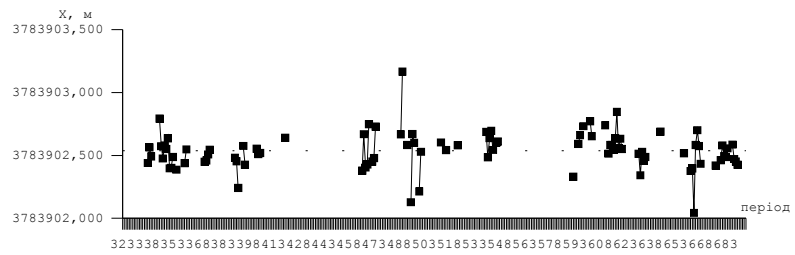


Рис. 10. Варіації координат станції «Сімеїз», визначених на 15-добових інтервалах

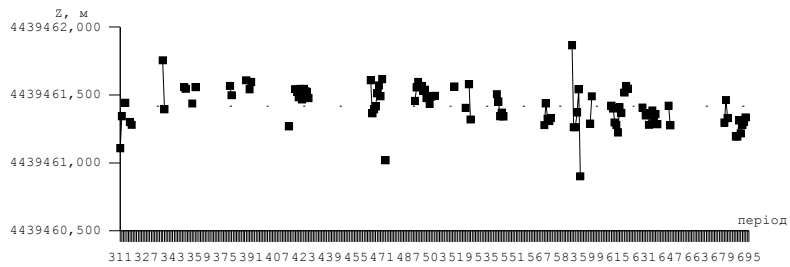
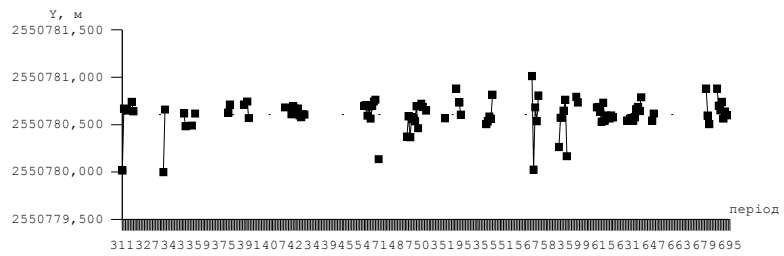
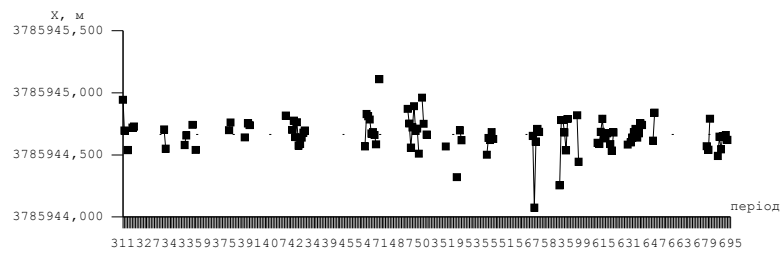


Рис. 11. Варіації координат станції «Кацівелі», визначених на 15-добових інтервалах

Діапазон змін X_d , Y_d , Z_d наведено в табл. 7. 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, як і в **II**), недостатньою кількістю і якістю спостережень, які отримують станції.

Табл. 7. Діапазон змін координат українських ЛЛС-станцій, визначених з 15-добовим кроком

Станція	Період	$X_{d_{max}} - X_{d_{min}}$, м	$Y_{d_{max}} - Y_{d_{min}}$, м	$Z_{d_{max}} - Z_{d_{min}}$, 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

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.

По розподілу отриманих оцінок координат станції «Голосіїв-Київ» можна виявити два періоди тривалістю 1-2 роки в роботі станції: 603-616, 623-695. Виявлено систематичні складові для координат X_d , Y_d , Z_d , які для періоду 603-616 становлять відповідно -0.052 м, -0.010 м, 0.079 м, а для періоду 623-695 є рівними 0.064 м, 0.012 м, -0.096 м. Причини виявлення систематичних зсувів на даному етапі дослідження встановити неможливо, оскільки їх значення не перевищують похибки визначення координат станції.

Аналіз розподілу оцінок X_d , Y_d , Z_d 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 (табл. 7). Це повністю узгоджується з періодами роботи станції 310-407, 408-553, 554-695, виділеними за результатами аналізу розподілів N_y по $|O-C|$, отриманих станцією на річних інтервалах (рис. 5). Період 323-405 характеризується найменшим діапазоном змін оцінок координат станції. Відсутність оцінок координат протягом періоду 408-455 є наслідком зміщення максимумів в розподілах N_y по $|O-C|$ на 0.5-0.6 м за цей період. Для періода 466-547 є характерною велика амплітуда коливань оцінок координат станції: діапазон змін координат станції майже в 2 рази перевищує аналогічний показник для X_d , Z_d та майже в 3 рази - для Y_d . Це є відображенням зміщення максимумів розподілів N_y по $|O-C|$ на 0.10 м, характерного для інтервалу 456-553. Період 592-695 відзначається зменшенням амплітуди коливань X_d в 0.77 разів по відношенню до попереднього періоду та Y_d до рівня, характерного для періоду 323-405. Амплітуда змін Z_d залишилась такою ж, як і для попереднього періоду. Такі амплітуди коливань X_d та Z_d є наслідком зміщення максимумів розподілів N_y

по $|O-C|$ на 0.15 м і 0.25 м для річних інтервалів 602-626 та 675-695 відповідно та появи додаткового максимуму на річному інтервалі 651-674. Виявлено систематичні складові для координат X_d , Y_d , Z_d , які для періоду 310-405 становлять відповідно -0.037 м, -0.002 м, 0.030 м, для періоду 466-547 є рівними 0.034 м, -0.020 м, 0.025 м, для періоду 592-695 становлять 0.001 м, 0.013 м, -0.042 м. Причини виявлення цих систематичних зсувів встановити неможливо, так як їх значення не перевищують похибки визначення координат станції.

Виходячи з розподілу отриманих оцінок координат станції «Кацівелі» можна виділити чотири періоди в роботі станції: 310-426, 464-545, 570-647, 680-695 (табл. 7). Для періода 464-545 є характерним збільшення амплітуди коливань X_d в 1.95 раза в порівнянні з аналогічною величиною попереднього періоду. Період 570-599 відзначається збільшенням амплітуди коливань Y_d в 1.33 раза та Z_d в 1.58 разів по відношенню до попереднього періоду. Період 611-695 відзначається найнижчим діапазоном змін координат станції (до 0.374 м). Виявлена систематична складова в коливаннях Z_d за весь період спостережень станції, яка носить синусоїдальний характер. Систематичні зсуви для координат X_d , Y_d , Z_d для періоду 310-426 становлять відповідно 0.022 м, -0.019 м, 0.060 м, для періоду 464-545 є рівними 0.027 м, 0.000 м, 0.050 м, для періоду 570-647 становлять -0.026 м, -0.005 м, -0.051 м, для періоду 570-647 дорівнюють -0.049 м, 0.069 м, -0.121 м. Причини виявлення систематичних зсувів встановити неможливо, оскільки їх значення не перевищують похибки визначення координат станції.

За отриманими X_d , Y_d , Z_d були визначені середні значення координат станцій за період дослідження \bar{X}_d , \bar{Y}_d , \bar{Z}_d . Інформація про інтервали спостережень кожної зі станцій, кількість спостережень N_d , кількість статистично значимих

спостережень n_d , відсоток статистично значимих від загальної кількості спостережень K_d та отримані оцінки координат станцій, приведені в табл. 8.

Табл. 8. Середні оцінки координат ЛЛС-станцій, отримані на основі 15-добових визначень координат

Станція	Період	N_d	n_d	$K_d, \%$	$\bar{X}_{d, M}$	$\bar{Y}_{d, M}$	$\bar{Z}_{d, M}$
«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

Оцінки X_t, Y_t, Z_t (табл. 3), $\bar{X}_y, \bar{Y}_y, \bar{Z}_y$ (табл. 6) та $\bar{X}_d, \bar{Y}_d, \bar{Z}_d$ (табл. 8) співпадають в межах похибок. Це свідчить про реальність отриманих оцінок координат станцій на інтервалі дослідження на епоху 1997.0. Виявлено суттєві варіації оцінок X_y, Y_y, Z_y та X_d, Y_d, Z_d , 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, Y_y, Z_y (як і X_d, Y_d, Z_d) 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 на річних інтервалах X_y , Y_y , Z_y були зроблені оцінки стабільності визначення координат σ_{x_y} , σ_{y_y} , σ_{z_y} та оцінки загальної стабільності σ_y кожної з ЛЛС-станцій за період дослідження за описаною в [1, 5] методикою. Інформація про періоди спостережень кожної зі станцій, про загальну кількість річних інтервалів за період спостережень кожної зі станцій L_y , про кількість річних інтервалів, на яких станціями проводились спостереження L_{o_y} , про кількість річних інтервалів, на яких були отримані оцінки координат станцій L_{c_y} та отримані оцінки стабільності визначень координат станцій σ_{x_y} , σ_{y_y} , σ_{z_y} , σ_y приведені в табл. 9.

Табл. 9. Оцінки стабільності визначення координат ЛЛС-станцій, отримані по X_y , Y_y , Z_y

Станція	Період	L_y	L_{o_y}	L_{c_y}	σ_{x_y} , м	σ_{y_y} , м	σ_{z_y} , м	σ_y , м
«Голосіїв-Київ»	602-695	4	4	4	0,067	0,022	0,057	0,052
«Львів»	627-695	3	3	3	0,108	0,046	0,106	0,097
«Сімеїз»	310-695	16	15	15	0,074	0,039	0,106	0,091
«Кацівелі»	310-695	16	14	14	0,060	0,047	0,084	0,066

На основі отриманих значень координат станцій на 15-добових інтервалах X_d , Y_d , Z_d були зроблені оцінки стабільності визначення координат σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} та оцінки загальної стабільності σ_d кожної з

ЛЛС-станцій на річних інтервалах та за період дослідження. Інформація про інтервали спостережень кожної зі станцій та відповідні їм загальну кількість 15-добових інтервалів L_d , про кількість 15-добових інтервалів, на яких проводились спостереження L_{o_d} , про кількість 15-добових інтервалів, на яких були отримані оцінки координат станцій L_{c_d} , та отримані оцінки стабільності визначень координат станцій σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d приведені в табл. 10. Отримані значення свідчать про те, що стабільність визначення координат ЛЛС-станції «Кацівелі» є найкращою в порівнянні з оцінками, отриманими для інших українських ЛЛС-станцій.

Табл. 10. Оцінки стабільності визначення координат ЛЛС-станцій, отримані по X_d , Y_d , Z_d

Станція	Період	L_d	L_{o_d}	L_{c_d}	σ_{x_d} , м	σ_{y_d} , м	σ_{z_d} , м	σ_d , м
«Голосіїв-Київ»	602-626	25	15	13	0.155	0.125	0.234	0.177
	627-650	24	8	2	0.150	0.247	0.060	0.171
	651-674	24	14	2	0.467	0.428	0.369	0.423
	675-695	21	14	3	0.357	0.351	0.351	0.353
	602-695	94	51	20	0.260	0.240	0.253	0.251
«Львів»	627-650	24	6	5	0.237	0.148	0.155	0.185
	651-674	24	4	2	0.327	0.266	0.285	0.294
	675-695	21	8	5	0.133	0.223	0.043	0.152
	627-695	69	18	12	0.200	0.173	0.131	0.170

Продовження табл.10.

Станція	Період	L_d	L_{o_d}	L_{c_d}	$\sigma_{x_d}, \text{ м}$	$\sigma_{y_d}, \text{ м}$	$\sigma_{z_d}, \text{ м}$	$\sigma_d, \text{ м}$
«Сімейз»	310-334	25	4	0				
	335-358	24	16	13	0.113	0.113	0.055	0.098
	359-382	24	8	6	0.049	0.166	0.134	0.126
	383-407	25	12	8	0.105	0.116	0.120	0.114
	408-431	24	7	1				
	432-455	24	7	0				
	456-480	25	10	8	0.153	0.325	0.280	0.263
	481-504	24	11	8	0.316	0.351	0.157	0.287
	505-528	24	9	3	0.031	0.158	0.065	0.100
	529-553	25	9	7	0.075	0.116	0.175	0.129
	554-577	24	0	0				
	578-601	24	10	4	0.175	0.130	0.089	0.136
	602-626	25	15	12	0.103	0.159	0.156	0.142
	627-650	24	9	6	0.113	0.066	0.094	0.093
	651-674	24	16	8	0.198	0.155	0.272	0.214
	675-695	21	19	10	0.061	0.071	0.088	0.074
	335-695	386	162	94	0.146	0.183	0.162	0.165

Продовження табл.10.

<i>Станція</i>	<i>Період</i>	L_d	L_{o_d}	L_{c_d}	$\sigma_{x_d}, \text{ м}$	$\sigma_{y_d}, \text{ м}$	$\sigma_{z_d}, \text{ м}$	$\sigma_d, \text{ м}$
«Кацівелі»	310-334	25	7	5	0.144	0.297	0.122	0.203
	335-358	24	7	6	0.085	0.245	0.125	0.166
	359-382	24	5	2	0.044	0.060	0.049	0.051
	383-407	25	5	3	0.062	0.093	0.035	0.067
	408-431	24	12	10	0.043	0.016	0.074	0.050
	432-455	24	1	0				
	456-480	25	12	9	0.166	0.193	0.183	0.181
	481-504	24	11	11	0.134	0.120	0.051	0.108
	505-528	24	8	4	0.162	0.142	0.126	0.144
	529-553	25	6	5	0.067	0.123	0.073	0.091
	554-577	24	5	5	0.266	0.372	0.061	0.266
	578-601	24	12	8	0.205	0.232	0.278	0.240
	602-626	25	11	10	0.072	0.067	0.116	0.088
	627-650	24	17	11	0.077	0.078	0.051	0.070
	651-674	24	1	0				
	675-695	21	12	10	0.077	0.127	0.080	0.099
	310-695	386	132	99	0.134	0.166	0.145	0.149

Варіації отриманих оцінок стабільності визначення координат σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d показані на рис. 12. Вони є найбільшими для станції «Голосіїв-Київ» і становлять 0.5 м. Коливання оцінок σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d станцій «Львів», «Сімеїз», «Кацівелі» не перевищують 0.375 м. Зміна оцінок стабільності визначення координат станції «Сімеїз» підтверджує висновок про виявлені періоди нестабільності роботи станції за варіаціями X_d , Y_d , Z_d . Коливання оцінок σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d станції «Кацівелі» вказують на існування трьох таких періодів. Періоди 310-431 та 675-695 співпадають з тими, що були виявлені з аналізу варіацій X_d , Y_d , Z_d . Період 456-650 фактично об'єднує визначені раніше інтервали 464-545 і 570-647, проте коливання σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d чітко вказують на існування скачка оцінок стабільності на інтервалі 529-553. Це підтверджує зроблене раніше припущення щодо існування чотирьох характерних інтервалів в роботі цієї станції.

Оцінки σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d отримані на основі 15-добових визначень X_d , Y_d , Z_d (табл. 9), та оцінки σ_{x_y} , σ_{y_y} , σ_{z_y} , σ_y отримані на основі річних визначень X_y , Y_y , Z_y (табл. 10), для однакових інтервалів не співпадають. Причини цього полягають в наступному.

- Діапазон змін координат X_d , Y_d , Z_d є більшим, ніж для X_y , Y_y , Z_y (табл. 5, 7).
- На окремих 15-добових інтервалах X_d , Y_d , Z_d визначаються невпевнено (похибка на порядок більша від аналогічних річних визначень координат, недостатня кількість спостережень, низька якість спостережень).
- Оцінки σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d та σ_{x_y} , σ_{y_y} , σ_{z_y} , σ_y базуються на різних вибірках спостережень.
- Оцінки стабільності за [5] є функціями кількості визначень координат, проте не відображають якість отриманих оцінок. Відмітимо, що оцінка стабільності за [5] 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.

Зважаючи на вищесказане, ми вважаємо, що σ_{x_d} , σ_{y_d} , σ_{z_d} , σ_d є більш реальними оцінками стабільності визначення координат порівняно з σ_{x_y} , σ_{y_y} , σ_{z_y} , σ_y . 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 наведеним в [5] критерієм це на порядок нижче оцінки стабільності визначень координат для базових станцій міжнародної мережі та свідчить про низьку стабільність визначення координат українських ЛЛС-станцій в цілому.

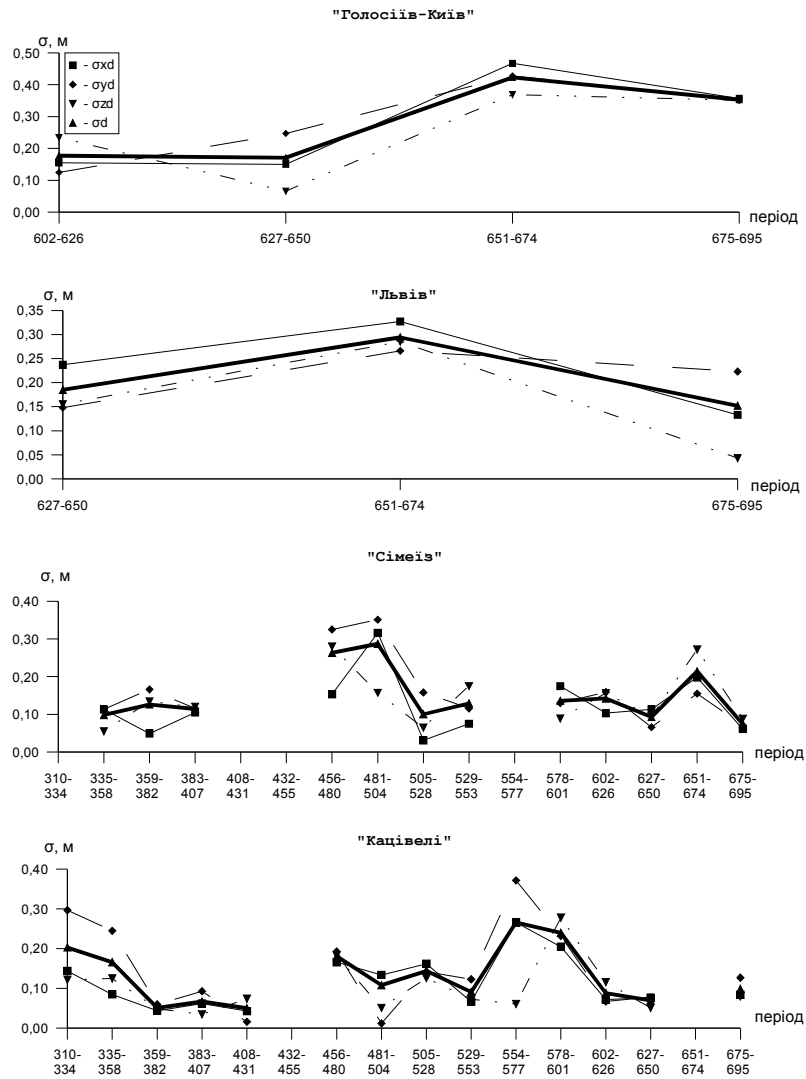


Рис. 12. Варіації оцінок стабільності визначення координат українських ЛЛС-станцій

6. Висновки

В результаті даного дослідження встановлено низьку в цілому 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 діб) 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.

З аналізу розподілів кількості спостережень, отриманих ЛЛС-станціями за весь період дослідження та на річних інтервалах, по $|O-C|$ дозволило констатувати наявність систематичних зсувів в результатах вимірювань дальностей 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 15-добових інтервалах. Виявлено суттєві варіації оцінок координат, визначених на 15-добових інтервалах. Вказані причини виявлених варіацій, зокрема наявність систематичних зсувів у спостереженнях окремих станцій.

Встановлено, що оцінки координат станцій є нерівноточними, 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. Яцків Я.С., Болотіна 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.
3. IERS Conventions (1996) // Ed. D.D. McCarthy.- Paris: Observatoire de Paris, 1996.-95 p.- (Technical Note 21).
4. 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.
5. 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.