

В. А. Мариняк¹, Е. Г. Гиенко¹✉

Оценка влияния релятивистских эффектов на часы спутников ГЛОНАСС

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: Marinyak.VA@yandex.ru

Аннотация: В работе рассмотрены факторы, оказывающие влияние на стабильность и точность бортовых часов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Во-первых, это факторы нерелятивистской природы, к которым относятся температурные колебания в условиях космического пространства и интенсивное воздействие потоков космической радиации. Во-вторых, это релятивистские эффекты, в соответствии со специальной (СТО) и общей (ОТО) теориями относительности, которые вносят систематический вклад в расхождение показаний бортовых и наземных часов. Основная часть этих эффектов исключается инструментально изменением частоты опорных генераторов спутников. В работе оценено влияние эксцентриситета орбиты на частоту бортовых часов, а также выполнена оценка влияния на часы спутников ГЛОНАСС остаточных релятивистских эффектов, вызванных отклонением большой полуоси орбиты спутников от номинального значения. Показано, что влияние этих эффектов на несколько порядков меньше реального хода бортовых часов. Тем не менее, с установкой на современных спутниках ГЛОНАСС К2 водородных стандартов частоты, указанные эффекты надо будет учитывать для точного долгосрочного прогноза поправок часов спутников.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, системное время, атомные часы, релятивистские эффекты, специальная теория относительности, общая теория относительности, гравитационное смещение частоты

V. A. Marinyak¹, E. G. Gienko¹✉

Evaluation of the impact of relativistic effects on the clocks of GLONASS satellites

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: Marinyak.VA@yandex.ru

Abstract: The paper considers the factors influencing the stability and accuracy of on-board clocks of global navigation satellite systems (GNSS). Firstly, these are factors of a non-relativistic nature, which include temperature fluctuations in outer space and the intense effects of cosmic radiation fluxes. Secondly, these are relativistic effects, in accordance with the special (SRT) and general (GRT) theories of relativity, which systematically contribute to the discrepancy between the readings of onboard and ground clocks. The main part of these effects is eliminated instrumentally by changing the frequency of the satellite reference generators. The paper evaluates the influence of the orbital eccentricity on the frequency of the on-board clocks, and also evaluates the effect on the clocks of GLONASS satellites of residual relativistic effects caused by the deviation of the semimajor axis of the satellites' orbit from the nominal value. It is shown that the effect of these effects is several orders of magnitude less than the actual running time of the onboard clock. Nevertheless, with the

installation of hydrogen frequency standards on modern GLONASS K2 satellites, these effects will need to be taken into account for accurate long-term forecasting of satellite clock corrections.

Keywords: GLONASS, system time, atomic clocks, relativistic effects, special theory of relativity, general theory of relativity, gravitational frequency shift

Введение

Высокоточное координатно-временное обеспечение является фундаментальной основой функционирования любой глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Точность навигационных определений потребителями напрямую зависит от стабильности бортовых шкал времени (БШВ) навигационных космических аппаратов (НКА), а также от точности и долговременности прогнозных значений поправок часов НКА к системному времени ГНСС. Современные ГНСС, включая российскую систему ГЛОНАСС, оснащаются высокостабильными атомными стандартами частоты (цезиевыми, рубидиевыми и перспективными водородными). Однако на ход этих часов, помимо технических факторов (температурные колебания, радиационное воздействие), существенное влияние оказывают релятивистские эффекты, предсказываемые специальной (СТО) и общей (ОТО) теориями относительности [1, 2]. Для спутников ГЛОНАСС, движущихся со скоростью ~ 3.87 км/с на высоте ~ 19100 км, эти эффекты являются систематическими и значительными, достигая десятков микросекунд в сутки, что без компенсации привело бы к недопустимым ошибкам определения местоположения [3, 4]. Основное влияние релятивистских эффектов на ход бортовых часов спутников компенсируется аппаратным смещением частоты и введением поправок в показания часов спутников за эксцентриситет орбиты. При этом остается остаточный эффект, вызванный отклонением большой полуоси орбиты спутника от номинального значения. Основной целью исследования являлась оценка влияния данного эффекта на часы спутников ГЛОНАСС.

Факторы, влияющие на стабильность бортовых часов ГНСС

Рассмотрим факторы, влияющие на стабильность бортовых часов ГНСС с целью определения значимости среди них релятивистских эффектов. Основные эффекты не релятивистской природы – температурные колебания и воздействие космической радиации.

Температурный режим космического пространства представляет собой критически важный фактор, определяющий стабильность работы атомных часов НКА. Цезиевые часы, использовавшиеся в ранних модификациях спутников GPS и на спутниках ГЛОНАСС, проявляют повышенную чувствительность к температурным колебаниям – до 1×10^{-13} на 1°C , что объясняется особенностями квантовых переходов в атомах цезия, подверженных термическому шуму. Для рубидиевых стандартов, размещенных на борту спутников GPS, изменение температуры на 1°C вызывает вариацию частоты до 5×10^{-14} , что эквивалентно суточному уходу времени порядка 0,5 наносекунд [5].

Наименьшую температурную зависимость проявляют водородные стандарты частоты, применяемые в системе Galileo, с коэффициентом порядка 3×10^{-15} на 1°C [5, 6], что делает их перспективными для высокоточных навигационных измерений. С 4 апреля 2025 г по целевому назначению используется спутник ГЛОНАСС К2, оснащенный водородным стандартом частоты, с относительной суточной нестабильностью 10^{-15} [7, 8].

Воздействие космической радиации представляет существенную угрозу стабильности атомных стандартов. Поток высокоэнергетических частиц может достигать 10^4 частиц/(см²·с), вызывая постепенное накопление радиационных повреждений в компонентах часовых систем. Наибольшей радиационной чувствительностью обладают рубидиевые стандарты, что обусловлено наличием полупроводниковых элементов в их конструкции. За десятилетний период эксплуатации на орбите дозовая нагрузка может достигать 10 крад, приводя к деградации метрических характеристик на 20-30%. Цезиевые часы демонстрируют повышенную радиационную стойкость благодаря вакуумной технологии исполнения, однако их системы управления и обработки сигналов остаются уязвимыми к радиационному воздействию [9].

К рассмотренным далее релятивистским эффектам специальной и общей теории относительности относятся кинематическое замедление времени на движущемся с большой скоростью спутнике и гравитационное смещение частоты, вызванное изменением гравитационного потенциала в месте нахождения спутника [3, 10].

Смещение частоты бортовых часов спутников ГЛОНАСС, вызванного релятивистскими эффектами

В соответствии со специальной теорией относительности (СТО), скорость движения спутника v вызывает замедление хода бортовых часов относительно наземных:

$$\Delta\tau = \tau_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx \tau_0 \left(1 - \frac{v^2}{2c^2} \right), \quad (1)$$

где τ_0 – интервал времени по наземным часам, τ – по бортовым, c – скорость света, v – скорость спутника.

Уход часов вследствие этого эффекта составляет:

$$\delta\tau_{СТО} = -\frac{2v}{2c} 2\tau_0 \quad (2)$$

Для скорости спутника ГЛОНАСС $v = 3874$ м/с и $\tau_0 = 86400$ с, величина замедления составляет -7.213758 мкс/сут.

Эффект общей теории относительности (ОТО), гравитационное смещение частоты, вызванное неоднородностью гравитационного поля Земли из-за несферич-

ности планеты и неравномерного распределения масс, вызывает значительные возмущения орбитального движения спутников [2]. Эти возмущения непосредственно влияют на системное время через изменение гравитационного потенциала. Для спутников ГЛОНАСС изменение высоты орбиты на 100 метров приводит к вариации гравитационного потенциала, эквивалентной временной поправке приблизительно 1 наносекунда. Данный эффект требует постоянного мониторинга и коррекции орбитальных параметров для обеспечения требуемой точности навигационных определений.

В соответствии с ОТО, разность гравитационных потенциалов вызывает смещение частоты:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W}{c^2} = \frac{\mu}{c^2} \cdot \left(\frac{1}{a_e} - \frac{1}{a} \right), \quad (3)$$

где Δf – смещение частоты, f – опорная частота, ΔW – разность гравитационных потенциалов.

Для спутников на круговой орбите релятивистское смещение частоты относительно частоты на земле определяется формулой:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta W}{c^2} = \frac{\mu}{c^2} \cdot \left(\frac{1}{a_e} - \frac{1}{a} \right), \quad (4)$$

где μ – геоцентрическая гравитационная постоянная Земли, a_e – экваториальный радиус Земли, a – большая полуось орбиты спутника.

Для системы ГЛОНАСС $a=25461.5$ км, $a_e=6378.136$ км, $\mu = 398600.4418$ км³/с² гравитационное смещение частоты составляет $+5.211650 \cdot 10^{-10}$, что эквивалентно ускорению хода часов на $+45.028623$ мкс/сут.

Суммарный релятивистский эффект для круговой орбиты является разностью двух вышеописанных эффектов $+45.028623 - 7.213758 = +37.814865$ мкс/сут.

Для компенсации этого систематического ухода номинальная частота бортового генератора спутников ГЛОНАСС $f_0=5$ МГц устанавливается ниже на величину $-2.18 \cdot 10^{-3}$ Гц [2, 11]. Таким образом, фактическая частота равна 4.9999999782 МГц.

Реальные орбиты спутников имеют ненулевой эксцентриситет – e , что приводит к периодическим изменениям скорости и высоты, а следовательно, и к периодическим релятивистским эффектам. Поправка в показания часов за эксцентриситет ΔT_{rel} вычисляется по формуле [12]:

$$\Delta T_{rel} = -\frac{2\sqrt{\mu a}}{c^2} e \sin E, \quad (5)$$

где E – эксцентрисическая аномалия.

Данная поправка является периодической с периодом обращения спутника.

Оценка влияния неучтенных релятивистских эффектов на ход часов спутников ГЛОНАСС

В задачу исследования входила оценка влияния остаточных релятивистских эффектов, изменяющих номинальную частоту бортовых генераторов, равную 4.99999999782 МГц. К ним относятся эффекты СТО и ОТО, вызванные отличием большой полуоси орбиты от номинального значения $a_0 = 25461.5$ км.

Остаточный эффект ОТО можно оценить по формуле (4), если заменить a_e на a_0 – номинальное значение большой полуоси.

Параметры орбит спутников для вычисления релятивистских эффектов были взяты на сайте Информационно-аналитического центра ГЛОНАСС [11]. К ним относятся звездный период обращения спутника $T_{об}$, эксцентриситет e , наклон орбиты спутника.

Постоянные величины для расчетов:

- гравитационный параметр Земли $= 398600.4418 \text{ км}^3/\text{с}^2$,
- скорость света $c = 299792.458 \text{ км/с}$,
- экваториальный радиус Земли $a_e = 6378.136 \text{ км}$,

Большая полуось орбиты спутника вычислялась по формуле

$$a = \sqrt[3]{\frac{T_{об}^2}{4\pi^2} \cdot \mu}. \quad (6)$$

Результаты

На основе данных, полученных с сайта Информационно-аналитического центра ГЛОНАСС [11], были выполнены расчеты релятивистских поправок для 24 спутников системы ГЛОНАСС на 13 октября 2025 г. На рисунке 1 представлена диаграмма значений релятивистских поправок в частоту бортовых генераторов спутников, вызванных отклонением большой полуоси орбиты от номинального значения.

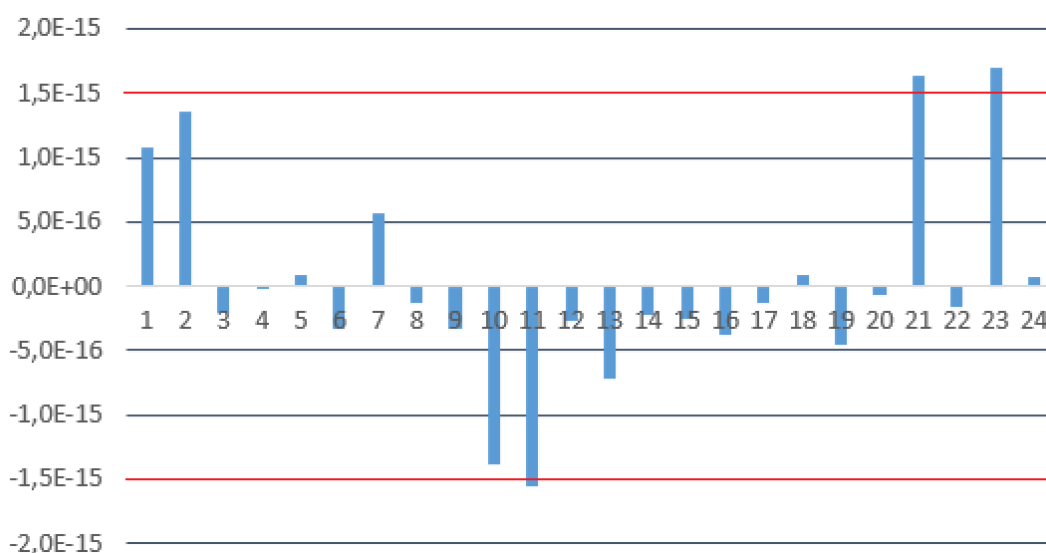


Рис. 1. Релятивистское смещение частоты, вызванное отклонением большой полуоси орбиты спутников от номинального значения.
По горизонтали – номера спутников

На основе данных, полученных с сайта Информационно-аналитического центра ГЛОНАСС [11], по формуле (5) выполнены расчеты релятивистских поправок в БШВ за эксцентриситет для 24 спутников ГЛОНАСС. На рис. 2 приведены амплитуды поправок в частоту, отнесенные к суточному интервалу.

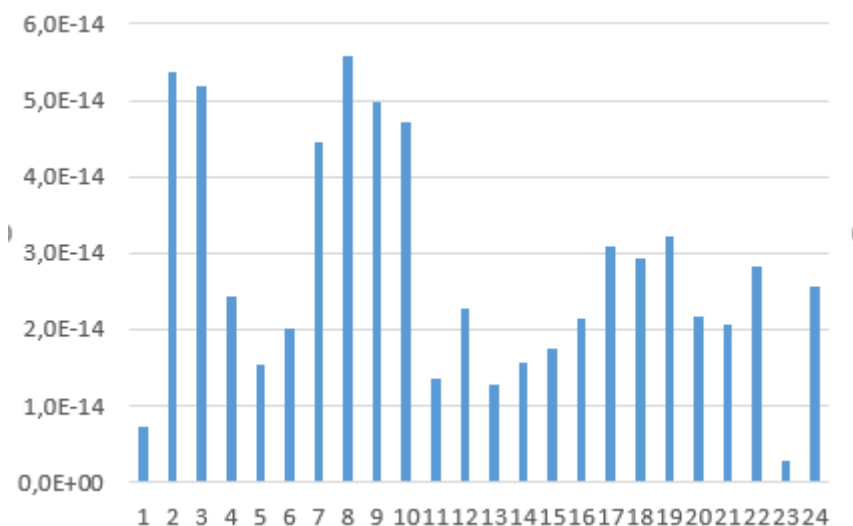


Рис. 2. Влияние эксцентриситета орбиты на частоту бортовых часов спутников ГЛОНАСС. По горизонтали – номера спутников

Как видно из сравнения графиков на рис.1 и рис.2, величина поправки за эксцентриситет на порядок больше релятивистского эффекта за отклонение

большой полуоси орбиты от номинального значения. Поправка за эксцентриситет обязательно вводится в показания часов спутников.

Далее была выполнена оценка реального хода часов спутников ГЛОНАСС на исследуемую дату 13.10.25. Для этого из архива Глобальной системы высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ) [13] были получены финальные данные, содержащие поправки часов спутников ГЛОНАСС с пятиминутным интервалом. Ход БШВ был определен графически, и для суточного интервала вычислено смещение частоты. В результате продемонстрировано, что смещение частоты (секунды за сутки) имеет порядок от 10^{-12} до 10^{-14} , что соответствует уровню стабильности бортовых стандартов частоты спутников ГЛОНАСС. Релятивистское же смещение частоты, вызванное отклонением большой полуоси от номинального значения, меньше реального ухода частоты генераторов спутников на 2-5 порядков.

Заключение

Установлено, что остаточное релятивистское смещение частоты, вызванное статистическими отклонениями большой полуоси орбиты, не превышает $1,7 \cdot 10^{-15}$, как видно на рис. 1, в то время как влияние эксцентриситета орбиты может достигать $5,6 \cdot 10^{-14}$, что показано на рис. 2. Остаточное релятивистское смещение частоты на 2-5 порядков меньше реального ухода БШВ, определенного по наблюдениям спутников. Однако, с установкой на спутниках ГЛОНАСС высокоточных водородных стандартов частоты с нестабильностью на суточном интервале 10^{-14} – 10^{-15} , указанные эффекты будут значимы, особенно для целей долгосрочных точных прогнозов поправок часов спутников.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ashby N. Relativity in the Global Positioning System // Living Reviews in Relativity. – 2003. – Vol. 6. – P. 1–42.
2. Фатеев В. Ф. Релятивистские эффекты в бортовых часах навигационных спутников, движущихся по околокруговым орбитам // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2023. – Т. 10, № 4. – С. 15–24.
3. Дубошин Г. Н. Справочное руководство по небесной механике и астеродинамике : монография. – М. : Наука, 1976. – 864 с.
4. Фатеев В. Ф. Релятивистская метрология околоземного пространства–времени: монография. – Менделеево : ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. – 439 с.
5. Микрин Е. А., Михайлов М. В., Рожков С. Н., Почукаев В. Н. и др. Высокоточный прогноз орбит космических аппаратов, анализ влияния различных возмущающих факторов на движение низкоорбитальных и высокоорбитальных КА // Сборник материалов XXI Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. – СПб., 2014. – С. 77–88.
6. GNSS Time Synchronization Handbook [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.igs.org/timesync> (дата обращения: 20.10.2025).
7. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. Новости ГЛОНАСС. [Электронный ресурс]. – URL: https://glonass-iac.ru/news/news_glonass/4216/ (дата обращения: 15.11.2025).

- 8 Тестоедов Н.А. Российская навигационная спутниковая система и ее перспективы // Вестник Российской академии наук. – 2024. – Т. 94. – №3. – С. 210 – 217. doi: 10.31857/S0869587324030043
9. Сальцберг А. В., Тимошенкова Е. В., Шупен К. Г. Влияние космической среды на ход бортовых часов // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2020. – Вып. 52. – С. 52–61.
10. Бордовицына Т. В., Авдюшев В. А. Теория движения искусственных спутников Земли. Аналитические и численные методы: учеб. пособие. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. – 178 с.
11. Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения. Главная страница [Электронный ресурс]. – URL: <https://glonass-iac.ru/index.php> (дата обращения: 20.10.2025).
12. Антонович К. М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1 : монография. – М. : ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
13. Глобальная система высокоточного определения навигационной и эфемеридно-временной информации (СВО ЭВИ). Главная страница [Электронный ресурс]. – URL: <https://glonass-svoevi.ru/>

© В. А. Мариняк, Е. Г. Гиенко, 2026