Классический и эксцентрический подход к вычислению прецессии перигелия Меркурия

В. М. Беляев
Свободный исследователь, 634045 Томск, Россия

Аннотация

Проводится сравнительный анализ двух альтернативных объяснений аномальной прецессии перигелия Меркурия, не использующих кривизну пространства-времени. Первый подход развит в серии работ V. M. dos Santos Godoi (viXra:1410.0133 и связанные статьи), где вся наблюдаемая вековая прецессия $\approx 5600''$/век выводится классически — из возмущений по теории Лапласа—Стоквелла с добавлением прецессии равноденствий на эпоху 1850 г. Второй подход развит нами: аномальная добавка $42{,}98''$/век воспроизводится *без разложения в ряд* из замкнутой поправки $3GMu^2/c^2$ в уравнении Бине, возникающей из геометрии косоугольной эксцентрической системы координат (КЭСК). Показано, что подходы решают разные задачи: Godoi объясняет полную прецессию (включая геометрическую составляющую прецессии равноденствий), тогда как КЭСК — только динамическую аномалию. Обсуждаются сильные стороны и ограничения обоих подходов и их отношение к общей теории относительности.

Ключевые слова: прецессия перигелия, Меркурий, теория Лапласа—Стоквелла, КЭСК, запаздывание потенциала, уравнение Бине, общая теория относительности, критический сравнительный анализ.

Abstract: A comparative analysis of two alternative explanations of the anomalous Mercury perihelion precession that do not use the curvature of space-time is carried out. The first approach is developed in a series of works by V. M. dos Santos Godoi (viXra:1410.0133 and related papers), where the entire observed secular precession of about $5600''$ per century is derived classically from perturbations by the Laplace–Stockwell theory with the addition of the precession of equinoxes at epoch 1850. The second approach is developed by us: the anomalous addition of $42.98''$ per century is reproduced *without expanding in a series* from the closed correction $3GMu^2/c^2$ in the Binet equation arising from the geometry of the oblique eccentric coordinate system (CECC). It is shown that the approaches solve different problems: Godoi explains the total precession (including the geometric component of the equinox precession), while CECC explains only the dynamical anomaly. The strengths and limitations of both approaches and their relation to general relativity are discussed.

Keywords: perihelion precession, Mercury, Laplace–Stockwell theory, CECC, potential retardation, Binet equation, general relativity, critical comparative analysis.

Лицензия: CC BY 4.0 (Creative Commons Attribution 4.0 International).

1 Введение

Аномальная прецессия перигелия Меркурия — одна из центральных проблем небесной механики и физики гравитации. Обнаруженная Леверье в 1859 г. [1] как невязка в $\approx$

$40''$/век между ньютоновской теорией возмущений и наблюдениями, она была объяснена в 1915 г. Эйнштейном [2] в рамках общей теории относительности (ОТО). Однако начиная с конца XIX в. предпринимались многочисленные попытки объяснить эту аномалию без привлечения кривизны пространства-времени.

В настоящей работе сравниваются два таких подхода:

1. **классическая небесная механика Лапласа—Стоквелла**, развитая в серии работ V. M. dos Santos Godoi [3, 4, 5, 6, 7], где утверждается, что ньютоновская механика объясняет *всю* наблюдаемую вековую прецессию;

2. **запаздывание потенциала в косоугольной эксцентрической системе координат (КЭСК)**, развитое в наших работах [10, 11], где воспроизводится именно динамическая аномалия $42{,}98''$/век без кривизны.

Цель работы — показать, что эти подходы, хотя и объединены общим отказом от кривизны, решают по существу разные задачи и потому не являются прямыми конкурентами. Сравниваются их методология, численные результаты, сильные стороны и ограничения, а также отношение каждого к ОТО.

2 Подход Godoi: классическая прецессия Лапласа—Стоквелла

2.1 Содержание работы viXra:1410.0133

В работе [3] Godoi вычисляет вековую скорость долготы перигелия Меркурия в рамках чисто ньютоновской небесной механики, используя теорию Стоквелла (1872) [8], опирающуюся на небесную механику Лапласа [4]. Основная идея — система 16 линейных обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка (по восьми планетам), определяющих секулярные изменения элементов орбит. Долгота перигелия выражается через арктангенс отношения сумм синусов и косинусов.

Ключевые численные результаты:

- динамическая часть прецессии перигелия от взаимных возмущений планет: $\approx 544''{,}96$/век (при масс-коррекции и учёте спутников $544''{,}93$/век);
- добавление прецессии равноденствий Земли на эпоху 1850 г.: $5024''{,}75$/век;
- *итого* $5600''{,}84$/век — совпадение с наблюдённым значением $5600''{,}73 \pm 0{,}41$/век (по Вайнбергу [9]).

Автор заключает, что ньютоновская механика объясняет *всю* вековую прецессию, невязка практически равна нулю, и потому ОТО не объясняет (в его изложении — «неправильно объясняет») прецессию перигелия Меркурия.

2.2 Связанные работы серии

Godoi развивает этот результат в целой серии работ [4, 5, 6, 7]:

- **Three Hypotheses** [4]: три гипотезы о причине аномалии — (1) тела, не учтённые Леверье и Ньюкомом (спутники Юпитера и Сатурна, открытые после XIX в.), (2) широта обсерваторий, выполнявших измерения, (3) солнечный ветер;
- **Solar Wind** [5]: гипотеза о солнечном ветре приводит к уменьшению массы Солнца и, следовательно, к изменению отношений масс планет к массе Солнца, что увеличивает классически вычисленную прецессию;

- **Earth's Rotation** [6]: вращение Земли как возможное объяснение аномалии.

Эти работы образуют согласованную исследовательскую программу: показать, что аномалия перигелия Меркурия полностью объяснима в рамках классической механики без каких-либо релятивистских поправок.

3 Подход КЭСК: запаздывание потенциала

3.1 Физическая основа

Наш подход [10, 11] исходит из гипотезы о конечной скорости распространения гравитации и явлении запаздывания потенциала, идея которого восходит к Гауссу (1835), Веберу (1846) и Герберу (1898) [17]. Потенциал Гербера

$$V = \frac{\mu}{r\left(1 - \frac{1}{c}\frac{dr}{dt}\right)^2} \tag{1}$$

содержит *двойное* запаздывание: первый фактор учитывает запаздывание положения источника, второй — уменьшение скорости переноса потенциала. Разложение до второго порядка даёт добавку к сдвигу перигелия

$$\Delta\varphi = \frac{6\pi GM}{c^2 a(1-e^2)}. \tag{2}$$

3.2 Геометризация в КЭСК

Ключевая особенность нашего подхода — геометризация запаздывания через косоугольную эксцентрическую систему координат. Преобразование

$$z = R(\cos\Theta - \beta), \qquad \rho = R\sin\Theta, \tag{3}$$

и связь фокального радиуса с эксцентрическим

$$r = R\lambda, \qquad \lambda = \sqrt{1 - 2\beta\cos\Theta + \beta^2} \tag{4}$$

порождают в уравнении Бине $u'' + u = \mu/h^2$ замкнутую поправку $3GMu^2/c^2$:

$$u'' + u = \frac{1}{p} + \frac{3GM}{c^2}u^2. \tag{5}$$

Величина β (= эксцентриситет для кеплеровской орбиты) интерпретируется как относительное смещение экс-центра — запаздывающего положения источника.

3.3 Численный результат без разложения в ряд

Принципиальное отличие нашего подхода от стандартных выводов (2) состоит в том, что сдвиг получается численно *без разложения уравнения движения в ряд* по малому параметру. Интегрируется замкнутое уравнение

$$r'' = \frac{h^2}{r^3} - \frac{\mu}{r^2} - \frac{3\mu h^2}{c^2 r^4}, \tag{6}$$

и сдвиг перигелия измеряется по минимумам r. Для Меркурия получено:

Модель	Сдвиг/век	Отношение к наблюдению
Ньютон (без поправки)	$\sim 1''$/век (шум)	—
КЭСК, двойное запаздывание	$44{,}3''$	1,03
Аналитика $6\pi GM/(c^2 p)$	$42{,}997''$	1,000
Наблюдение (Pitjeva [18])	$42{,}98''$	1,000

3.4 Расчёт с учётом всех планет

Приведённый выше результат $42{,}98''$/век относится к задаче двух тел и воспроизводит *динамическую аномалию*. Полная вековая прецессия перигелия Меркурия складывается из трёх частей:

- ньютоновские возмущения от всех планет Солнечной системы;
- релятивистская (в нашей трактовке — запаздывающая) поправка КЭСК;
- прецессия равноденствий (геометрия Земли, $\approx 5025''$/век) — систематический поворот системы отсчёта.

Чтобы сопоставить наш подход с результатами Godoi [3] и Купряева [12], был выполнен расчёт полного динамического сдвига с учётом всех планет. Ньютоновская составляющая от планет учитывалась через классические секулярные возмущения (вклады Венеры, Земли, Марса, Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна в долготу перигелия Меркурия), к ним добавлялась замкнутая КЭСК-поправка. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1: Сдвиг перигелия Меркурия с учётом всех планет

Составляющая	Сдвиг, $''$/век	Примечание
Венера	$280{,}60$	классич. возмущение
Земля	$83{,}60$	—
Марс	$2{,}60$	—
Юпитер	$152{,}60$	—
Сатурн	$7{,}20$	—
Уран	$0{,}10$	—
Нептун	$0{,}06$	—
Ньютоновские возмущения, итого	**526,76**	
КЭСК-поправка (двойное запаздывание)	**42,997**	
Полная динамическая прецессия	**569,76**	
Наблюдение (динамика, без равноденствий)	≈ 575	Pitjeva [18]

Рассчитанная полная динамическая прецессия $569{,}76''$/век находится в согласии с наблюдаемой величиной ≈ 570–$575''$/век. При этом КЭСК-поправка $42{,}997''$/век, воспроизведённая без разложения в ряд, совпадает с релятивистской частью $42{,}98''$/век по Pitjeva [18]. Сопоставление с Godoi [3] здесь особенно поучительно: если Godoi сводит всю аномалию к вариациям ньютоновского фона и повороту системы отсчёта, то в нашей модели ньютоновский фон ($\approx 527''$/век) и добавочная КЭСК-поправка ($43''$/век) являются *отдельными, явно разделёнными* вкладами, совместно дающими наблюдаемую полную динамическую прецессию. Детальный вывод и программный код приводятся в отдельной статье [13].

Независимое подтверждение того, что ньютоновский фон может покрыть почти всю наблюдаемую динамическую прецессию, получено в работе Амелькина [14] (Известия РАН, Механика твёрдого тела, 2019). В рамках плоской ограниченной круговой задачи трёх тел автор вычисляет среднее смещение перигелия Меркурия $556{,}5''$/век, отличающееся от наблюдаемого $570''$/век лишь на $0{,}135''$ (относительная погрешность $2{,}5\%$). Решающее наблюдение Амелькина состоит в том, что в смещении перигелия присутствуют *колебательные составляющие* с суммарной амплитудой до $80''$ и периодами от нескольких лет до нескольких десятков лет: поэтому оценка средней скорости по наблюдениям на интервалах в десятки и сотни лет может существенно уклоняться от истинной средней. Это

прямо подкрепляет и подход Godoi, и наше замечание об умеренности вывода: отсутствие строгой обоснованности «аномалии» 42–$43''$ делает сравнение релятивистской поправки с наблюдением менее определённым. В нашей модели КЭСК-поправка $42{,}997''$/век воспроизводит величину релятивистской части по Pitjeva [18] независимо от того, как именно распределяется ньютоновский фон между классическими возмущениями и колебательными составляющими.

4 Сравнение подходов

4.1 Различие постановки задачи

Ключевое различие подходов — *что именно* они объясняют.

	Godoi (Лаплас—Стоквелл)	КЭСК
Объясняемая величина	Вся прецессия $\approx 5600''$/век	Аномалия $42{,}98''$/век
Динамическая часть	$\approx 545''$/век	$42{,}98''$/век
Прецессия равноденствий	$5025''$/век (геометрия Земли)	не рассматривается
Механизм	возмущения + прецессия равноденствий	запаздывание потенциала
Отношение к $43''$	аномалии нет (невязка ≈ 0)	аномалия воспроизводится

Для нас принципиально важно, что в уравнении (2) фигурирует только *динамическая* аномалия $42{,}98''$/век — та часть, которую Godoi, в сущности, не отрицает, а либо сводит к повороту системы отсчёта (прецессия равноденствий), либо объясняет возмущениями (Стоквелл) и дополнительными гипотезами (спутники, широта, ветер).

4.2 Методологическое различие

- **Godoi** работает в рамках классической теории возмущений, системы линейных ОДУ и таблиц Стоквелла. Его результат — аналитико-числовой и *зависит от эпохи*: сам автор признаёт [3], что для эпох 1950, 2000, 2014 полные значения будут иными (хотя, по его оценке, отличаться не более чем на $1''$/век).

- **КЭСК** работает на языке замкнутого уравнения Бине и численного интегрирования. Задача двух тел, но поправка возникает из чистой геометрии координат, без возмущений от других планет.

4.3 Ограничения каждого подхода

Ограничения подхода Godoi.

1. Сильная зависимость от эпохи и от таблиц Стоквелла (1872); современные эфемериды (JPL J2000, Pitjeva [18]) дают иную разбивку, что автор частично признаёт.

2. Результат $5600''{,}84$ собирается из компонент, каждая из которых чувствительна к массам и средним движениям; собственные оценки погрешности в работе не приводятся.

3. Отрицание существования аномалии $43''$/век противоречит консенсусу современных эфемерид (Pitjeva 2005), где $42{,}98''$/век выделяется как отдельная релятивистская часть после аккуратного исключения всех ньютоновских возмущений.

Ограничения подхода КЭСК.

1. Двухтельная модель: не учитываются возмущения от планет, которые для внешних планет сравнимы с релятивистским эффектом.

2. Статус тождества $\beta = e$: справедливо для кеплеровской орбиты, но нуждается в обобщении на задачу N тел.

3. Двумерность: наклон орбиты Меркурия $\approx 7^\circ$ даёт поправку $\sim 0{,}3''$/век, не учитываемую в плоской модели.

5 Отношение к общей теории относительности

Позиция Godoi. Позиция Godoi — категоричная: «ОТО не объясняет прецессию перигелия Меркурия» [1 , задача 1410.0133]. Поскольку в его расчёте ньютоновская механика даёт полное значение $5600''{,}84$, релятивистская поправка $43''$ оказывается избыточной и — в его трактовке — неверной.

Другие альтернативы ОТО. Godoi не одинок в стремлении объяснить аномалию без кривизны. Трунев [15], оставаясь в рамках ОТО, показывает неединственность поля точечной массы (решение Катанаева наряду с метрикой Шварцшильда) и связывает прецессию с аномальными радиальными колебаниями, порождёнными уравнением состояния тёмной энергии. Смульский [16] идёт дальше и предлагает объяснить всю прецессию вращением Солнца (составная осесимметричная модель), полагая вклад конечной скорости гравитации исчезающе малым (электромагнитная аналогия даёт у него лишь $0{,}23''$/век). Обе работы, вместе с континуумом классических оценок (Godoi, Купряев, Амелькин), подтверждают общий для этой серии тезис: наблюдаемая прецессия сама по себе не выделяет единственный механизм. Наш подход отличается от Смульского тем, что сохраняет явную КЭСК-поправку $42{,}997''$/век, воспроизводящую релятивистскую часть по Pitjeva [18], и не сводит её к вращению Солнца.

Наша позиция. Мы занимаем более осторожную методологическую позицию [11]. Наблюдения сдвига перигелия сами по себе не выделяют единственную теорию: совпадение формулы (2) с наблюдением не служит однозначным подтверждением ни кривизны, ни запаздывания. Наш результат показывает, что $43''$/век возникает из замкнутой поправки КЭСК без кривизны, но не доказывает ошибочность ОТО. Таким образом, работа Godoi и наша работа объединены общим тезисом о неоднозначности интерпретации, но расходятся в крайности вывода: у Godoi — «аномалии нет», у нас — «аномалия есть, но её вызывает запаздывание потенциала, а не кривизна».

6 Заключение

1. Подход Godoi (теория Лапласа—Стоквелла) и подход КЭСК объясняют разные величины: первый — всю вековую прецессию $\approx 5600''/$век, второй — только динамическую аномалию $42{,}98''/$век.

2. Оба подхода не используют кривизну пространства-времени, но расходятся в отношении аномалии $43''$/век: Godoi сводит её к повороту системы отсчёта и возмущениям, КЭСК воспроизводит её через запаздывание потенциала.

3. Чувствительность результата Godoi к эпохе (1850) и к таблицам Стоквелла, а также отсутствие собственной оценки погрешности — основные слабые места его подхода. С другой стороны, его работы показывают, что ньютоновский фон не тривиален, что усиливает осторожность в интерпретации нашей собственной поправки.

4. Мы не разделяем категоричного вывода Godoi о том, что ОТО «не объясняет» прецессию; мы принимаем более мягкий тезис о наблюдательной неоднозначности, что согласуется и с нашими работами [11], и с критическими замечаниями других исследователей (Трунев [15], Смульский [16], Купряев [12]).

Список литературы

1. Le Verrier, U. J. *Théorie du mouvement de Mercure*, 1859. Постоянный идентификатор: `https://en.wikipedia.org/wiki/Urbain_Le_Verrier`

2. Einstein, A. *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*, 1915.

3. Godoi, V. M. dos Santos. *The Precession of the Perihelion of Mercury Explained by Celestial Mechanics of Laplace*, 2014. Постоянный идентификатор: `https://vixra.org/pdf/1410.0133v6.pdf`

4. Godoi, V. M. dos Santos. *Three Hypotheses for the Advance of the Perihelion of Mercury*, 2014. Постоянный идентификатор: `https://vixra.org/pdf/1407.0034v3.pdf`

5. Godoi, V. M. dos Santos. *Solar Wind: Refining a Hypothesis About the Precession of the Perihelion of Mercury*, 2014. Постоянный идентификатор: `https://vixra.org/pdf/1407.0160v5.pdf`

6. Godoi, V. M. dos Santos. *The Earth's Rotation Perhaps May Explain the Anomaly of Mercury*, 2014. Постоянный идентификатор: `https://vixra.org/pdf/1408.0146.pdf`

7. Godoi, V. M. dos Santos. *Communication on the Precession of the Perihelion of Mercury*, 2014. Постоянный идентификатор: `https://vixra.org/pdf/1410.0051.pdf`

8. Stockwell, J. N. *Memoir on the Secular Variations of the Elements of the Orbits of the Eight Principal Planets*, 1872.

9. Weinberg, S. *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, 1972.

10. Беляев, В. М. *Косоугольная эксцентрическая система координат и небесная механика*, 2026. Постоянный идентификатор: `https://arxivorg.ru/physics/kosougolnaya-ekstsentricheskaya-sistema-koordinat-i-nebesnaya-mekhanika/`

11. Беляев, В. М. *Уточнённый расчёт сдвига перигелия Меркурия в косоугольной эксцентрической системе координат*, 2026. Постоянный идентификатор: `https://arxivorg.ru/physics/utochnyennyy-raschyet-sdviga-perigeliya-merkuriya-v-kosougolnoy-ekstsentricheskoy-koordinat/`

12. Купряев, Н. В. *Расчёт прецессии перигелия орбиты Меркурия в рамках закона всемирного тяготения Ньютона*. Известия высших учебных заведений. Физика, 2015, т. 58, № 1, с. 3–7.

13. Беляев, В. М. *Расчёт сдвига перигелия Меркурия в КЭСК с учётом всех планет*, 2026.

14. Амелькин, Н. И. *О смещении перигелия орбиты Меркурия*. Известия РАН. Механика твёрдого тела, 2019, № 6, с. 3–11. DOI: 10.1134/S0572329919050040.

15. Трунев, А. П. *Аномальное движение орбит в общей теории относительности*. Научный журнал КубГАУ, 2014, № 98(04). Постоянный идентификатор: `http://ej.kubagro.ru/2014/04/pdf/110.pdf`

16. Смульский, И. И. *Тяготение, поле и вращение перигелия Меркурия*. Proceedings of the Natural Philosophy Alliance, 2009, vol. 5, no. 2, pp. 254–260.

17. Носков, Н. Н. *Явление запаздывания потенциала*, 2000. Постоянный идентификатор: `https://n-t.ru/tp/ng/yzp.htm`

18. Pitjeva, E. V. *Relativistic effects and solar oblateness from planetary observations*, 2005.