

УДК 520.874.7

О. В. Болотина, М. М. Медведский, В. Р. Суберляк

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680, ГСП, Ул. Академика Заболотного, 27

О стабильности работы лазерного спутникового дальномера «Голосиив—Киев»

Исследовалась стабильность работы лазерного спутникового дальномера (ЛСД) «Голосиив—Киев» по данным обработки результатов наблюдений спутников «Lageos-1» и «Lageos-2», полученных за период 24.01.01—31.12.01. Анализировались координаты ЛСД, вычисленные на 15-суточных орбитальных дугах. Получена оценка стабильности координат дальномера $\sigma = 0.168$ м. Указаны причины, влияющие на стабильность работы ЛСД «Голосиив—Киев».

ПРО СТАБІЛЬНІСТЬ РОБОТИ ЛАЗЕРНОГО СУПУТНИКОВОГО ВІДДАЛЕМІРА «ГОЛОСІІВ—КІЇВ», Болотина О. В., Медведський М. М., Суберляк В. Р. — Досліджувалась стабільність роботи лазерного спутникового віддалеміра (ЛСВ) «Голосіїв—Київ» за даними обробки результатів спостережень супутників «Lageos-1» і «Lageos-2», отриманих за період 24.01.01—31.12.01. Аналізувались координати ЛСВ, порашовані на 15-добових орбітальних дугах. Отримано оцінку стабільності координат віддалеміра $\sigma = 0.168$ м. Вказано причини, які впливають на стабільність роботи ЛСВ «Голосіїв—Київ».

ON STABILITY OF THE «GOLOSIIV-KIEV» SATELLITE LASER RANGING STATION, by Bolotina O. V., Medvedskii M. M., Suberlyak V. R. — We investigated the stability of the «Golosiiv-Kiev» satellite laser ranging (SLR) station on the basis of the results of reducing the Lageos-1 and Lageos-2 observations during 24.01.01—31.12.01. The coordinates of the SLR station were calculated on 15-day orbital arcs and analyzed. We obtained that the estimate of the stability of the SLR station coordinates $\sigma = 0.168$ m. The factors influencing on the «Golosiiv-Kiev» SLR stability were described.

Исследовалась стабильность работы лазерного спутникового дальномера (ЛСД) «Голосиив—Киев» по данным обработки результатов наблюдений, полученных в 2001 г. Согласно требованиям международной службы лазерной локации IIRS каждый зарегистрированный в международной сети дальномер должен иметь точность одного измерения не хуже 10 см. Также имеется ряд требований по стабильности получаемых измерений дальностей

к ИСЗ. Под стабильностью работы ЛСД подразумевается:

- непрерывность наблюдений (разрыв не более 1 недели);
- отсутствие систематических сдвигов, трендов измеряемых дальностей, а также сбоев в работе аппаратуры, которые могут привести к искажению результатов.

Целью исследования являлось выяснение возможных источников ошибок и причин, которые могут привести к нестабильной работе ЛСД. Подобные исследования можно проводить различными способами. Данные результаты получены из анализа координат ЛСД, вычисленных на коротких интервалах времени (15 сут).

В работе использовались результаты лазерной локации спутников «Lageos-1» и «Lageos-2», полученные на лазерном спутниковом дальнометре «Голосиив—Киев» (номер CDP 1824) за период 24.01.01—31.12.01. Наблюдения обрабатывались программным комплексом «Киев—Геодинамика 5.2» [4].

Результаты обработки измеренных дальностей (нормальных точек) получены в системе SSC(GAOUA)01L01. Решение SSC(GAOUA)01L01 выведено из обработки глобальной сети наблюдений спутников «Lageos-1» и «Lageos-2» за периоды 01.09.83—31.12.01 и 24.10.92—31.10.01 соответственно. Система фиксируется координатами 119 станций лазерной локации на эпоху 01.01.97 (MJD 50449); скоростями 66 станций с хорошей историей наблюдений, расположенными на 42 сайтах; параметрами орбит спутников на 15-суточных орбитальных дугах; рядом параметров вращения Земли ПВЗ (X_p , Y_p , UT—UTC) с трехдневным шагом на интервале MJD 45583 — MJD 52270. Земная система координат привязана к ITRF96 фиксацией долготы и широты станции «Вашингтон» (номер CDP 7105) и широты станции «Мауи» (номер CDP 7210). Скорости 53 станций моделировались согласно модели NNR-NUVEL-1A. Применялись рекомендованные IERS Conventions (1996) модели и алгоритмы за следующими исключениями [2, 5]:

- короткопериодические приливные вариации в ПВЗ моделировались согласно [3];
- тепловое и отраженное Землей излучения включены в модель сил.

В дальнейшем элементы орбит спутников, ПВЗ, координаты и скорости всех станций, за исключением координат ЛСД 1824, фиксировались. Полученные в [1] координаты ЛСД были приняты за начальные. Интервал наблюдений 24.01.01—31.12.01 разбивался на 15-суточные орбитальные дуги, на которых определялись координаты дальнометра «Голосиив—Киев». Наблюдения «Lageos-1» и «Lageos-2» обрабатывались совместно, что являлось следствием незначительного количества наблюдений каждого из спутников в отдельности или отсутствия наблюдений одного из объектов на заданной дуге. При вычислении координат станции применялся критерий 3-сигма, что обусловило использование большинства статистически значимых результатов наблюдений. В табл. 1 приведены индексные обозначения дуг, начальные даты 15-сут орбитальных дуг MJD_0 , общее количество N наблюдений спутников, количество n статистически значимых наблюдений спутников, значение статистики σ_3 критерия 3-сигма, средние разности $(O - C)_m$ наблюденных и вычисленных координат, геоцентрические координаты дальнометра X , Y , Z и их средние квадратичные ошибки на каждой из дуг. Рассматривались только те 15-суточные интервалы, на которых проводились наблюдения спутников «Lageos-1» и «Lageos-2» дальномером 1824. Координаты ЛСД на дуге 606 не определялись, что связано с крайне низкой интенсивностью наблюдений в этот период. Оценки координат дальнометра на дугах 609 и 611 нельзя считать достоверными, что также обуславливается недостаточным количеством наблюдений для их надежного определения.

Таблица 1. Изменение координат ЛСД «Голосив—Киев»

Орбитальная дуга	MJD ₀	N	n	σ_3	$(O - C)_m$, м	X, м	Y, м	Z, м
603	51926.5	21	21	0.451	-0.1366	3512989.427 ±0.022	2068968.811 ±0.026	4888817.385 ±0.022
605	51956.5	124	124	0.539	-0.1268	3512989.428 0.021	2068968.831 0.024	4888817.361 0.019
606	51971.5	3	—	—	—	—	—	—
607	51986.5	9	9	0.286	-0.0229	3512989.184 0.068	2068968.547 0.103	4888817.382 0.060
608	52001.5	41	41	0.793	0.0544	3512989.633 0.100	2068968.343 0.103	4888817.227 0.044
609	52016.5	4	4	1.742	0.3086	3512991.411 2.413	2068967.166 0.033	4888817.285 0.279
610	52031.5	50	50	0.944	0.0064	3512989.122 0.081	2068968.557 0.081	4888817.499 0.065
611	52046.5	5	5	0.636	0.1959	3512989.064 0.038	2068969.331 0.180	4888817.289 0.027
612	52061.5	15	15	0.511	-0.1015	3512989.383 0.014	2068968.606 0.033	4888817.642 0.038
613	52076.5	58	58	0.545	-0.0825	3512989.058 0.046	2068968.854 0.037	4888817.549 0.043
614	52091.5	107	36	0.317	0.0013	3512989.394 0.029	2068968.710 0.029	4888817.222 0.028
615	52106.5	105	103	1.027	-0.0566	3512989.377 0.040	2068968.865 0.041	4888817.188 0.046
616	52121.5	12	10	1.421	0.1201	3512989.140 0.132	2068968.775 0.194	4888817.271 0.221
623	52226.5	13	13	0.284	-0.5894	3512989.172 0.058	2068968.762 0.054	4888817.621 0.092
625	52256.5	9	9	0.341	0.0269	3512988.960 0.048	2068968.980 0.084	4888816.573 0.168

В дальнейшем анализе эти оценки не участвовали.

Значения показателей N и n на большинстве соответствующих дуг совпадают. Исключение составляют дуги 614, 615 и 616. На дуге 614 (MJD₀ = 52091.5) значимыми являются лишь 33.6 % наблюдений, что свидетельствует о систематической ошибке в результатах наблюдений на ЛСД 1824 в этот период, которая вызвана сбоями в работе системы калибровки дальномера. Характер изменения аппаратной задержки R_m (расстояния от мишени до реперной точки дальномера, измеряемого во время наблюдений) за период наблюдений показан на рис. 1. На дугах 615 и 616 соответственно только 1.9 % и 16.7 % наблюдений являются неудовлетворительными, поэтому можно считать, что они вызваны случай-

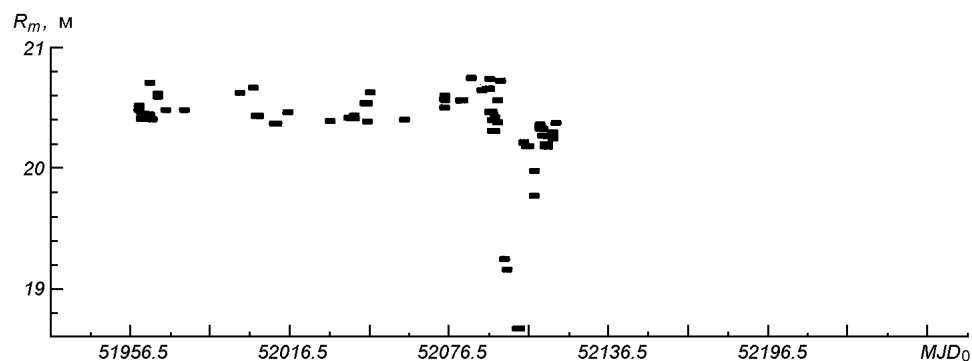


Рис. 1. Результаты измерений аппаратной задержки

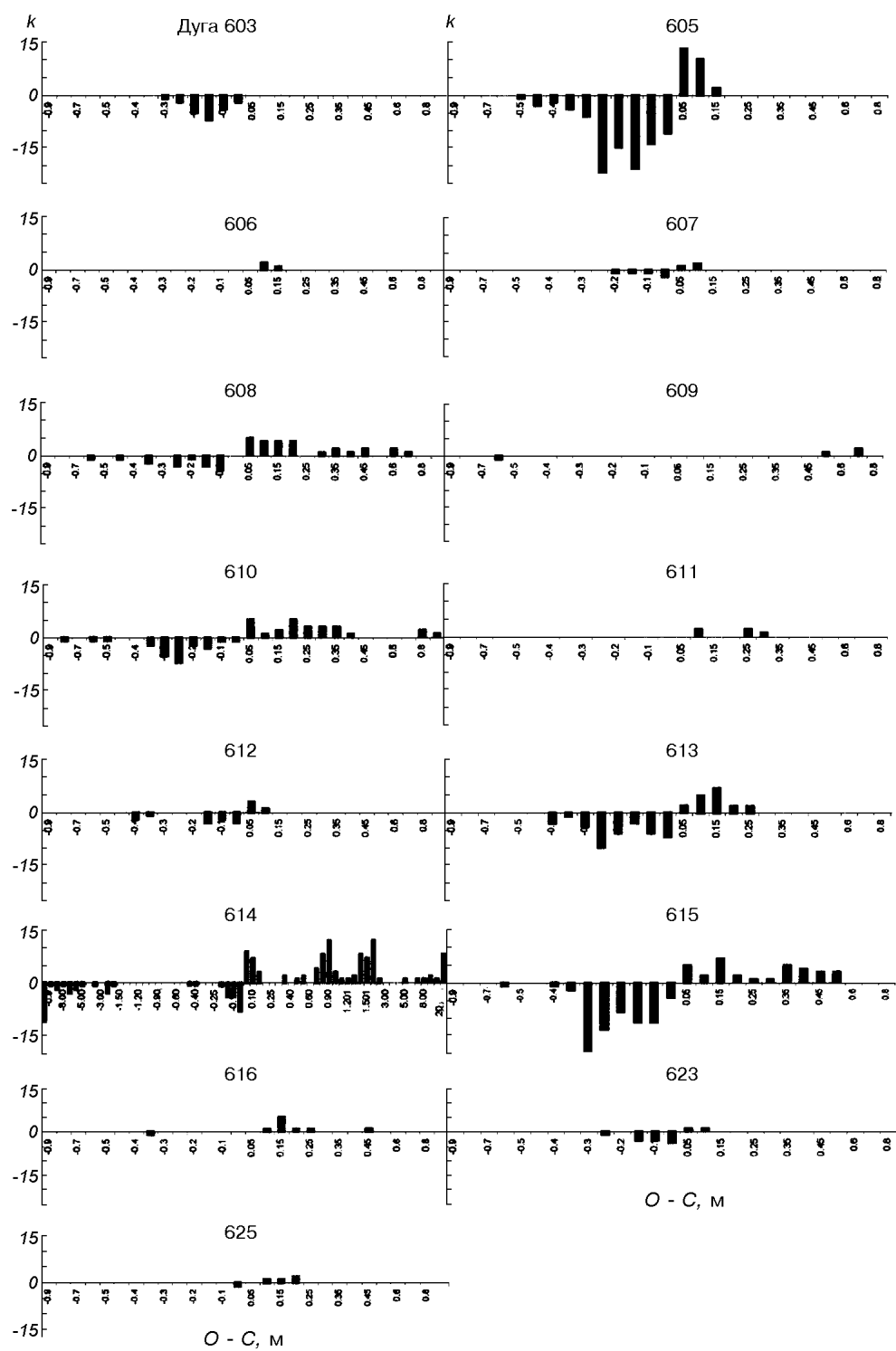


Рис. 2. Распределения количества наблюдений k по разностям наблюдаемых и вычисленных дальностей $O-C$

ными причинами. В целом можно говорить о статистической значимости большинства наблюдений, полученных на ЛСД «Голосиив—Киев».

Распределения количества наблюдений k по разностям определенных из наблюдений и вычисленных дальностей $(O - C)$ для всех дуг показаны на рис. 2, где $k > 0$ соответствует положительным значениям $(O - C)$, а $k < 0$ — отрицательным. Для каждой дуги были найдены средние разности наблюдаемых и вычисленных дальностей $(O - C)_m$. Их изменение с 15-суточным шагом представлено на рис. 3. Разброс $(O - C)_m$ достигает 0.710 м и обуславливается в первую очередь качеством наблюдательного материала. Систематическая составляющая, найденная для всего интервала наблюдений, равна 0.021 м. Причины ее возникновения выявить пока невозможно, что связано с низкой точностью измерений дальностей (≈ 0.071 м).

Изменения полученных координат X , Y , Z с 15-суточным шагом показаны на рис. 4. Симметричными штрихами обозначены их средние

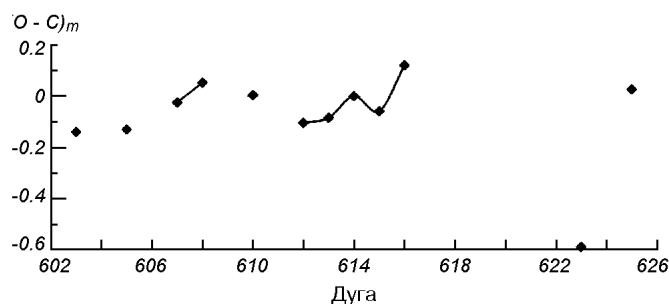


Рис. 3. Изменения $(O - C)_m$ без учета дуг 609 и 611

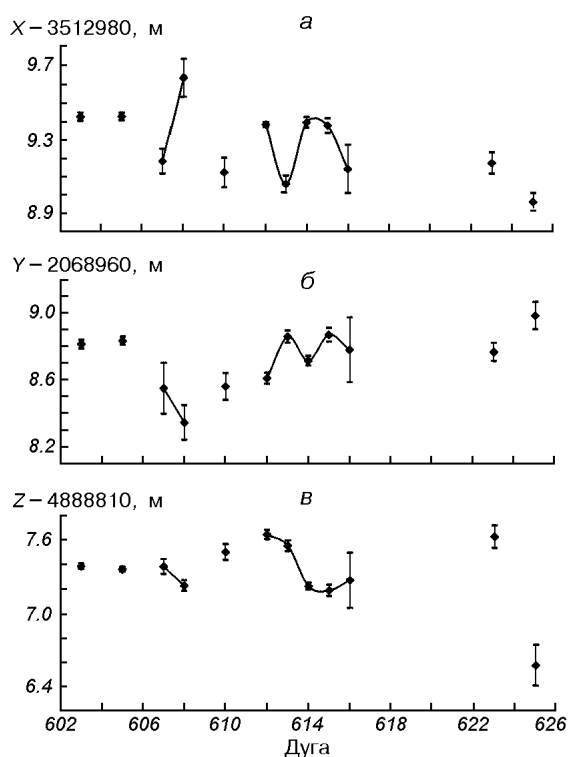


Рис. 4. Изменения координат ЛСД 1824

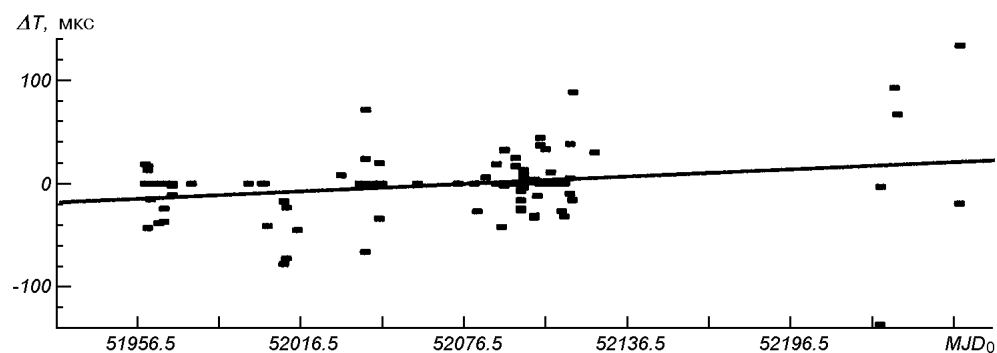


Рис. 5. Ошибки синхронизации часов службы времени

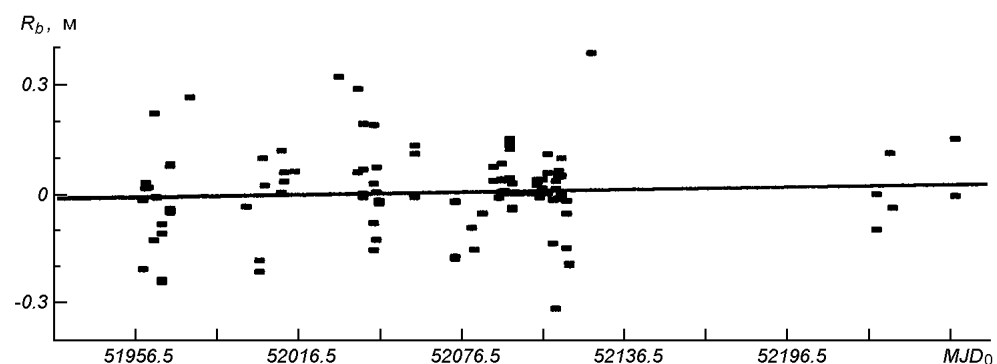


Рис. 6. Неучтенная аппаратная задержка системы калибровки

квадратичные ошибки. Сплошной линией соединены значения, полученные на последовательных дугах. Изменения координат, как правило, превышают ошибки их определения. Разброс оценок составляет 0.673 м, 0.637 м, 1.048 м по координатам X , Y , Z соответственно. Это свидетельствует о неуверенном определении координат ЛСД «Голосиив—Киев», что обусловлено небольшим количеством и точностью наблюдений.

Отчасти разброс оценок по координатам X , Y связан с большими систематическими ошибками службы времени дальномера. Ошибки синхронизации часов службы времени (ΔT) были вычислены Центром космических исследований университета штата Техас (США) по результатам обработки наблюдений ИСЗ «Lageos-1» и «Lageos-2», полученных на дальномере «Голосиив—Киев» в 2001 г. Диапазон их изменений составляет ± 140 мкс, что показано на рис. 5.

Нестабильность оценок координаты Z связана с наличием неучтенной аппаратной задержки Rb в результатах наблюдений ИСЗ. Как видно из рис. 6, разброс Rb достигает 0.7 м. Основной причиной его возникновения является нестабильность работы системы калибровки дальномера (определения аппаратной задержки). Найденный линейный тренд составляет 38.85 мм за период 24.01.01—31.12.01. Эта величина в два раза меньше точности измерений дальностей, поэтому выявить источник ее возникновения на данном этапе работы ЛСД невозможно. По этой же причине трендом можно пренебречь.

Одной из причин существенного разброса вычисленных координат ЛСД является большой разрыв в наблюдениях ИСЗ (2.5 месяца), вызванный

Таблица 2. Координаты дальномера «Голосиив—Киев» на интервалах дуг

Вариант	Орбитальные дуги	n	σ_3	X, м	Y, м	Z, м
I	603–605	145	0.54	3512989.427 ±0.018	2068968.829 ±0.020	4888817.364 ±0.016
	606–611	112	0.89	3512989.318 0.058	2068968.464 0.063	4888817.309 0.039
	612–616	260	1.27	3512989.179 0.042	2068968.689 0.044	4888817.247 0.049
	612–613	73	0.54	3512989.201 0.038	2068968.757 0.036	4888817.527 0.040
	614–616	195	1.45	3512989.069 0.060	2068968.606 0.068	4888817.206 0.074
II	603–613	330	0.77	3512989.369 0.023	2068968.682 0.025	4888817.337 0.020
	614–616	195	1.45	3512989.069 0.060	2068968.606 0.068	4888817.206 0.074
	617–625	—	—	—	—	—
III	603–616	528	1.43	3512989.239 0.029	2068968.620 0.031	4888817.305 0.027
	603–625	550	1.40	3512989.241 0.027	2068968.619 0.029	4888817.308 0.026

поломкой лазерного передатчика дальномера.

Координаты ЛСД «Голосиив—Киев» определялись также на интервалах дуг. Обозначения вариантов вычислений, индексные обозначения интервалов дуг, количество статистически значимых наблюдений спутников n , значение статистики σ_3 критерия 3-сигма, координаты X , Y , Z дальномера и их средние квадратичные ошибки для каждого из интервалов приведены в табл. 2.

Вариант I. Рассматривались изменения X , Y , Z на периодах, примерно соответствующих зимнему (дуги 603—605), весеннему (606—611) и летнему (612—616) сезонам. Кроме того, интервал дуг 612—616 разбивался на два подинтервала 612—613 и 614—616, что связано со скачком в значениях координат на дуге 614 (рис. 4). Дуги 623 и 625 не рассматривались, так как соответствуют разным сезонам (осени и зиме) и характеризуются невысокой активностью наблюдений по сравнению с указанными выше периодами. Целью такого деления не являлось изучение сезонных вариаций в координатах дальномера, так как наблюдения спутников «Lageos-1» и «Lageos-2» на ЛСД охватывают только период 24.01.01—31.12.01. Лазерный спутниковый дальномер 1824 не оснащен высокоточной автоматической метеорологической станцией. Измерения метеопараметров проводятся ручным способом с точностями: 0.5 °C по температуре, 1 мм рт. ст. по давлению и 10 % по влажности. Ошибку измерений дальностей $\delta\Delta R$, являющуюся функцией истинной высоты спутника над горизонтом E , метеопараметров и погрешностей их измерений, можно оценить на основе формулы Марини—Мюррея [2]. Для спутника с $E = 30^\circ$ при нормальных атмосферных условиях ($T = 0^\circ\text{C}$, $P = 760$ мм рт. ст.) и относительной влажности воздуха 90 % оценка $\delta\Delta R$ составляет 0.006 м. Однако величина $\delta\Delta R$ существенно зависит от принятого значения высоты спутника над горизонтом и давления и может достигать 0.032 м. Эти оценки показывают, что величина $\delta\Delta R$ может быть сравнима с точностью измерений дальностей.

Таким образом, результаты наблюдений отягощены ошибками, вызванными изменениями климатического режима, что должно сказываться при определении координат ЛСД. Согласно полученным оценкам различия

Таблица 3. Стабильность координат дальномера «Голосиив—Киев»

Вариант	Орбитальные дуги	σ , м	σ_X , м	σ_Y , м	σ_Z , м
I	603–605	0.013	0.001	0.014	0.017
	606–611	0.192	0.279	0.121	0.136
	612–616	0.163	0.159	0.108	0.207
	612–613	0.171	0.230	0.175	0.066
	614–616	0.097	0.142	0.078	0.042
II	603–613	0.180	0.205	0.190	0.138
	614–616	0.097	0.142	0.078	0.042
	617–625	0.445	0.150	0.154	0.741
III	603–625	0.223	0.195	0.177	0.283
	603–616	0.168	0.180	0.172	0.152

координат на последовательных интервалах (до $\Delta X = 0.367$ м, $\Delta Y = 0.365$ м, $\Delta Z = 0.323$ м) существенно превышают ошибки их определения и являются значимыми.

Вариант II. Находились оценки координат дальномера на интервалах дуг 603—613 и 614—616, соответствующих периодам до и после уточнения координат ЛСД 1824 [3]. Наблюдения, полученные на дугах 623 и 625, не рассматривались. Разности соответствующих координат ΔX , ΔY , ΔZ на этих интервалах являются существенными и составляют 0.309 м, 0.076 м, 0.131 м соответственно. Такое различие не может быть обусловлено изменениями, внесенными по результатам работы [3]. Вероятно, оно является следствием скачка координат на дуге 614, вызванного, как указывалось выше, сбоям в работе системы калибровки.

Вариант III. Определялись координаты ЛСД «Голосиив—Киев» на интервалах дуг 603—616 и 603—625. Интервал 603—625 охватывает весь период наблюдений спутников «Lageos-1» и «Lageos-2» на дальномере. Координаты на интервале 603—616 вычислялись для контроля. Разности соответствующих координат составляют 1—3 мм при точности определения координат 26—31 мм. Этот результат свидетельствует о незначительном вкладе наблюдений, полученных на 623 и 625 дугах, в оценку координат дальномера и оправдывает их исключение из анализа в предыдущем варианте вычислений.

Стабильность координат ЛСД «Голосиив—Киев» оценивалась по вычисленным значениям X , Y , Z на интервалах дуг, рассмотренных выше. Обозначения вариантов вычислений, индексные обозначения интервалов дуг, общая стабильность σ , стабильности определения координат σ_X , σ_Y , σ_Z на каждом из интервалов приведены в табл. 3. Для вычисления общей стабильности и стабильности координат использовались предложенные в [6] формулы.

Изменения стабильности координат и общей стабильности на интервалах дуг 603—605, 606—611 и 612—616 показаны на рис. 7, а. Разброс полученных значений σ_X , σ_Y , σ_Z составляет 0.278 м, 0.107 м и 0.190 м соответственно. Высокая общая стабильность 13 мм найдена для интервала дуг 603—605. Период 606—611 характеризуется большой неустойчивостью вычисленных координат X , Y (соответственно 0.279 и 0.121 м). Сбой в системе калибровки вызвал ухудшение стабильности координаты Z на интервале дуг 612—616. Разбиение интервала дуг 612—616 на подынтервалы эквивалентно исключению влияния сбоя системы калибровки ЛСД на дуге 614. Оно позволило выявить нестабильность координат X , Y на подынтервале 612—613 и стабилизировать координату Z (рис. 7, б). Таким

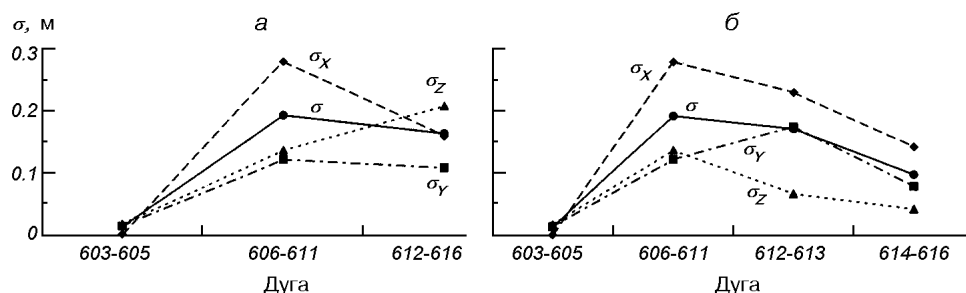


Рис. 7. Изменение стабильности координат на интервалах (а) и подынтервалах (б) дуг

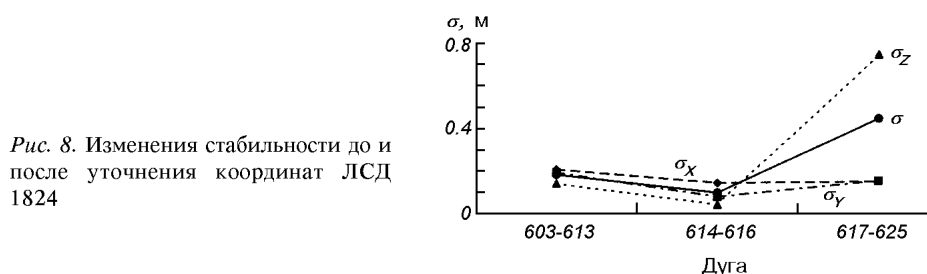


Рис. 8. Изменения стабильности до и после уточнения координат ЛСД 1824

образом, на интервале дуг 606—613 приоритетное влияние на стабильность работы ЛСД оказывали ошибки службы времени дальномера, а на интервале 612—616 доминирующими являлись ошибки системы калибровки дальномера.

Исключение влияния сбоя системы калибровки привело к улучшению общей стабильности в два раза на интервале дуг 614—616 по сравнению с периодом 603—613 (рис. 8). Найденная оценка $\sigma_z = 0.741$ м на интервале дуг 617—625 свидетельствует о нестабильности работы системы калибровки ЛСД в этот период.

Различие оценок σ_x и σ_y для интервалов дуг 603—616 и 603—625 составляет всего 15 мм и 5 мм соответственно. Оно обуславливается незначительным влиянием ошибок службы времени дальномера на дугах 623 и 625 на определение координат и малым количеством наблюдений, полученных на ЛСД 1824 в эти периоды. Оценки σ_z для интервалов дуг 603—616 и 603—625 различаются в два раза. Это подтверждает сделанный выше вывод о нестабильности работы системы калибровки дальномера на дугах 623 и 625. Найденные оценки общей стабильности показывают, что в качестве окончательных следует принять координаты ЛСД 1824, полученные на интервале дуг 603—616. Значение σ на этом интервале 0.168 м свидетельствует о невысокой стабильности координат в 2001 г.

Таким образом, получена оценка стабильности $\sigma = 0.168$ м работы лазерного спутникового дальномера «Голосиив—Киев» в 2001 г. Она обусловлена следующими причинами:

- небольшим количеством наблюдений (550 нормальных точек за период 24.01.01—31.12.01);
- качеством наблюдений (точность измерения дальности порядка 0.071 м);
- ошибками системы калибровки дальномера;
- ошибками службы времени дальномера;
- разрывом в наблюдениях по техническим причинам (до 2.5 месяцев);
- отсутствием автоматической метеорологической станции.

1. Болотина О. В., Глуценко Ю. М., Медведский М. М. и др. Лазерный спутниковый дальномер «Голосиив—Киев». Технические характеристики и результаты наблюдений 2001 года // Кинематика и физика небес. тел.—2001.—17, № 6.—С. 560—572.
2. IERS Conventions (1996) / Ed. D. D. McCarthy. — Paris: Observatoire de Paris, 1996.— 95 p.—(Technical Note 21).
3. Herring T. A. Diurnal and semidiurnal variations in Earth rotation // Adv. Space Res.—1993.— 13, N .—P. 11281—11290.—(Proc. COSPAR World Space Congress).
4. Rudenko S. Earth rotation parameters and terrestrial reference frame derived from LAGEOS-1 & LAGEOS-2 1983—1995 data analysis // Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики, Россия, С.-Петербург, сентябрь, 23—25, 1996 г. — С.-Петербург, 1996.—С. 259—265.
5. Rudenko S. Terrestrial reference frame realization from the analysis of 15-year LAGEOS-1 & 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.

Поступила в редакцию 14.11.02