



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 12 • № 1 • 2016 С. 1 – 6

УДК 528.2

Деякі результати дослідження моделей гравітаційного поля Місяця

Ю.І. Гайгель*, П.М. Зазуляк

Національний університет “Львівська Політехніка”

Задача вивчення гравітаційного поля Місяця є важливою для перспективного планування його дослідження за допомогою роботизованих та пілотованих апаратів. Визначення гармонічних коефіцієнтів розкладу селенопотенціалу може бути недостатньо надійним по причині побудови їх на основі різних даних та методів математичної обробки. За допомогою взаємної порівняльної оцінки моделей селенопотенціалу можна отримати певну інформацію щодо надійності визначення гармонічних коефіцієнтів.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ЛУНЫ, Гайгель Ю.И., Зазуляк П.М. — Задача изучения гравитационного поля Луны является важной для перспективного планирования её исследования с помощью роботизированных и пилотируемых аппаратов. Определение гармонических коэффициентов разложения селенопотенциала может быть недостаточно надёжным по причине построения их на основе различных данных и методов математической обработки. С помощью взаимной сравнительной оценки моделей селенопотенциала можно получить определённую информацию о надёжности определения гармонических коэффициентов.

SOME RESULTS OF MOON'S GRAVITATIONAL FIELD INVESTIGATIONS, by Haigel Y.I., Zazulyak P.M. — The task of studying the gravitational field of the moon is important for long-term planning of its research using manned and robotic spacecrafts. Determination of harmonic expansion coefficients of selenopotential may not be reliable because of their construction based on different data and different methods of mathematical processing. With mutual comparative assessment of selenopotential models we can get some information about the reliability determination harmonic coefficients.

Ключевые слова: гравитационное поле; дисперсия; физическая либрация; моменты инерции.

Key words: gravitational field; dispersion; physical libration; moments of inertia.

Як наш найближчий сусід, Місяць є природною лабораторією для дослідження фундаментальних питань про походження і еволюцію Землі і Сонячної системи. З початком космічної ери методи і засоби його дослідження значно зросли. Для вивчення Місяця здійснювались численні експедиції за допомогою космічних апаратів, котрі несли на собі певні набори інструментів для його дослідження. Розглянемо основні з них.

Вивчення гравітаційного поля Місяця за допомогою космічних апаратів почалось із запуску апарату Луна-10 3 квітня 1966 р. [16] і американської програми Lunar Orbiter 10 серпня 1966 р. [17]. Вивчення гравітаційного поля Місяця здійснювалась за допомогою доплерівських спостережень.

Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) — це роботизована місія, яка здійснювалась для картографування поверхні Місяця і після року діяльності була продовжена з унікальним набором наукових цілей. Спостереження LRO дозволили зробити численні новаторські відкриття, створюючи нову картину Місяця. Ці дослідження створили наукову основу для того, щоб кинути виклик і поліпшити наше розуміння процесів по всій Сонячній системі.

Цей космічний апарат використовувався для експериментальної перевірки розрахунків навігації пілотованих кораблів місії Apollo [12]. При аналізі результатів були виявлені великі відхилення орбіти, котрі пояснювались значними гравітаційними збуреннями. Детальний аналіз призвів до виявлення явища масконів, котрі найчастіше зустрічаються під великими місячними морями округлої форми [11].

Наступною варто розглянути місію Clementine (дата запуску 25 січня 1994 р), основною метою якої було картографування поверхні Місяця, а також пошук затінених областей на його поверхні з метою знаходження покладів льоду. Після виведення на місячну орбіту Clementine отримала понад 1,6 млн. зображень поверхні Місяця. Також проводились доплерівські спостереження з метою вивчення гравітаційних аномалій [10]. Зображення, отримані за допомогою Clementine, виявили постійно затінені області на дні глибоких кратерів поблизу південного полюса Місяця. Насправді, виявляється, що приблизно від 6 000 до 15 000 квадратних кілометрів області навколо південного полюса постійно затінені. Місія завершилася в червні 1994 року, коли рівень потужності на борту впав до точки, де телеметрія від космічного корабля вже не була зрозумілою.

* Гайгель Юрій Іванович; ✉ yurahaigel@gmail.com

Наступною місією, організованою NASA, став Lunar Prospector. Вона була розроблена, щоб виконати дослідження на низькій полярній орбіті Місяця. Це включало відображення складу поверхні і розміщення місячних ресурсів, вимірювання магнітних полів і гравітації, а також вивчення подій дегазації [9]. Дані з цієї місії, які несли наукові прилади, доповнили дані з місії Clementine, які несли в основному камери. Зібрана інформація була використана для поліпшення розуміння походження, еволюції та сучасного стану Місяця. Починаючи з 15 січня 1998 року, Lunar Prospector провів один рік, картографуючи всю поверхню Місяця на відстані близько 100 кілометрів. Місія була розширена протягом ще семи місяців, починаючи з січня 1999 року. В той час орбіта космічного апарату була знижена спочатку до близько 30 кілометрів, а потім протягом приблизно 10 кілометрів над поверхнею Місяця. Місія Lunar Prospector тривала 19 місяців і успішно досягла всіх своїх цілей. Зібрані дані дозволили створити детальну карту поверхні Місяця. Дані з цієї місії були кращі, ніж очікувалося, і були більш всеосяжними, ніж будь-які дані, зібраних до того.

Метою доплерівського гравітаційного експерименту повинен був збір даних про маси під поверхнею Місяця. Він використовує доплерівський S-радіодіапазон відстеження сигналів для моніторингу змін в орбіті космічного апарату, як спосіб вимірювання, відображення місячного гравітаційного поля. Ці вимірювання також представили інформацію про місячну кору і літосферу, і про внутрішню структуру Місяця [9]. Дані цієї місії були доволі точні для того щоб створити детальну карту місячних масконів.

Значним недоліком даних попередніх місій є відсутність даних спостережень над зворотною стороною Місяця. Першою місією, що дозволила здійснити такі спостереження стала перша велика японська місія SELENE (Selenological and Engineering Explorer). SELENE складалась з трьох супутників — головного, котрий знаходився на полярній орбіті із середньою висотою 100 км (Kaguya) над поверхнею Місяця, і двох субсупутників, котрі знаходились на полярній еліптичній орбіті на висоті від 129 до 792 км (Vstar) і на висоті від 120 до 2395 км (Rstar) [10]. Субсупутники виконували роль ретрансляторів, що дозволило робити спостереження параметрів на зворотній стороні Місяця. Стабілізація орбіти протягом місії визначалася з перекривань орбіт двох супутників-ретрансляторів, що покращило стабільність з декількох сотень до декількох десятків метрів.

Останньою на даний момент із місій NASA, направлених на вивчення фізичної поверхні та внутрішньої будови Місяця, є програма GRAIL.

The Gravity Recovery And Interior Laboratory (GRAIL) — це два космічні апарати-близнюки, котрі літали в тандемі навколо Місяця з метою точного картографування поверхні Місяця і детального вивчення варіацій в гравітаційному полі Місяця. Космічні апарати літали один за одним по практично одній орбіті на відстані від 175 до 225 кілометрів один від одного. Ця місія була оснащена Lunar Gravity Ranging System (LGRS). Ця система вимірювала коливання між двома космічними апаратами з точністю $0,6 \text{ microns/Hz}^{1/2}$ [3], що дозволило виміряти гравітаційні коливання з безпрецедентною точністю [15]. Передбачається, що дані можуть бути використані щоб допомогти визначити бажані місця посадки і запрограмувати спуск на поверхню з метою уникнення аварійної посадки.

За даними спостережень перерахованих вище місій була здійснена побудова моделей гравітаційного поля Місяця, деякі з них приведені в табл. 1.

Як бачимо, до недавнього часу для побудови моделей гравітаційного поля Місяця використовувались зазвичай комбіновані дані з кількох місій. Це здійснювалось з метою заповнення певних прогалів у даних доплерівських експериментів певних місій, а також підвищення їх надійності. З часу закінчення місій SELENE і GRAIL потреба у доповненні і комбінуванні даних відпала по причині повноти, хорошої точності та надійності даних отриманих за допомогою космічних апаратів цих місій.

Важливу роль для вивчення внутрішньої будови мають гармонічні коефіцієнти другого порядку, їх значення для моделей, наведених в табл. 1, наведені в табл. 2.

Аналіз табл. 2 показує, що коефіцієнти другого порядку визначені досить точно, що не можна сказати про гармоніки вищих порядків.

Використовуючи коефіцієнти C_{20} і C_{22} і параметри фізичної лібрації (динамічні стиснення) β і γ , можна знайти моменти інерції A , B та C за формулами

$$A = \frac{2C_{22} - C_{20}}{\beta} - 4C_{22}, \quad B = \frac{2C_{22} - C_{20}}{\beta}, \quad C = \frac{2C_{22} - C_{20}}{\beta} - C_{20} - 2C_{22}. \quad (1)$$

В табл. 3 наведені значення моментів інерції за даними GRAIL [4] і для порівняння приведені дані роботи [1], отримані врівноваження гармонік C_{20} , C_{22} , параметрів фізичної лібрації β , γ і нерівностей в русі перигею і вузла місячної орбіти.

Для здійснення порівняння було обрано 3 моделі, котрі були побудовані за результатами різних місій. GRGM660PPRIM — це гравітаційна модель 660-го порядку, яка включає дані всієї місії GRAIL.

Деякі деталі, які описують цю модель:

- сферичні гармонічні коефіцієнти є повністю нормалізовані;
- коефіцієнт другого порядку цієї моделі не включає постійні припливи [4].

Таблиця 1. Моделі гравітаційного поля Місяця

Модель	Рік	Порядок	Місія
GLGM-1	1994	70	Apollo-15
GLGM-2	1995	70	Clementine
JGL075D1	1998	75	Lunar Orbiter 1–5, Apollo 15 і 16, Clementine, перший місяць (до 17 лютого 1998 р.) Lunar Prospector
JGL075G1	1998	75	Lunar Orbiter 1–5, Apollo 15 і 16, Clementine, перші 3 місяці (до 12 квітня 1998 р.) Lunar Prospector
JGL100J1	1999	100	Lunar Orbiter 1–5, Apollo 15 і 16, Clementine, перший рік плюс (від 11 червня 1998 р. до 8 лютого 1999 р.) Lunar Prospector
JGL100K1	1999	100	Lunar Orbiter 1–5, Apollo 15 і 16, Clementine, всі дані (від 11 червня 1998 р. до 30 липня 1999 р.) Lunar Prospector
JGL150Q1	2000	150	Lunar Orbiter 1–5, Apollo 15 і 16, Clementine, всі дані (від 11 червня 1998 р. до 30 липня 1999 р.) Lunar Prospector
JGL165P1	2000	165	Lunar Orbiter 1–5, Apollo 15 і 16, Clementine, всі дані (від 11 червня 1998 р. до 30 липня 1999 р.) Lunar Prospector
SGM90d	2008	90	SELENE
SGM100h	2010	100	SELENE
LPE200	2011	200	Lunar Prospector
GRGM660PRIM	2013	660	GRAIL
GL0660B	2013	660	GRAIL
AIUB-GRL200A	2015	200	GRAIL
AIUB-GRL200B	2015	200	GRAIL

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів другого порядку моделей гравітаційного поля Місяця

Модель	C_{20}	δC_{20}	C_{22}	δC_{22}
GLGM-1	$-2,037\,449\,00 \cdot 10^{-4}$	$328 \cdot 10^{-10}$	$2,219\,315\,00 \cdot 10^{-5}$	$177 \cdot 10^{-10}$
GLGM-2	$-2,039\,861\,00 \cdot 10^{-4}$	$585 \cdot 10^{-10}$	$2,222\,734\,00 \cdot 10^{-5}$	$362 \cdot 10^{-10}$
JGL075D1	$-2,025\,013\,00 \cdot 10^{-4}$	$122 \cdot 10^{-10}$	$2,233\,912\,00 \cdot 10^{-5}$	$103 \cdot 10^{-10}$
JGL075G1	$-2,034\,285\,00 \cdot 10^{-4}$	$81,8 \cdot 10^{-10}$	$2,239\,478\,00 \cdot 10^{-5}$	$52 \cdot 10^{-10}$
JGL100J1	$-2,032\,162\,00 \cdot 10^{-4}$	$54,3 \cdot 10^{-10}$	$2,235\,138\,00 \cdot 10^{-5}$	$37 \cdot 10^{-10}$
JGL100K1	$-2,032\,000\,00 \cdot 10^{-4}$	$53,2 \cdot 10^{-10}$	$2,235\,068\,00 \cdot 10^{-5}$	$36 \cdot 10^{-10}$
JGL150Q1	$-2,032\,610\,00 \cdot 10^{-4}$	$53,5 \cdot 10^{-10}$	$2,235\,849\,00 \cdot 10^{-5}$	$37 \cdot 10^{-10}$
JGL165P1	$-2,032\,366\,00 \cdot 10^{-4}$	$54,6 \cdot 10^{-10}$	$2,235\,712\,00 \cdot 10^{-5}$	$36,8 \cdot 10^{-10}$
LPE200	$-2,032\,564\,00 \cdot 10^{-4}$	$74,8 \cdot 10^{-10}$	$2,235\,037\,00 \cdot 10^{-5}$	$78,0 \cdot 10^{-10}$
GRGM660PRIM	$-2,032\,204\,00 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-10}$	$2,238\,000\,00 \cdot 10^{-5}$	$0,48 \cdot 10^{-10}$
GL0660B	$-2,032\,157\,00 \cdot 10^{-4}$	$0,35 \cdot 10^{-10}$	$2,238\,184\,00 \cdot 10^{-5}$	$0,43 \cdot 10^{-10}$
AIUB-GRL200A	$-2,032\,128\,00 \cdot 10^{-4}$	$0,42 \cdot 10^{-10}$	$2,238\,156\,00 \cdot 10^{-5}$	$0,88 \cdot 10^{-10}$
AIUB-GRL200B	$-2,032\,115\,00 \cdot 10^{-4}$	$0,07 \cdot 10^{-10}$	$2,238\,164\,00 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^{-10}$

Таблиця 3. Моменти інерції Місяця

Параметри	Модель GRAIL [4]	Робота [1]
C_{20}	$-2,032\,204\,00 \cdot 10^{-4}$ [4]	$-2,0336 \cdot 10^{-4}$
C_{22}	$2,238 \cdot 10^{-5}$ [4]	$2,240 \cdot 10^{-5}$
β	$6,310\,022 \cdot 10^{-4}$ [2]	$6,3129 \cdot 10^{-4}$
γ	$2,277\,305 \cdot 10^{-4}$ [2]	$2,2781 \cdot 10^{-4}$
A	0,39290499	0,3930076
B	0,39299451	0,3930972
C	0,39315297	0,3932558

Таблиця 4. Порівнювані моделі

Модель	Місія	Рік опублікування	Порядок моделі
GL0660PRIM	GRAIL	2013	660
LPE200	Lunar Prospector	2011	200
JGL165P1	Lunar Orbiter, Apollo, Clementine, Lunar Prospector	2000	165

LPE200 — гравітаційна модель Місяця 200-го порядку. Вхідні дані були використані з місії Lunar Prospector (1998–1999), але тільки за період останніх 7 місяців. Дані спостережень, які були використані, складаються з S діапазону доплерівського спостереження. Ця модель є оновленням до GLGM-3 шляхом аналізу прямої видимості, прискоренням залишків поза розширену видиму сторону. При оцінці поза територію розширеної видимої сторони LPE200 дає ту саму силу тяжіння, як і поле апіорі [6].

JGL165P1 — гравітаційна модель Місяця 165-го порядку. Використовувались вхідні дані з місії Lunar Orbiter від 1 до 5, Arolo 15 і 16 субсателітів, Clementine і всіх даних (від 11 червня 1998 р. до 30 липня 1999 р.) космічного апарату Lunar Prospector [4].

Для цих моделей обчислені за формулою (2) степеневі дисперсії з третього порядку, які приведені нижче

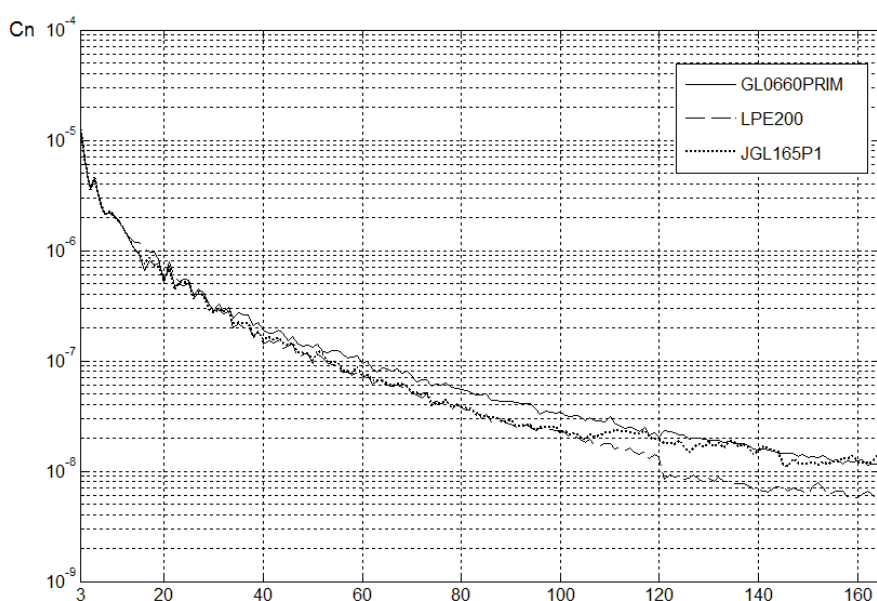


Рис. 1. Обчислені степеневі дисперсії моделей GL0660PRIM, LPE200, JGL165P1

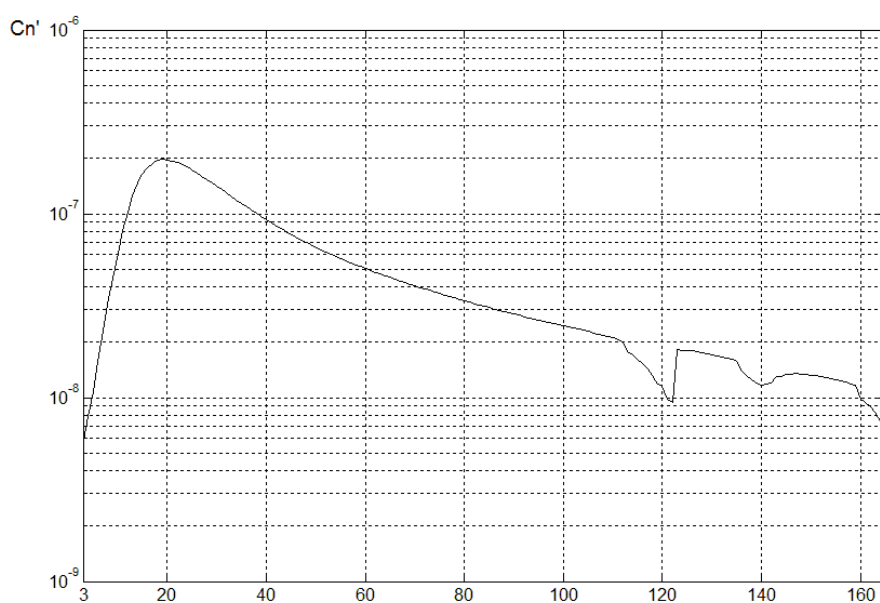


Рис. 2. Обчислені степеневі дисперсії помилок моделі JGL165P1

$$C_n = \sqrt{\frac{\sum_{m=0}^n (\bar{C}_{nm}^2 + \bar{S}_{nm}^2)}{2n+1}} \quad (2)$$

Аналогічно були обчислені порядкові дисперсії помилок цих моделей $\delta\bar{C}_{nm}^2$ і $\delta\bar{S}_{nm}^2$, приведені авторами результати показані на рис. 2, 3, 4.

Крім цього, нами обчислені степеневі дисперсії різниць для трьох моделей

$$\sigma(C_{nm}) = (\bar{C}_{nm} - \bar{C}'_{nm})^2, \quad \sigma(S_{nm}) = (\bar{S}_{nm} - \bar{S}'_{nm})^2. \quad (3)$$

Дисперсії в різницях коефіцієнтів трьох моделей показують, що точність визначення коефіцієнтів вищих порядків моделей гравітаційного поля Місяця можуть бути недостатньо надійні і їх точності не відповідають зазначеним авторами.

Висновки. Здійснено короткий огляд місій, котрі здійснювались з метою вивчення Місяця, а також моделей гравітаційного поля, побудованих по цих місіях. За новими даними обчислені моменти інерції Місяця, степеневі дисперсії коефіцієнтів, степеневі дисперсії помилок цих моделей, а також степеневі дисперсії різниць коефіцієнтів \bar{C}_{nm} і \bar{S}_{nm} трьох моделей гравітаційного поля Місяця.

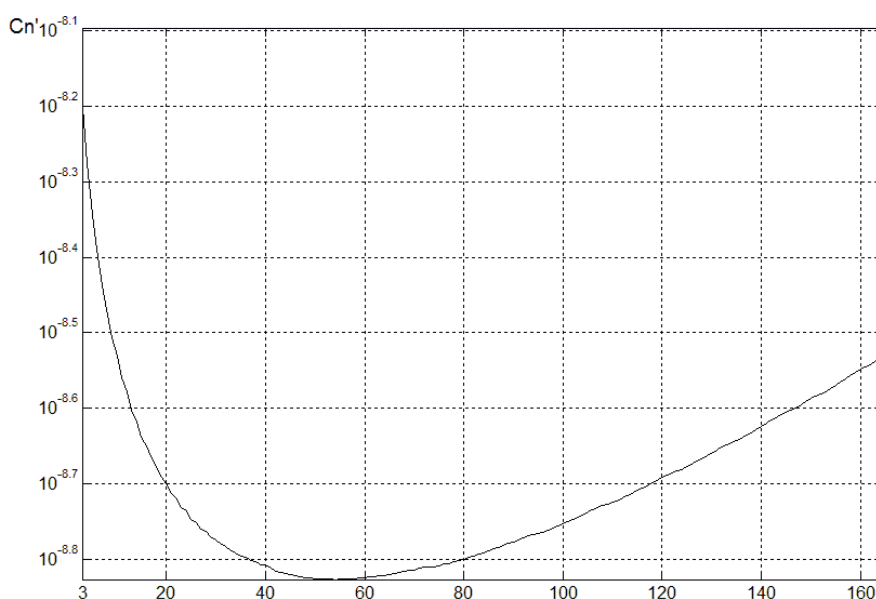


Рис. 3. Обчислені степеневі дисперсії помилок моделі LPE200

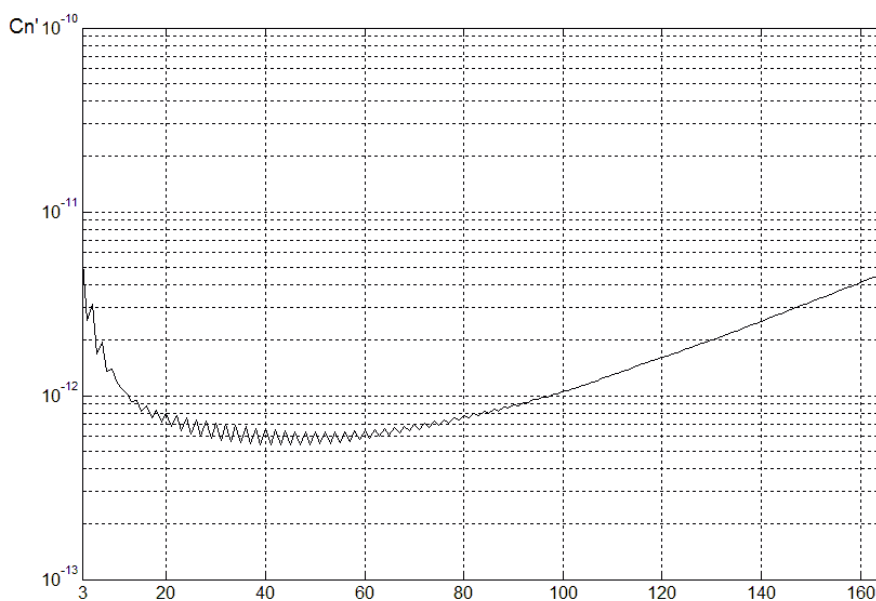


Рис. 4. Обчислені степеневі дисперсії помилок моделі GL0660PRIM

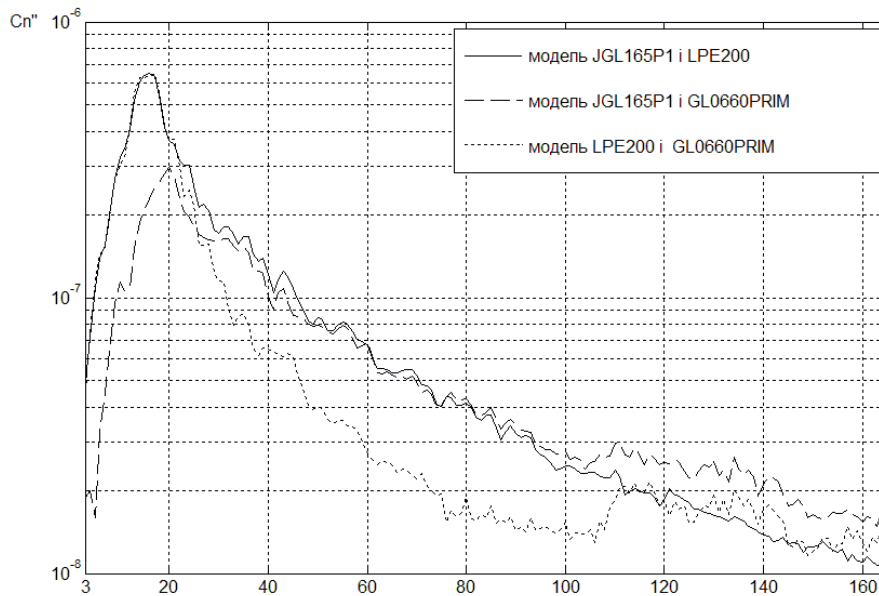


Рис. 5. Степеневі дисперсії різниць коефіцієнтів \bar{C} і \bar{S} трьох моделей

1. Зазуляк П.М. Моделювання зовнішнього гравітаційного поля, геометричної фігури та внутрішньої будови Місяця: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. — Львів, 1997.
2. Ananda M.P., Ferrari A.J., Sjogren W.L. An improved lunar moment of inertia determination: a proposed strategy // *Moon*. — 1977. — **17**, № 1. — С.101–120.
3. Asmar S.W., Konopliv A.S., Watkins M.M., et al. The Scientific Measurement System of the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission. — Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013.
4. Barthelmes F. Coefficients and related data for the Lunar gravity field. — ICGEM, GFZ Potsdam. Електронний ресурс, <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>.
5. Bertone S., Arnold D., Jaggi A., et al. GRAIL field determination using the Celestial Mechanics Approach — status report // European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2015.
6. Han S.-C., Mazarico E., Rowlands D.D., Lemoine F.G. New analysis of Lunar Prospector radio tracking data improves the nearside gravity field with a higher resolution to degree and order // 42nd Lunar and Planetary Science Conference, The Woodland, Texas, 2011.
7. Klipstein W.M., Arnold B.W., Enzer D.G., et al. The Lunar Gravity Ranging System for the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission. — Springer — New York, 2014. — P.57–76.
8. Konopliv A.S., Asmar S.W., Carranza E., et al. Recent Gravity Models as a Result of the Lunar Prospector Mission // *Icarus*. — 2001. — **150**. — P.1–18.
9. Konopliv A.S., Binder A.B., Hood L.L., et al. Improved Gravity Field of the Moon from Lunar Prospector // *Science*. — 1998.
10. Liu Q., Matsumoto K., Iwata T., et al. Effect of in-situ phase characteristics of antennas onboard flying spin satellites of Doppler measurements for lunar gravity field // *IEEE Trans Aerospace Electron Syst*(in press), 2014. Електронний ресурс, https://www.researchgate.net/publication/265194144_Effect_of_In-situ_Phase_Characteristics_of_Antennas_Onboard_Flying_Spin_Satellites_on_Doppler_Measurements_for_Lunar_Gravity_Field.
11. Muller P., Sjogren W. Mascons: lunar mass concentrations // *Science*. — 1968. — **161**. — P.680–684.
12. Williams D.R. Orbiter (1966–1967) NASA Goddard Space Flight Center.
13. Williams D.R. Clementine Project Information NASA Goddard Space Flight Center // Електронний ресурс, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/clementine.html>.
14. Williams J.G., Boggs D.H., Folkner W.M. DE421 Lunar Orbit, Physical Librations, and Surface Coordinates // Interoffice memorandum IOM 335-JW,DB,Wf-20080314-001, March 14, 2008.
15. Zuber M.T., Smith D.E., Watkins M.M., et al. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission // *Science reports*, 2013.
16. Space probe Luna-10 Russian space program // Електронний ресурс, <http://www.space-ru.com/russian-space-probes/space-probe-luna-10>.
17. Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) // PDS Geosciences Node Washington University in St.Louis. Електронний ресурс, <http://geo.pds.nasa.gov/missions/lro/default.htm>.

Надійшла до редакції 22.06.2016
 Прийнята до друку 30.06.2016