



Учет лунно-солнечных приливов в гравиметрических измерениях

С.С. Рахмонов^{1, 2}✉, А.С. Рахманов¹

АФФИЛИАЦИИ

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Солнечногорск, Россия

✉ rahmonov_samandar@inbox.ru

ЦИТИРОВАНИЕ

Рахмонов С.С., Рахманов А.С. Учет лунно-солнечных приливов в гравиметрических измерениях // Пространственные данные: наука и технологии. 2025. Т. 16, № 4. С. 94–109. DOI:10.30533/scidata-2025-16-04.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

лунно-солнечный прилив, составляющие прилива, формулы Лонгмана, зенитное расстояние, юлианское столетие, геодезическая система координат, теория приливов

АННОТАЦИЯ

При изучении геодинамических эффектов и решении высокоточных задач геодезии предъявляются повышенные требования к точности геодезических (в том числе гравиметрических) измерений. В настоящее время гравиметрические измерения производятся современными электронными гравиметрами. Известно, что основные ошибки, влияющие на гравиметрические измерения, — это инструментальные (ошибка отсчета, ошибки уровней, упругий гистерезис, нестабильность питания, ошибки калибровочной функции) и возникающие за счет влияния внешней среды (температура, атмосферное давление, магнитное поле и сотрясения). Кроме того, гравиметрические измерения подвержены воздействию другого фактора — гравитационного поля Луны и Солнца. Учет этого влияния важен, если речь идет о задачах, в которых к точности измерений предъявляются повышенные требования (например, анализ геодинамических эффектов или обработка

высокоточного нивелирования). Исходными данными для проведения этого исследования служат координаты (в геодезической системе координат — BLH) точек земной поверхности и эфемериды Луны и Солнца. Математический аппарат для вычисления поправок реализован в интерактивной среде для численных вычислений MATLAB. Результатом стали вычисленные составляющие лунно-солнечных приливов, выражающие количественное изменение силы тяжести.

1 Введение

Теория приливов сложна тем, что она зависит от повторяемости небесных явлений. Известно о трех основных системах движения планет¹, две из которых геоцентрические (системы Птолемея и Тихо Браге), а одна — гелиоцентрическая (система Коперника). Однако до того, как были выработаны основные понятия всех этих систем, Евдокс Книдский (409–355 гг. до н. э.), руководствуясь, возможно, философскими идеями Платона и пифагорейцев, создал систему, включающую 27 геоцентрических хрустальных сфер. На одной из них расположены звезды, и она служит для объяснения суточного движения звезд по небу, три сферы нужны для объяснения движения Солнца и Луны и четыре — для полного описания движения планет (каждая сфера равномерно вращается).

Среди исследователей XX столетия можно отметить М.С. Молоденского и М.В. Крамера², И.М. Лонгмана (I.M. Longman)³, Дж.Б. Мерриاما (J.B. Merriam)⁴, У.Х. Манка, Д.Е. Картрайта, Э.К. Булларда (W.H. Munk, D.E. Cartwright, E.C. Bullard)⁵ и др., в трудах которых описан математический аппарат, позволяющий вычислить приливы.

Целью статьи служит разбор существующего метода учета лунно-солнечных поправок в измерениях. Для достижения данной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- проанализировать математический аппарат существующего метода учета поправок за лунно-солнечный прилив;
- вычислить поправки за лунно-солнечный прилив и выделить ее периодическую составляющую;

¹ Херрик С. Астродинамика: в 3 т. / пер. с англ. языка С.А. Мирера, А.Г. Сокольского; под ред. В.А. Сарычева. М.: Мир, 1976. Т. 1. 314 с.

² Молоденский М.С., Крамер М.В. Земные приливы и нутация Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 40 с.

³ Longman I.M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64. No. 12. P. 2351–2355.

⁴ Merriam J.B. An Ephemeris for Gravity Tide Predictions at the Nanogal Level // Geophysical Journal International. 1992. Vol. 108. Iss. 2. P. 415–422.

⁵ Munk W.H., Cartwright D.E., Bullard E.C. Tidal Spectroscopy and Prediction // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1966. Vol. 259. No. 1105. P. 533–581.

- выполнить сравнительный анализ вычисленной приливной поправки и поправок, рассчитанных относительным гравиметром Autograv CG-6 (Scintrex).

В современных электронных гравиметрах приливная поправка вычисляется по формулам из научной статьи Лонгмана [1, 2], где не учитывается эластичность Земли и не вводятся коэффициенты Лява в приливные поправки, помимо этого есть некоторые особенности в вычислении часового угла небесных тел. Учет коэффициентов Лява и упомянутых особенностей сделает приливную поправку точнее [3, 4] и разрешит сложности в понимании научной статьи Лонгмана. Точные приливные поправки позволят в определенной мере улучшить качество гравиметрических измерений, что даст возможность применять последние в высокоточном нивелировании для решения задач геодинамики на геодинмических полигонах [5–9].

2 Материалы и методы

В теории приливов потенциал приливообразующей силы тяжести разлагается на элементарные гармонические члены, пропорциональные основным и присоединенным полиномам Лежандра, начиная со второго порядка. Члены второго порядка считаются основными, но члены выше второго порядка вносят вклад в результаты наблюдений и могут быть вычислены с повышением точности измерений⁶.

Выделяют две составляющих приливов (горизонтальную и вертикальную), каждая из которых вычисляется отдельно. Лунный прилив можно вычислить по формулам

$$1 \quad g_n = \frac{GM_n}{\rho_n^3} \times \rho \times (3\cos^2 z_n - 1) + \frac{3}{2} \times \frac{GM_n}{\rho_n^4} \times \rho^2 \times (5\cos^3 z_n - 3\cos z_n),$$

$$2 \quad h_n = \frac{3}{2} \times \frac{GM_n}{\rho_n^2} \times \rho \times \sin 2z_n + \frac{3}{2} \times \frac{GM_n}{\rho_n^4} \times \rho^2 \times (5\cos^2 z_n - 1) \times \sin z_n,$$

где g_n — вертикальная составляющая лунного прилива;

GM_n — гравитационная геоцентрическая постоянная Луны;

ρ_n — линейное расстояние от центра масс Земли до центра Луны;

ρ — геоцентрическое расстояние до точки земной поверхности;

z_n — зенитное расстояние Луны;

h_n — горизонтальная составляющая лунного прилива.

⁶ Молоденский М.С., Крамер М.В. Земные приливы и нутация Земли. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 40 с.

У солнечного прилива также выделяют две составляющие, которые вычисляются отдельно:

$$3 \quad g_c = \frac{GM_c}{\rho_c^3} \times \rho \times (3\cos^2 z_c - 1),$$

$$4 \quad h_c = \frac{3}{2} \times \frac{GM_c}{\rho_c^3} \times \rho \times \sin 2z_n z_c,$$

где g_c — вертикальная составляющая солнечного прилива;
 GM_c — гравитационная геоцентрическая постоянная Солнца;
 ρ_c — линейное расстояние от центра масс Земли до центра Солнца;
 z_c — зенитное расстояние Солнца;
 h_c — горизонтальная составляющая солнечного прилива.

Общий эффект от вертикальной и горизонтальной составляющих приливной силы можно найти путем их сложения:

$$5 \quad g_{\text{общ}} = g_n + g_c,$$

$$6 \quad h_{\text{общ}} = h_n + h_c,$$

где $g_{\text{общ}}$ — общая вертикальная составляющая лунного и солнечного приливов;
 $h_{\text{общ}}$ — общая горизонтальная составляющая лунного и солнечного приливов.

Земля воспринята как нетвердый объект, учитывается эластичность Земли путем введения коэффициентов Лява в конечные результаты формул (1)–(4):

$$7 \quad love = 1 + h_2 - 1,5 \times k_2,$$

где h_2, k_2 — коэффициенты Лява, при этом $h_2 = 0,612$ (варьируется в диапазоне 0,603–0,624), $k_2 = 0,303$ (варьируется в диапазоне 0,298–0,319).

Чтобы вычислить составляющие прилива для любой точки земной поверхности, необходимо знать зенитные расстояния до Луны z_n и Солнца z_c , линейные расстояния от центра масс Земли до центра Луны ρ_n и Солнца ρ_c , а также геоцентрическое расстояние до точки земной поверхности ρ . Здесь z_n, z_c, ρ_n, ρ_c рассматриваются как функция времени, а геоцентрическое расстояние — как функция широты.

Косинус зенитного расстояния до Луны и Солнца зависит от широты места наблюдения и некоторых параметров орбит и вычисляется по известным формулам:

$$8 \quad \cos z_n = \sin B \sin l \sin l_n + \cos B \left[\left(\cos^2 \frac{l}{2} \right) \cos(l_n - x_n) + \sin^2 \frac{l}{2} \cos(l_n + x_n) \right],$$

$$9 \quad \cos z_c = \sin B \sin \omega \sin l_c + \cos B \left[\cos^2 \frac{\omega}{2} \cos(l_c - x_c) + \sin^2 \frac{\omega}{2} \cos(l_c + x_c) \right],$$

где B — геодезическая широта;

I — наклон орбиты Луны к небесному экватору;

ω — наклон плоскости экватора Земли к эклиптике;

l_n — долгота Луны на собственной орбите;

l_c — долгота Солнца на эклиптике, отсчитываемая от точки весеннего равноденствия;

x_n — прямое восхождение меридиана места наблюдений, отсчитываемое от точки пересечения небесного экватора с лунной орбитой;

x_c — прямое восхождение меридиана места наблюдений, отсчитываемое от точки весеннего равноденствия.

Долгота Луны на ее собственной орбите может быть вычислена следующим образом:

$$10 \quad l_n = \sigma + 2e_n \sin(s - p_n) + \frac{5}{4}e_n^2 \sin 2(s - p_n) + \frac{15}{4}me_n \sin(s - 2h + p_n) + \frac{11}{8}m^2 \sin 2(s - h),$$

$$11 \quad l_c = h + 2e_3 \times \sin(h - p_c),$$

при этом σ — средняя долгота (в радианах) Луны на ее собственной орбите, отсчитываемой от точки пересечения плоскости экватора с орбитой Луны, — находится по формуле

$$12 \quad \sigma = s - \xi,$$

где s — средняя долгота Луны на ее собственной орбите, отсчитываемая от местной точки равноденствия;

ξ — долгота восходящего узла точки пересечения орбиты Луны с небесным экватором;

e_n — эксцентриситет орбиты Луны;

p_n — средняя долгота перигея Луны;

h — средняя долгота Солнца;

m — соотношение среднего движения Солнца к Луне;

e_3 — эксцентриситет орбиты Земли;

p_c — средняя долгота перигея Солнца.

Средние долготы s , p_n , p_c и h вычисляются по известным формулам, а их результат сильно зависит от эфемерид и эпохи (т.е. юлианского столетия):

$$13 \quad s = 270^\circ 26' 14,72'' + (1336^x + 1108411'')T + 9,09'' \times T^2 + 0,0068'' \times T^3,$$

$$14 \quad p_{\lambda} = 334^{\circ}19'87'' + (11^{\circ} + 392515,94'')T - 37,24'' \times T^2 - 0,045'' \times T^3,$$

$$15 \quad p_{\epsilon} = 281^{\circ}13'15,0'' + 6189,03'' \times T + 1,63'' \times T^2 + 0,012'' \times T^3,$$

$$16 \quad h = 279^{\circ}41'48,04'' + 129602768,13'' \times T + 1,089'' \times T^2,$$

при этом

$$17 \quad T = \frac{(JD - 2451545,0)}{36525},$$

где T — промежуток времени в юлианских столетиях по 36 525 средних солнечных суток, отсчитываемый от стандартной эпохи (например, J2000,0) до рассматриваемого момента;

JD — юлианская дата, отсчитываемая по всемирному времени от полудня 1 января 4713 года до н.э., $1^{\circ} = 360^{\circ}$.

Часто из-за особенностей встроенных функций для вычисления юлианской даты в разных статистических программах (MATLAB), нарушается непрерывность графиков приливных поправок. В связи с этим стоит использовать формулу (18) [10] вместо встроенных функций:

$$18 \quad JD = \text{целое}(365,25 \times \text{год}) + \text{целое}(30,6001 \times (\text{месяц} + 1)) + \text{ДЕНЬ} + \\ + \frac{\text{время UT}}{24,0} + 1720981,5;$$

где год = ГОД – 1, месяц = МЕСЯЦ + 12 при МЕСЯЦ ≤ 2;

год = ГОД, месяц = МЕСЯЦ при МЕСЯЦ > 2.

Эфемериды, используемые в формулах для вычисления s , p и h , могут различаться в зависимости от юлианского столетия.

$$19 \quad \xi = N - a,$$

где N — долгота восходящего узла Луны, отсчитываемая от проекции точки весеннего равноденствия на орбиту Луны;

$$20 \quad a = 2 \arctan \left[\frac{\sin a}{1 + \cos a} \right].$$

Для вычисления склонения a необходимо найти $\sin a$ и $\cos a$, отношение которых позволит вычислить $\tan a$:

$$21 \quad \sin a = \frac{\sin \omega \sin N}{\sin i},$$

22

$$\cos a = \cos N \cos v + \sin N \sin v \cos \omega,$$

где a — склонение;

v — долгота точки небесного экватора, образованной пересечением небесного экватора с орбитой Луны.

Долготу восходящего узла Луны, отсчитываемую от проекции точки весеннего равноденствия на лунную орбиту, можно вычислить следующим образом:

23

$$N = 259^\circ 10' 57,12'' - (5^x + 482912,63'') \times T + 7,58'' \times T^2 + 0,008'' \times T^3.$$

Для вычисления наклона орбиты Луны по отношению к плоскости небесного экватора применяется формула (23). Наклон орбиты Луны постоянно меняется, но всегда в пределах $18-28^\circ$:

24

$$\cos i = \cos \omega \times \cos i - \sin \omega \sin i \cos N,$$

где i — наклон орбиты Луны к эклиптике.

Прямое восхождение меридиана места наблюдений x связано с часовым углом t , средней долготой Солнца h и склонением v и вычисляется так:

25

$$x_n = t + h - a,$$

26

$$x_c = t + h.$$

Часовой угол для точки с известной геодезической долготой вычисляется по формуле

27

$$t = 15(t_0 - 12) - L,$$

где t_0 — Гринвичское время, выраженное в часах;

L — геодезическая долгота.

При вычислении часового угла t по формуле (27) необходимо учесть знаки для долготы и отличия местного времени от Всемирного координированного времени (UTC) (на отсчетном меридиане). Для точек западного полушария долгота L должна быть положительной, для восточного полушария — отрицательной. Такое же правило должно быть соблюдено для отличия местного времени от UTC.

Лунный и солнечный приливы могут быть вычислены, если известны расстояния между центрами Земли — Луны r_n и Земли — Солнца r_c , по следующим формулам:

$$28 \quad \frac{1}{\rho_n} = \frac{1}{\bar{\rho}_n} + a'_n \times e_n \times \cos(s - p_n) + a'_n \times e_n^2 \cos 2(s - p_n) + \left(\frac{15}{8}\right) + a'_n \times m^2 \cos 2(s - h),$$

$$29 \quad \frac{1}{\rho_c} = \frac{1}{\bar{\rho}_c} + a'_c \times e_c \times \cos(h - p_c),$$

при этом

$$30 \quad a'_n = \frac{1}{[\rho_n(1 - e_n^2)]},$$

$$31 \quad a'_c = \frac{1}{[\rho_c(1 - e_c^2)]},$$

где $\bar{\rho}_n$ — среднее расстояние между центрами Земли и Луны;

$\bar{\rho}_c$ — среднее расстояние между центрами Земли и Солнца.

Формулы (1) – (31), по сути, являются математическим аппаратом, позволяющим вычислить составляющие лунного и солнечного приливов силы тяжести.

3 Результаты и обсуждение

Приведенные результаты вычислены (или моделированы) формулами Лонгмана⁷, попытка разбора которых выполняется в настоящей статье. Приливы, как сказано выше, вычисляются отдельными составляющими: вертикальными (g_n , g_c) и горизонтальными (h_n , h_c). Все вычисления выполнены в интерактивной среде для численных вычислений MATLAB. Согласно [3], существуют статически важные отклонения суточных и полусуточных приливных составляющих, позволяющие наблюдать количественное изменение силы тяжести, от теоретических, в качестве которых можно принять результаты, полученные по формулам Лонгмана.

На **рис. 1** хорошо наблюдаются периоды изменения приливов (имеют гармонический характер), варьирующиеся от – 100 до + 60 мГал. На графике показан период со второй половины дня 2 апреля по вторую половину дня 6 апреля 2025 года.

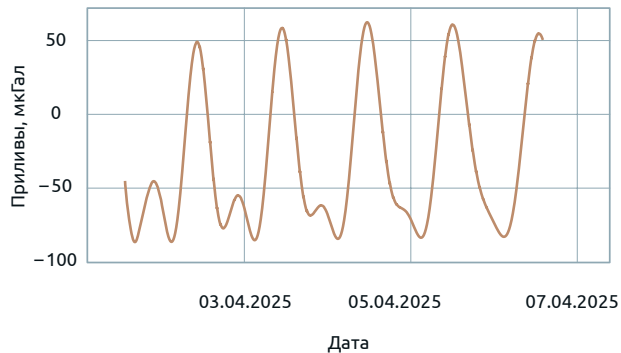
При сравнении с приливами, вычисленными внутренней программой относительного гравиметра Autogрав CG-6 (**рис. 2**), образовались неодинаковые значения. Причинами могут быть неправильно подобранные коэффициенты Лява и положения Луны и Солнца.

⁷ Longman I.M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64. No. 12. P. 2351–2355.

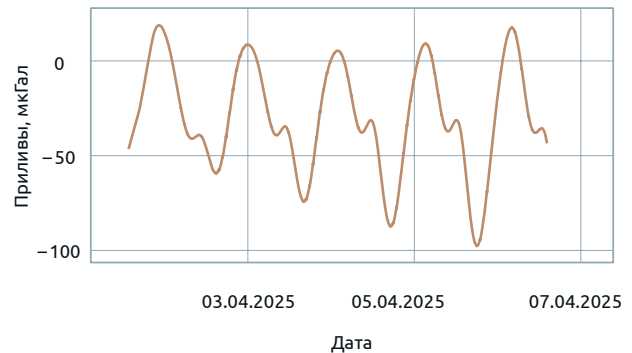
Рис. 1 Графическое представление вычисленных приливов (вертикальных, горизонтальных и их суммы)

Fig. 1 Graphical representation of calculated tides (vertical, horizontal and their sum)

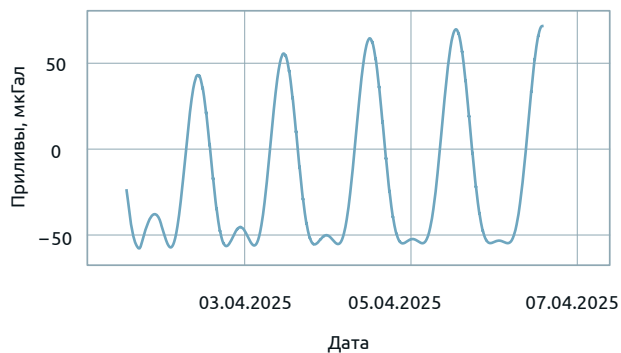
**Вертикальная составляющая
лунно-солнечного прилива**



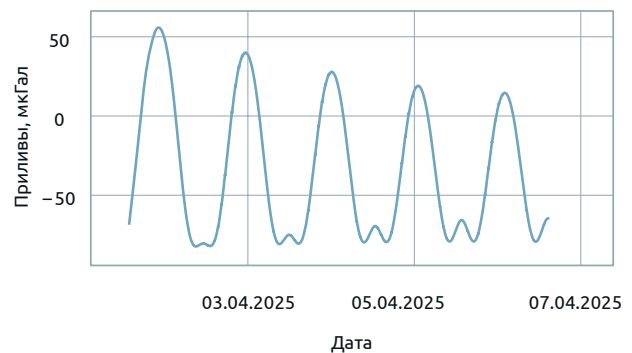
**Горизонтальная составляющая
лунно-солнечного прилива**



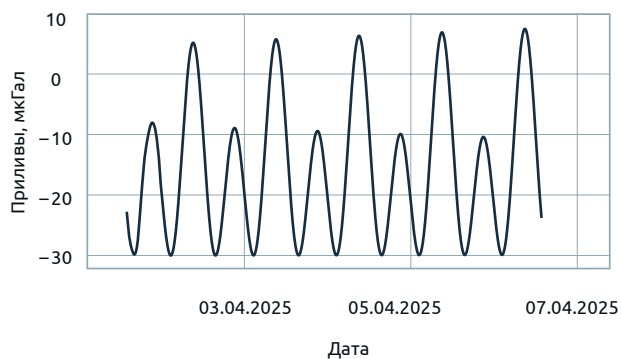
**Вертикальная составляющая
лунного прилива**



**Горизонтальная составляющая
лунного прилива**



**Вертикальная составляющая
солнечного прилива**



**Горизонтальная составляющая
солнечного прилива**

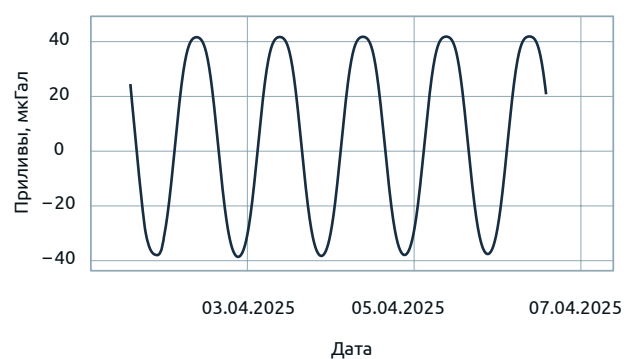
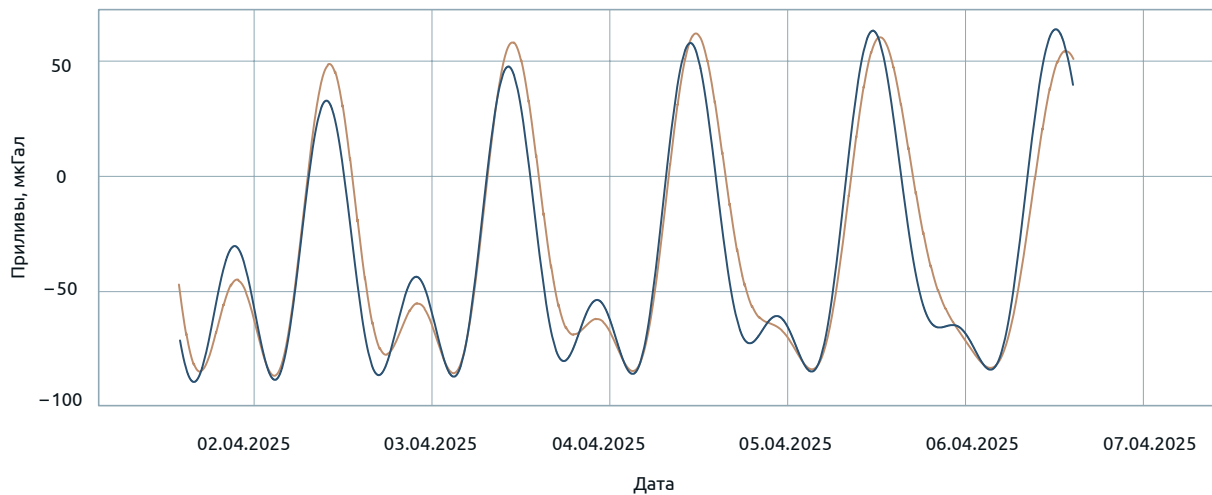


Рис. 2 Сравнение вертикальной составляющей лунно-солнечного прилива по формулам Лонгмана с приливными поправками относительного гравиметра Autograv CG-6

Fig. 2 Comparison of the vertical component of the lunar-solar tide using Longman formulas with tidal corrections of the Autograv CG-6 relative gravimeter

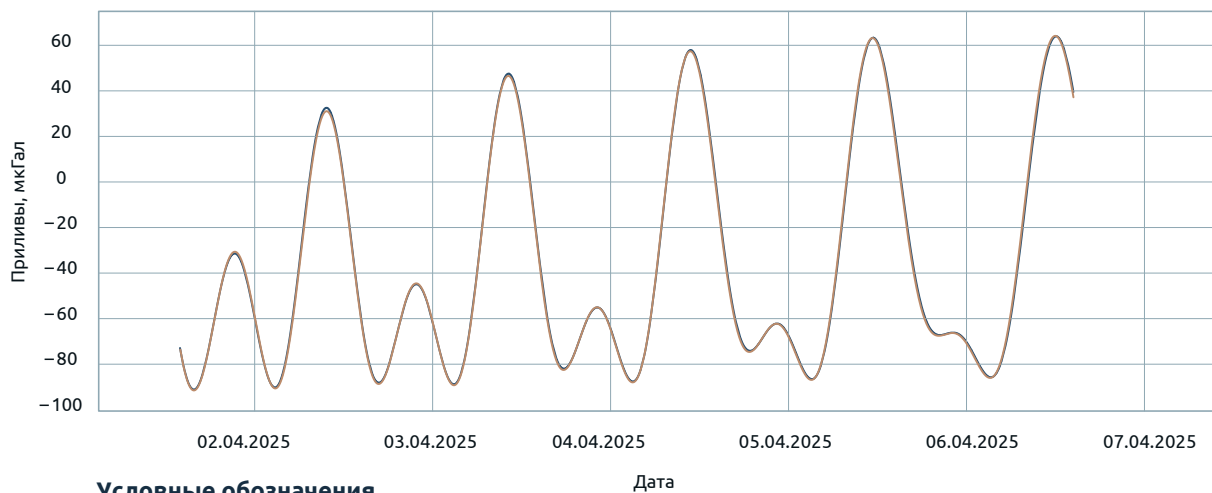
**Сравнение приливных поправок
(вертикальная составляющая лунно-солнечных приливов)**



Условные обозначения

- Longman
- Scintrex

**Сравнение приливных поправок
(вертикальная составляющая лунно-солнечных приливов)**



Условные обозначения

- Longman*
- Scintrex

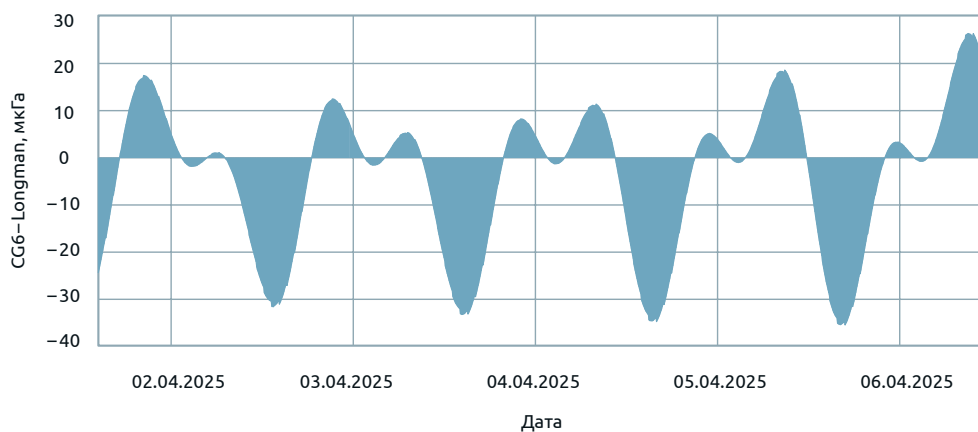
Эфемериды, полученные из онлайн-источника Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН)⁸, позволили получить очень похожие с CG-6 результаты, различия варьируются в диапазоне от -4 до $+6$ мкГал (рис. 3). Решение, названное Longman (рис. 3), получено по формулам Лонгмана (31 формула), для второго решения Longman* используются только первые четыре формулы (1)–(4) его статьи. При этом зенитные расстояния Луны z_l и Солнца z_c вместе с линейными расстояниями ρ_l и ρ_c до их центров заимствованы из онлайн-службы эфемерид ИПА РАН (в соответствии с планетарной теорией DE440).

В высокоточных задачах геодезии и гравиметрии необходимо это учитывать, т.к. поле силы тяжести от ближайших небесных тел вносит изменения в разность потенциалов на Земле, следовательно, это может привести к изменению высотной отметки, например репера.

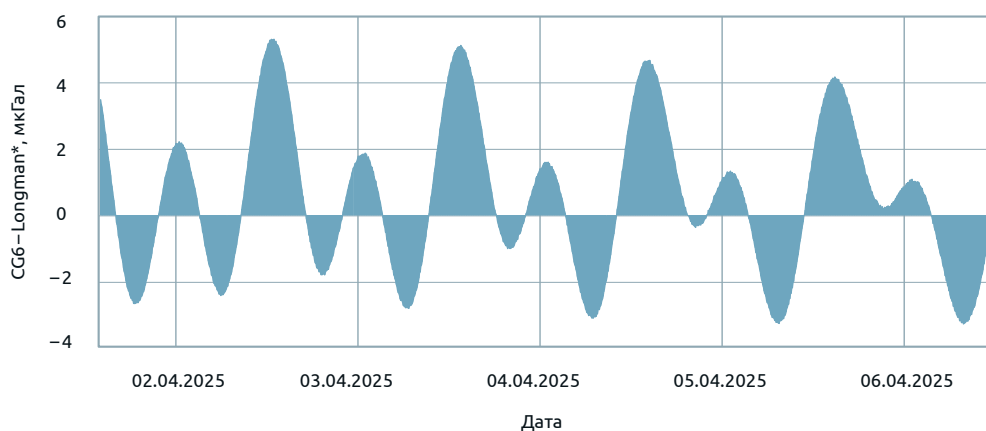
Рис. 3 Различия приливных поправок, рассчитанных по формулам Лонгмана и вычисленных относительным гравиметром Autograv CG-6

Fig. 3 Differences in tidal corrections using Longman formulas and the Autograv CG-6 relative gravimeter

Longman vs. относительный гравиметр Autograv CG-6



Longman* vs. относительный гравиметр Autograv CG-6



⁸ Онлайн-служба эфемерид // Институт прикладной астрономии Российской академии наук: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iaaras.ru/dept/ephemeris/online> (дата обращения: 13.04.2025).

4 Выводы

Исследование представляет собой разбор существующего метода вычисления лунно-солнечных приливов. Поставленная цель достигнута: была проанализирована статья И.М. Лонгмана (I.M. Longman) “Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun”, в которой есть несколько методических ошибок. Причиной разбора послужило частое использование данной работы на практике [1, 2], например во встроенной программной составляющей современных статических гравиметров Autograv от Micro-g LaCoste.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность заведующему кафедры астрономии и космической геодезии МИИГАиК В.И. Крылову и доценту кафедры высшей геодезии МИИГАиК В.В. Попадьеву за ценные консультации.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Trabanco J. Calculation of the Tide Correction Used in Gravimetry // Revista Brasileira de Geofísica. 2016. Vol. 34(2). P. 193–206. DOI:10.22564/RBGF.V34I2.793.
2. Bjelotomić Oršulić O., Varga M., Markovinović D., et al. LTide – Matlab/Octave software Tool for Temporal and Spatial Analysis of Tidal Gravity Acceleration Effects According to Longman Formulas // Earth Science Informatics. 2019. No. 12. P. 405–414.
3. Утёмов Э.В., Нургалиев Д.К., Харисов А.Г. и др. О возможной связи амплитудных аномалий суточных и полусуточных компонент приливных вариаций силы тяжести с термоупругими свойствами земной коры (по данным наблюдений с гравиметрами CG-5 Autograv) // Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки. 2012. Т. 154, № 4. С. 29–36.
4. Колмогоров В.Г., Калюжин В.А., Сачкова А.Н. Вычисление поправок за лунно-солнечный прилив в результаты прецизионного нивелирования // Вестник СГУГиТ. 2017. Т. 22, № 1. С. 101–109.
5. Сидоренков Н.С. Лунно-солнечные приливы и атмосферные процессы // Природа. 2008. № 2 (1110). С. 23–31.
6. Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. Сейсмоакустическая эмиссия, землетрясения и лунно-солнечные приливы // Доклады Академии наук. 2008. Т. 420, № 3. С. 388–389.
7. Антонов Ю.В., Антонова И.Ю. Запаздывание приливной волны на земной суше // Геофизика. 2013. № 6. С. 48–51.
8. Рахманов А.С., Рахмонов С.С. Обзор геодинамических полигонов Таджикистана для упрощенного ретроспективного анализа // ГеоРиск. 2022. Т. 16, № 3. С. 50–60. DOI:10.25296/1997-8669-2022-16-3-50-60.

9. Семаков Д.Г., Семакова Э.Р. Лунно-Солнечные приливы как один из возможных триггеров возникновения землетрясений // Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов VII Международной конференции, Долгопрудный, 2–5 июля 2024 г. М.: Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, 2024. С. 116.
10. Subirana J.S., Zornoza J.M.J., Hernández-Pajares M. GNSS Data processing. Vol. I: Fundamentals and Algorithms. Noordwijk: ESA Communications, 2013. 223 p.

АВТОРЫ

Рахмонов Самандар Саматович

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений» (ВНИИФТРИ), Солнечногорск, Россия;
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра высшей геодезии, геодезический факультет
 0000-0002-1687-0540

Рахманов Алиджон Саматович

 alirakhmonov96@mail.ru
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра астрономии и космической геодезии, геодезический факультет
 0000-0001-7015-4142

Поступила 06.08.2025. Принята к публикации 22.12.2025. Опубликовано 29.12.2025.

UDC 528.21

DOI:10.30533/scidata-2025-16-04



Accounting of Lunar-Solar Tides in Gravimetric Measurements

Samandar S. Rakhmonov^{1,2}✉, Alidzhon S. Rakhmanov¹

AFFILIATIONS

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia

² Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering, Moscow, Russia

✉ rahmonov_samandar@inbox.ru

CITATION

Rakhmonov SS, Rakhmanov AS. Accounting of Lunar-Solar Tides in Gravimetric Measurements. *Spatial Data: Science, Research and Technology*. 2025;16(4): 94–109. DOI:10.30533/scidata-2025-16-04.

KEYWORDS

lunar-solar tide, tide components, Longman's formulas, zenith distance, Julian century, geodetic coordinate system, tide theory

ABSTRACT

In order to study geodynamic effects and solve high-precision geodesy problems, geodetic measurements, including gravimetric measurements, have increased accuracy requirements. Currently, gravimetric measurements are performed by modern electronic gravimeters. It is known that the sources of errors affecting gravimetric measurements are instrumental errors (reference error, level errors, elastic hysteresis, power instability, calibration function errors) and errors caused by the influence of the external environment (temperature, atmospheric pressure, magnetic field and shaking). In addition to the above, it is also known that gravimetric measurements are influenced by another factor – the gravitational field of the Moon and the Sun. Taking this influence into account is important when it comes to tasks in which measurements are subject to increased accuracy requirements, for example, geodynamic effects or high-precision leveling processing. The initial data for this study are the coordinates (in the geodetic coordinate

system, *BLH*) of the points of the Earth's surface and the ephemeris of the Moon and the Sun. The mathematical apparatus for calculating corrections is implemented in the interactive environment for numerical calculations MATLAB. The result is the calculated components of the lunar-solar tides, expressing a quantitative change in gravity.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank V.I. Krylov, Head of the Department of Astronomy and Space Geodesy, Moscow State University of Geodesy and Cartography, and V.V. Popadyev, Associate Professor of the Department of Higher Geodesy, Moscow State University of Geodesy and Cartography, for their valuable consultations.

REFERENCES

1. Trabanco J. Calculation of the Tide Correction Used in Gravimetry. *Revista Brasileira de Geofísica*. 2016;34(2): 193–206. DOI:10.22564/RBGF.V34I2.793.
2. Bjelotomić Oršulić O., Varga M., Markovinović D., et al. LTide – Matlab/Octave software Tool for Temporal and Spatial Analysis of Tidal Gravity Acceleration Effects According to Longman Formulas. *Earth Science Informatics*. 2019;12: 405–414.
3. Utemov EV, Nurgaliev DK, Kharisov AG, et al. O vozmozhnoi svyazi amplitudnykh anomalii sutochnykh i polusutochnykh komponent prilivnykh variatsii sily tyazhesti s termouprugimi svoistvami zemnoi kory (po dannym nablyudenii s gravimetrami CG-5 Autograv) [A Possible Relationship of Amplitude Anomalies in Diurnal and Semidiurnal Tidal Components of Gravity Variations to Thermoelastic Properties of the Earth's Crust as Observed Using Gravimeters CG-5 Autogravv]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*. 2012;154(4): 29–36. (In Russian).
4. Kolmogorov VG., Kaluzhin, AN. Sachkova. Vychislenie popravok za lunno-solnechnyi priliv v rezul'taty pretsizionnogo nivelirovaniya [Calculation for Amendments Lunisolar Tide the Results of Precision Leveling]. *Vestnik SSUGT*. 2017;22(1): 101–109. (In Russian).
5. Sidorenkov NS. Lunno-solnechnye prilivy i atmosferynye protsessy [Luni-Solar Tides and Atmospheric Processes]. *Priroda*. 2008;2(1110): 23–31. (In Russian).
6. Belyakov AS, Lavrov VS, Nikolaev AV. Seismoakusticheskaya emissiya, zemletryaseniya i lunno-solnechnye prilivy [Seismoacoustic Emission, Earthquakes, and Lunar-Solar Tides]. *Reports of the Academy of Sciences*. 2008;420(13): 388–389. (In Russian).
7. Antonov YuV, Antonova IYu. Zapazdyvanie prilivnoi volny na zemnoi sushe [The Delay of the Tidal Wave on the Earth's Land]. *Geophysics*. 2013;6: 48–51. (In Russian).
8. Rakhmanov A, Rakhmonov S. Obzor geodinamicheskikh poligonov Tadzhikistana dlya uproshchennogo retrospektivnogo analiza [Overview of Geodynamic Polygons of Tajikistan for Simplified Retrospective Analysis]. *GeoRisk World*. 2022;16(3): 50–60 (In Russian). DOI:10.25296/1997-8669-2022-16-3-50-60.
9. Semakov DG, Semakova ER. Lunno-Solnechnye prilivy kak odin iz vozmozhnykh triggerov vozniknoveniya zemletryaseniya [Lunar-Solar Tides as One of the Possible

Triggers of Earthquakes]. *Trigger Effects in Geosystems: Abstracts of Reports of the 7th International Conference, Dolgoprudny, July 2–5, 2024*. Moscow: Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences; 2024: 116. (In Russian).

10. Subirana JS, Zornoza JM, Hernández-Pajares M. *GNSS Data processing. Vol. I: Fundamentals and Algorithms*. Noordwijk: ESA Communications; 2013. 223 p.

AUTHORS

Samandar S. Rakhmonov

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radioengineering,
Solnechnogorsk, Russia;
Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Higher Geodesy, Faculty of Geodesy

 0000-0002-1687-0540

Alidzhon S. Rakhmanov

 alirakhmonov96@mail.ru

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Astronomy and Space Geodesy, Faculty of Geodesy

 0000-0001-7015-4142

Submitted: August 6, 2025. Accepted: December 22, 2025. Published: December 29, 2025.