

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.05.066>

УДК 521.937:629.78

**В. Я. Чолій<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка,  
фізичний факультет, корпус № 1, просп. Глушкова 2, Київ, Україна, 03680

<sup>2</sup>Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України  
вул. Академіка Заболотного, 27, Київ, Україна, 03143  
E-mail: Choliy.Vasyl@gmail.com

## Координати полюса та тривалість доби з опрацювання лазерних спостережень низькоорбітальних супутників

*У цій роботі розглядаються питання отримання параметрів орієнтації Землі (ПОЗ) на основі опрацювання лазерних спостережень супутників спеціального призначення. Це лазерні геодинамічні супутники «Lageos», «Etalon» та низькоорбітальні супутники «Lares», «Ajisai», «Starlette», «Stella». Автором побудовано нове програмне забезпечення та запропоновано підхід, згідно з яким модель кожного геодинамічного явища, перетворення чи процесу спочатку тестується окремо, а далі включається у програмний пакет. Основну увагу в роботі зосереджено на аналізі можливості використання лазерних спостережень низькоорбітальних супутників для отримання ПОЗ. При цьому було показано, що незважаючи на те, що супутник Lares має значно нижчу орбіту (на висоті 700 км), ніж супутники «Lageos» (висота 7000 км), отримані з опрацювання спостережень супутника «Lares» значення ПОЗ мають в цілому таку саму точність. Цього вдалося досягти завдяки новому програмному забезпеченню та авторському підходу до вивчення моделей. Заключні результати було також отримано шляхом об'єднання окремих рядів ПОЗ як після їхнього отримання по кожному з супутників, так і об'єднанням на рівні умовних рівнянь. У останньому випадку точність об'єданого ряду виявляється кращою на 10...15%. Це дозволяє нам рекомендувати низькоорбітальні супутники для робіт в області геодинаміки на постійній основі.*

**Ключові слова:** космічна геодинаміка, параметри орієнтації Землі, опрацювання спостережень.

**Вступ.** Серед завдань Міжнародної служби обертання Землі (IERS) є отримання та розповсюдження серед зацікавлених організацій точних значень координат полюса обертання Землі, тривалості доби та поправки до всесвітнього часу. Виконання цього завдання реалізується через координацію діяльності установ та центрів аналізу спостережень, а на заключному етапі — об'єднання окремих рядів для формування фінального розв'язку, що публікується у Бюлетнях і доступний на сайті <http://www.iers.org>.

У відповідності до програм IERS та Міжнародної служби лазерної локації (ILRS) станції спостерігають велику кількість різних супутників: дуже високі («Etalon», GPS, GLONASS), середньоорбітальні («Lageos»), що є фактично основними для ILRS, та низькі, спектр яких досить широкий. Для низьких супутників, таких як «Lares», «Starlette», «Stella», «Ajisai» накопичено великі масиви спостережень, які використовуються для різноманітних задач, але не для обчислення координат полюса чи тривалості доби. Центри аналізу працюють з накопиченими спостереженнями, і тут головна роль належить програмному забезпеченню та відповідним до точності спостережень моделям геодинамічних, астрономічних і навіть метеорологічних явищ та процесів. Головна астрономічна обсерваторія НАН України представлена станцією Київ-Голосіїв в мережі ILRS та в минулому — програмним забезпеченням Київ-Геодинаміка, що працювало в лабораторії «Український центр визначення параметрів обертання Землі» до 2013 року.

Упродовж декількох років автором було створено програмне забезпечення Juliette/KG++, що призначається для роботи в центрах аналізу [4]. Воно написано автором «з нуля» на мові C++, ґрунтується на сучасних технологіях програмування і не використовує ніякого іншого програмного забезпечення. В цій роботі показано використання Juliette/KG++ для отримання координат полюса та тривалості доби зі спостережень низьких лазерних супутників, які для цієї мети зазвичай не використовуються. Автор вважає, що включення спостережень низькоорбітальних супутників до програм визначення ПОЗ покращить їхню точність.

**Космічний сегмент.** Від самого початку ери космічної геодинаміки велика частина супутників обладнувалась лазерними відбивачами. Станом на початок 2021 р. понад 60 супутників рекомендуються ILRS для регулярних спостережень на станціях, тобто вони гарантовано мають відбивачі. Серед наукових супутників є супутники, призначені для геодезичних задач, для дистанційного зондування, вивчення гравітаційного поля, альтиметрії, навігації тощо. Для нашої мети розглядаємо лише геодезичні супутники, спеціально запущені для розв'язання задач геодинаміки, найбільш яскравою властивістю яких є їхня «схожість» з матеріальними точками, щоб можна було не брати до уваги вплив на них погано модельованих сил. У табл. 1 подано деякі характеристики супутників, використаних у цій роботі. Основним критерієм відбору була висока кількість та тривала історія спостережень.

**Таблиця 1. Характеристики супутників SLR, використаних у роботі**

Супутник	Дата запуску	Нахил орбіти	Висота, км	Маса, кг	Відбивач
«Ajisai»	12.08.86	50.0°	1485...1505	685	сфера 214 см
«Etalon-1»	10.01.89	65.3	19105...19170	1415	сфера 129.4 см
«Etalon-2»	31.05.89	65.2	19135...19135	1415	сфера 129.4 см
«Lageos-1»	04.05.76	109.8	5850...5960	411	сфера 60 см
«Lageos-2»	22.10.92	52.6	5625...5960	405	сфера 60 см
«Lares»	13.02.12	69.5	1450	386.6	92 по 38.1 мм
«Starlette»	06.02.75	49.8	815...1115	47	сфера 24 см
«Stella»	26.09.93	98.6	815	48	сфера 24 см

**Таблиця 2. Кількість спостережень супутників у 2014 р.**

Супутник	«Lageos-1»	«Lageos-2»	«Lares»	«Ajisai»	«Starlette»	«Stella»	«Etalon-1»	«Etalon-2»
Всього	85640	75030	93857	161222	94522	48489	8966	8734
На добу	234.6	205.6	257.1	441.7	259.0	132.8	24.6	23.9

Найбільш схожим на матеріальну точку є супутник «Lares», який має найкраще відношення міделевого перерізу до маси. Він виготовлений як куля з вольфраму радіусом 18 см та масою 386.6 кг, що робить його об'єктом Сонячної системи з найбільшою відомою щільністю.

Нижче в табл. 2 наведено кількість спостережень перелічених супутників у 2014 році, обраного нами для експериментів, а також кількість спостережень на добу. В цілому супутник «Ajisai», який має великі розміри і краще видимий, спостерігають найчастіше, а високоорбітальний «Etalon» — найменше.

**Програмне забезпечення.** Окремі компоненти програмного забезпечення Juliette/KG++ [3] відлагоджувалися поступово на основі авторського підходу, згідно з яким модель будь-якого геодинамічного чи астрономічного явища, процесу чи перетворення повинна попередньо аналізуватися окремо, і лише після цього включатися у програмний пакет.

Усі моделі поділяються на дві великі групи — стандартизовані IERS (внесені в IERS Conventions [5] та рекомендовані для використання у геодинамічних обчисленнях) та ще поки не стандартизовані, як-от модель атмосфери [6] чи іоносфери [1]. Моделі змінюються досить швидко: відомі стандарти 1996, 2003, 2010 років. В процесі аналізу моделей потрібно постійно слідкувати за появою нових чи уточненням наявних моделей.

Для уточнення параметрів моделей використовується метод найменших квадратів, а як обчислювальна процедура — метод Гаусголдера зі стабілізацією розв'язків.

**Аналіз спостережень.** Ми використали спостереження восьми описаних вище супутників на інтервалі в один повний чандлерівський

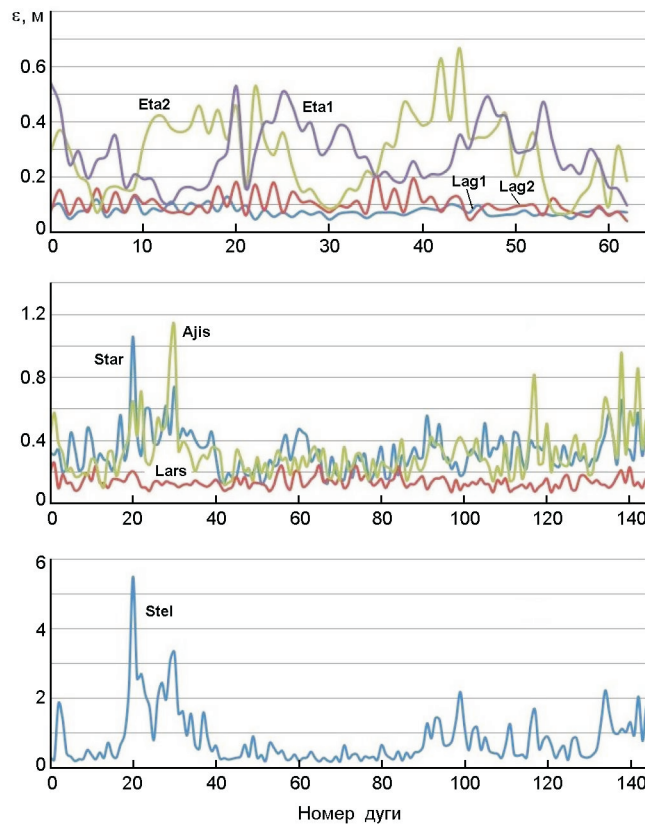


Рис. 1. Досяжна точність представлення орбіт супутників «Etalon-1, 2», «Lageos-1, -2», «Ajisai», «Lares», «Starlette» та «Stella»

період від 30 грудня 2013 р. Опрацювання відбувається дугами — інтервалами часу 7 діб для «Lageos» та «Etalon» і 3 доби — для інших. Це відповідає рекомендаціям ILRS.

На першому етапі опрацювання спостережень обчислюється точна орбіта. Ми дотримуємося тієї точки зору, що збереження кожного спостереження важливе, оскільки вони отримуються шляхом значних зусиль. При автоматичному отриманні точної орбіти відкидаються лише очевидні викиди у спостереженнях, чи ті, які мають похибку, що перевищує 3 . Досяжна точність представлення орбіт досить адекватно відображає точність моделювання руху супутника у програмному пакеті.

На рис. 1 показано досяжну точність для орбіт різних супутників: а) для «Lageos» та «Etalon», б) для «Ajisai», «Lares» і «Starlette», в) для «Stella». Вздовж осі абсцис показано номер дуги, по ординаті — точність у метрах. Навіть побіжний аналіз дозволяє побачити, що точність представлення орбіти «Lares» практично така ж, як і для «Lageos». Супутники «Etalon» виглядають гірше, ніж низькі, бо для «Etalon» маємо мало спостережень. Найгірші показники для супутника «Stella» пояснюються тим, що він є сонячносинхронним (завжди освітленим) і найнижчим з усіх, тому потребує дуже високоточної

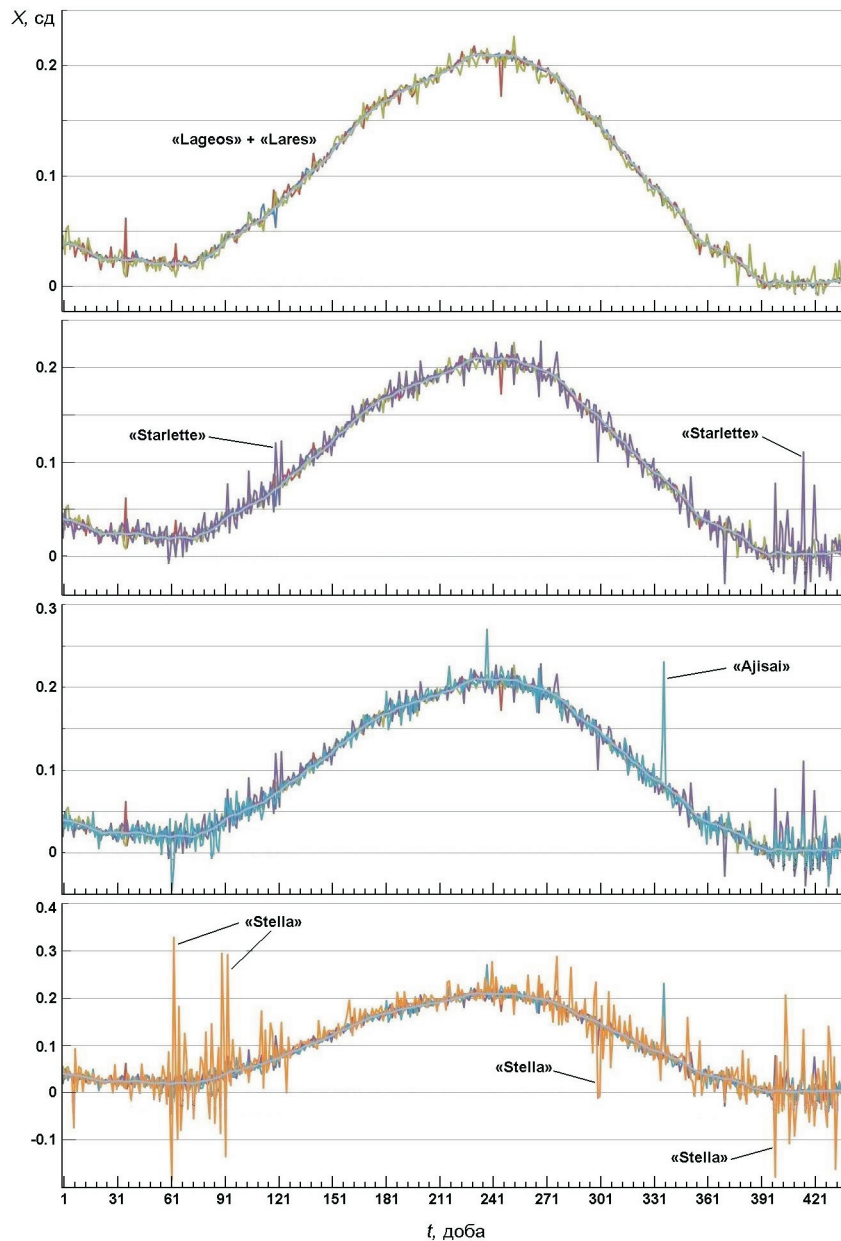


Рис. 2. Варіації X-координати полюса у секундах дуги (сд), отримані в результаті обробки об'єднаних рядів: а — «Lageos» + «Lares», б — «Lageos» + «Lares» + «Starlette», в — «Lageos» + «Lares» + «Starlette» + «Ajisai», г — «Lageos» + «Lares» + «Starlette» + «Ajisai» + «Stella»

чисельної теорії руху. Така теорія мусить брати до уваги атмосферу та космічну погоду. Очевидно, що навіть найкраща з відомих моделей атмосфери не задовольняє цю вимогу.

На другому етапі аналізу використовуються автоматичні процедури вивчення розподілу залишків з метою відкидання дійсно «поганих» спостережень. Ми ставили перед собою завдання виявити, чи покращиться точність, з якою в програмі отримуються ПОЗ, після долучен-

**Таблиця 3. Оцінки точності координат полюса та тривалості доби (мілісекунди дуги та часу)**

Параметр	«Lageos-1»	«Lageos-2»	«Lares»	«Ajisai»	«Starlette»	«Stella»	IERS
$x$ , мсД	3.94	5.42	5.97	13.73	12.29	47.73	2.96
$y$ , мсД	2.78	6.35	5.58	10.61	13.52	54.17	2.35
$Lod$ , мс	0.14	0.36	0.59	0.21	1.68	3.28	0.11

**Таблиця 4. Оцінки точності без супутника «Stella» (мілісекунди дуги та часу)**

Параметр	«Lageos-1»	«Lageos-2»	«Lares»	«Ajisai»	«Starlette»
$x$ , мсД	3.77	5.40	5.53	13.39	13.10
$y$ , мсД	3.90	5.95	5.64	11.08	13.05
$Lod$ , мс	0.59	0.70	0.77	1.91	1.52

ня до розгляду рядів спостережень низьких супутників. Для цього побудовано ряди ПОЗ окремо по кожному супутнику, окрім «Etalon», оскільки спостережень для нього дуже мало.

На рис. 2 показано щодобові значення  $X$ -координати полюса, отримані з різних комбінацій рядів спостережень низьких супутників: а) «Lageos» + «Lares», б) ще і «Starlette», в) ще і «Ajisai», г) ще і «Stella». Графіки мають різний масштаб, але зрозуміло, що ряди «Stella» погано підходять для цієї задачі. В цілому  $Y$ -координата полюса та тривалість доби показують схожу еволюцію від супутника до супутника.

Формальне оцінювання точності окремих рядів здійснювалось розширеним методом Гельмерта на основі підходу з роботи автора [2]. Оцінки точності наведено у табл. 3. Точність параметрів для супутника «Stella» виявляється на порядок гіршою, ніж для супутників «Lageos». Якщо відкинути ряди «Stella», результати трохи зміняться (табл. 4), однак головна особливість збережеться — точність визначення параметрів за допомогою рядів супутника «Lares» практично така ж, як для рядів «Lageos», які є основними для цієї мети, і саме при обробці яких отримуються параметри більшості моделей. На наш погляд, більш правильним було б визначення параметрів моделей на основі аналізу спостережень усіх супутників. Так, безумовно те, що припливи (наприклад) значно сильніше впливають на рух низьких супутників «Lares», ніж більш високих «Lageos». Повний масив ПОЗ за кожним супутником окремо та об'єднані ряди можна завантажити з сайту автора.

Порівнювати отримані значення координат полюса та тривалості доби з офіційним рядом IERS, який будується неперервно місяць за місяцем не зовсім коректно, оскільки офіційні значення отримуються шляхом аналізу та об'єднання даних не тільки з різних супутників, але і з різних методик, що дозволяє суттєво зменшити систематичні похибки. Бюлетень Bulletin B IERS для точності об'єданого ряду



**Таблиця 5. Оцінки точності ПОЗ з об'єднання на рівні умовних рівнянь**

Параметр	«Lageos-1»	«Lageos-1» + «Lageos-2» + «Lares»	«Lageos-1» + «Lageos-2» + «Lares» + «Starlette»	«Lageos-1» + «Lageos-2» + «Lares» + «Starlette» + «Ajisai»
$x$ , мсд	3.77	2.70	2.84	3.03
$y$ , мсд	3.91	2.67	2.98	2.76
$Lod$ , мс	0.59	0.35	0.59	0.38

IERS (всі методики) дає оцінку на рівні 0.15 мсд, що на один порядок краще, ніж отримані нами значення.

Програмний пакет Juliette/KG++, як можна бачити з цієї обробки, придатний для отримання ПОЗ на постійній основі з опрацювання спостережень низьких супутників. Таким чином, де факто у нашому розпорядженні є можливості для перманентної обробки таких спостережень, з особливою увагою до низьких супутників, і ми можемо викладати результати як неофіційний центр аналізу.

Саме через це, починаючи з 2021 р., на сайті автора <http://space.univ.kiev.ua/SLR/> організовано неофіційний центр опрацювання спостережень лазерних супутників з метою накопичення даних з моменту запуску супутника «Lares». Накопичення таких проміжних результатів дозволить ставити інші задачі, наприклад уточнення координат станцій, коефіцієнтів гармонік геопотенціалу, параметрів припливів, щільності атмосфери тощо, оскільки що нижча орбіта супутника, то сильніше на його рух впливають названі явища. Для нас також важливим є історичний аспект: вплив еволюції моделей на точність отримання геодинамічних параметрів. Дані регулярно оновлюються, як тільки отримано нові результати, і вільно завантажуються.

**Об'єднання рядів ПОЗ на рівні умовних рівнянь.** В результаті опрацювання спостережень окремого супутника створюється набір файлів, які містять проміжну інформацію, як-от похідні по параметрах моделей, параметри орбіт, початкові значення параметрів тощо. Ці дуги можна використати для проведення деяких додаткових аналізів, одним з яких є спільне визначення параметрів. Якщо орбіта є характеристикою окремого супутника, то ПОЗ є характеристикою Землі, тому вони спільні для будь-якого з супутників.

Об'єднання рядів з метою отримання точніших ПОЗ можна здійснювати різними методами. Один із них — це об'єднання уже готових рядів. Інший спосіб полягає в тому, що умовні рівняння об'єднуються до утворення нормальних рівнянь. Матриця нормальних рівнянь за таких умов є блочно-діагональною, а сама система рівнянь розв'язується стандартними методами. При цьому мають місце дві протилежні за своєю суттю тенденції — спостереження низьких супутників мають нижчу точність, що має погіршити точність результату, а збільшення кількості умовних рівнянь сприяє підвищенню точності.

Наведені у табл. 5 оцінки дають уявлення про точність ПОЗ у випадковому відношенні параметрів обертання Землі, отриманих шля-

хом спільного на рівні умовних рівнянь уточнення, масштабовані до точності за супутником «Lageos-1», взятої з табл. 4. Ми не можемо рекомендувати використовувати супутник «Stella» для визначення ПОЗ. Особливості його орбітального руху потребують детального вивчення. Однак спільне використання середньоорбітальних та низьких супутників для отримання ПОЗ може бути багатообіцяючим.

## REFERENCES

1. Bilitza D. (1990). International reference ionosphere 1990. URSI/COSPAR, NSSDC/WDC-A-R & S 90-22.-1990.  
<http://iri.gsfc.nasa.gov/docs/IRI1990pp0-84.pdf>.
2. Choliy V. Ya. (2014). On the extension of Helmert transform. *Adv. Astron. and Space Phys.* 4(1). 15—19.
3. Choliy V., Zhaborovsky V. (2011). KyivGeodynamics++: software for processing satellite laser ranging data. *Adv. Astron. and Space Phys.* 1. 96—98.
4. Choliy V. Ya., Zhaborovsky V. P. (2014). Earth's pole coordinates determined from Lageos-1/2 laser ranging. *Adv. Astron. and Space Phys.* 4(2). 54—57.
5. *IERS Conventions* (2010). IERS TN 36. Eds G. Petit, B. Luzum. Paris: Observ. Paris. 160.
6. Picone J., Hedin A., Drob D., et al. (2002). NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res.* 107(A12). doi:10.1029/2002JA009430.

V. Ya. Choliy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Taras Shevchenko University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Main Astronomical Observatory of Ukrainian Academy of Sciences, Kyiv, Ukraine

## POLE COORDINATES AND LENGTH OF DAY FROM LASER RANGING OF LOW EARTH ORBITERS

This article is devoted to the determination of Earth' Orientation Parameters (EOP) from reprocessing of the Laser ranging observations of the specially designed satellites. These are laser geodynamics satellites Lageos, Etalon and Low Earth Orbiters Lares, Ajisai, Starlette, Stella. New software was created by the author and a new approach was proposed to analyze each model of geodynamics phenomena, transformation or process first tests separately and only then is included into the package. Main attention was paid to the analysis of the possibility to use Laser Ranging data to Low Earth Orbiters for EOP determination. It was shown that despite the much lower Lares' orbit (height is 700 km) than the Lageos' orbit (7000 km) the resulting EOP series from Lares data have in general the same precision. It was achieved by new software and new author approach to the study of the models. Final EOP data sets at the same time were computed by combination of raw EOPs from each satellite or from the combination of the conditional equations. In the latter case the precision of the final solution is 10—15 % better. It allows us to recommend Low Earth orbiters for geodynamics on a permanent basis.

**Keywords:** space geodynamics, Earth orientation parameters, observation processing.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2021

Після доопрацювання 10.06.2021

Прийнята до друку 24.06.2021