

Сличение опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» на основе стандарта CGGTTS

© К. В. Кузнецов, А. В. Вытнов, А. С. Карпичев

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) основывается на независимой регистрации сигналов. Системы времени каждого из элементов радиоинтерферометра являются автономными и задаются независимыми атомными стандартами частоты. Со временем из-за нестабильности стандартов их частоты расходятся, поэтому периодически требуется их подстраивать. Ключевым фактором при этом является то, что величина нестабильности средней относительной разности частот зависит от интервала ее измерения.

Работа посвящена исследованию сличения опорных частот радиоастрономических обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» с использованием стандарта CGGTTS (Common GNSS Generic Time Transfer Standard). Приведены результаты исследования нестабильности (девиации Аллана) частот различных обсерваторий комплекса относительно системных шкал ГЛОНАСС и GPS, относительно Государственного эталона времени и частоты, а также относительно UTC с использованием данных департамента времени Международного бюро мер и весов. Оценено влияние длительности наблюдения на точность полученных результатов. Показано, что использование суточных измерений обеспечивает сравнение частот с точностью порядка $(4...6) \times 10^{-15}$ при использовании сигналов GPS и 1×10^{-14} — при использовании сигналов ГЛОНАСС; увеличение продолжительности накопления данных до 10–20 суток позволяет получить точность сравнения частот на уровне 1×10^{-15} .

Показано, что основной причиной ухода частоты является линейный дрейф величиной порядка 1×10^{-15} в сутки.

Ключевые слова: CGGTTS, ГЛОНАСС, GPS, водородный стандарт частоты и времени, сравнение частот.

Контакты для связи: Кузнецов Кирилл Владимирович (kuzn.kv@yandex.ru).

Для цитирования: Кузнецов К. В., Вытнов А. В., Карпичев А. С. Сличение опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» на основе стандарта CGGTTS // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 75. С. 40–44.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.75.40-44>

Comparison of Reference Frequencies Using CGGTTS at Quasar-KVO Radio Observatories

K. V. Kuznetsov, A. V. Vytnov, A. S. Karpichev

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Very-long-baseline radio interferometry (VLBI) is based on independent signal recording. Each radio interferometer element operates with autonomous timing systems, synchronized by independent atomic frequency standards. Over time, due to the instability of these standards, their frequencies diverge, requiring periodic adjustment. A key factor is that the magnitude of the instability of the average relative frequency difference depends on the measurement interval.

This work examines the comparison of reference frequencies at the Quasar-KVO radio astronomy observatories using the Common GNSS Generic Time Transfer Standard (CGGTTS). The study presents results on the instability (measured via Allan deviation) of frequencies across various observatories within the complex, relative to the GLONASS and GPS system scales, the State Standard of Time and Frequency, and UTC. Data from the Time Department of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) are utilized. The influence of observation duration on the accuracy of the results obtained is analyzed. It is shown that daily measurements enable frequency comparisons with an accuracy of approximately $(4...6) \times 10^{-15}$ when using GPS signals and 1×10^{-14} when using GLONASS signals. Extending the data collection period to 10–20 days improves comparison accuracy to roughly 1×10^{-15} .

The study also indicates that the main cause of frequency drift is linear drift, with a magnitude of approximately 1×10^{-15} per day.

Keywords: CGGTTS, GLONASS, GPS, active hydrogen maser, frequency comparison.

Contacts: Kirill V. Kuznetsov (kuzn.kv@yandex.ru).

For citation: Kuznetsov K. V., Vytnov A. V., Karpichev A. S. Comparison of reference frequencies using CGGTTS at Quasar-KVO radio observatories // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 75. P. 40–44.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.75.40-44>

1. Введение

Метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) основывается на независимой регистрации сигналов. Системы времени каждого из элементов радиоинтерферометра являются автономными и задаются независимыми атомными стандартами частоты. Со временем из-за нестабильности стандартов их частоты расходятся, поэтому периодически требуется их подстраивать. Ключевым фактором при этом является то, что величина нестабильности средней относительной разности частот зависит от интервала ее измерения. Для корректной подстройки необходимо знать, на каком интервале достигается наименьшая нестабильность частоты и ее примерное значение, возможное при используемом методе сличений.

Система частотно-временной синхронизации (СЧВС) каждой из обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» имеет в своем составе аппаратуру для высокоточного сравнения шкал времени с помощью сигналов ГНСС GTR-51. Точность измерения сдвига кода менее 0.5 нс, а ионосферной задержки — менее 2 нс (среднеквадратичное значение) ([Аппаратура GTR51/52](#)). Данные ГНСС-наблюдений в формате CGGTTS (Common GNSS Generic Time Transfer Standard) ежедневно поступают на сервер Лаборатории времени и частоты.

Наиболее простым способом контроля расхождения опорных частот в радиообсерваториях комплекса является использование оценки приемника GTR-51, которая представляет собой линейный тренд результатов сравнения локальной шкалы времени с системной шкалой ГНСС за последние сутки. Данный подход позволяет поддерживать частоты с относительной точностью порядка 1×10^{-14} .

Использование многосуточного (примерно от 10 сут.) интервала и дифференциального метода сличений для оценки средней относительной разности частот позволяет на порядок повысить точность сличений.

В данной работе показаны точностные характеристики (девиация Аллана), полученные при использовании стандарта передачи времени CGGTTS для сличения частот дифференциальным методом (Common View) ([Allan, Weiss, 1980](#)) относительно Российской шкалы всемирного координированного времени UTC(SU), а также относительно UTC по данным поправок к ГНСС, предоставляемым Департаментом времени Международного бюро мер и весов ([Defraigne, et al., 2023](#)).

Показано, что основной причиной ухода частоты является линейный дрейф величиной порядка 10^{-16} ед. в сутки.

2. Стандарт передачи времени CGGTTS

Для сравнения шкал времени с помощью ГНСС Международным бюро мер и весов (МБМВ) разработан стандарт, известный как CGGTTS (Common GNSS Generic Time Transfer Standard).

Принцип заключается в том, чтобы с помощью специального ГНСС-приемника на основе кодовых измерений псевдодалности определять разность между локальной шкалой времени и системной шкалой ГНСС. Стандарт CGGTTS определяет, как алгоритм вычисления псевдодалностей, так и формат представления результатов ([Defraigne, Petit, 2015](#)).

3. Сличение опорных частот РСДБ-комплекса «Квазар-КВО»

Для определения разности частот использованы результаты двухчастотной линейной комбинации L3P, так как это позволяет исключить ионосферную задержку. Разности шкал получены по одновременно наблюдаемым общим спутникам, что позволяет исключить отклонение бортовых часов спутника от системной шкалы. Затем результаты всех спутников усредняются в пределах суток, при этом значения, превышающие 3 СКО, удаляются.

Для исследования были выбраны наиболее продолжительные участки, на которых не производилась коррекция частоты и фазы стандартов (интервалы приведены в формате модифицированных юлианских дат (MJD): «Бадарь» 60495-60602, «Зеленчукская» 60571-60769, «Светлое» 60586-60754).

Для оценки нестабильности частоты использована девиация Аллана с перекрытиями и девиация Адамара ([Riley, Variances, 2008](#)). Последняя не учитывает линейный дрейф частоты.

На рис. 1 приведены результаты нестабильности сличения частоты относительно системных шкал ГЛОНАСС и GPS. Форма девиации Аллана для GPS обусловлена поведением системной шкалы, что видно из сопоставления с соответствующей кривой на рис. 4b. Накопление данных до 5 суток не позволяет улучшить точность сличений.

На рис. 2 приведены результаты сравнения частот относительно Государственного эталона частоты и времени. Видно значительное улучшение точности при накоплении данных вплоть до 1×10^{-15} («Зеленчукская») на интервале 10 сут.

Также по результатам сличений с UTC(SU) вычислены линейные дрейфы частот, составившие: 3×10^{-17} («Бадарь»), -2.9×10^{-16} («Зеленчукская»), -1.0×10^{-16} («Светлое»). Линейный дрейф частоты является основным фактором, определяющим положение минимума девиации Аллана.

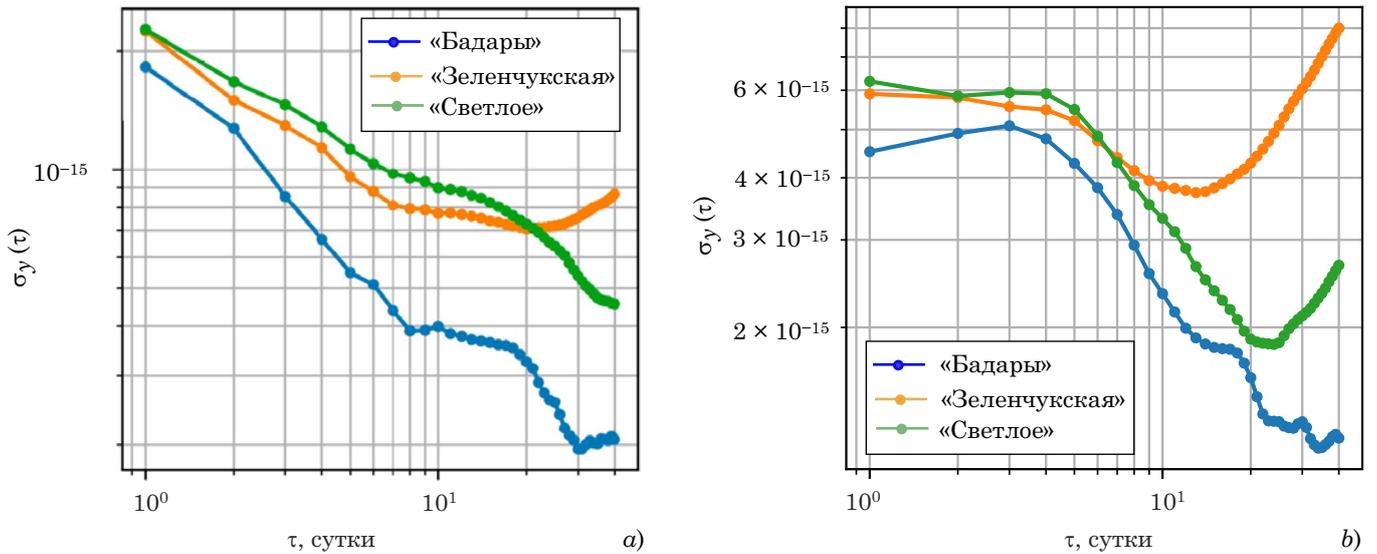


Рис. 1. Девиация Аллана опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» относительно системных шкал ГНСС: а) ГЛОНАСС, б) GPS

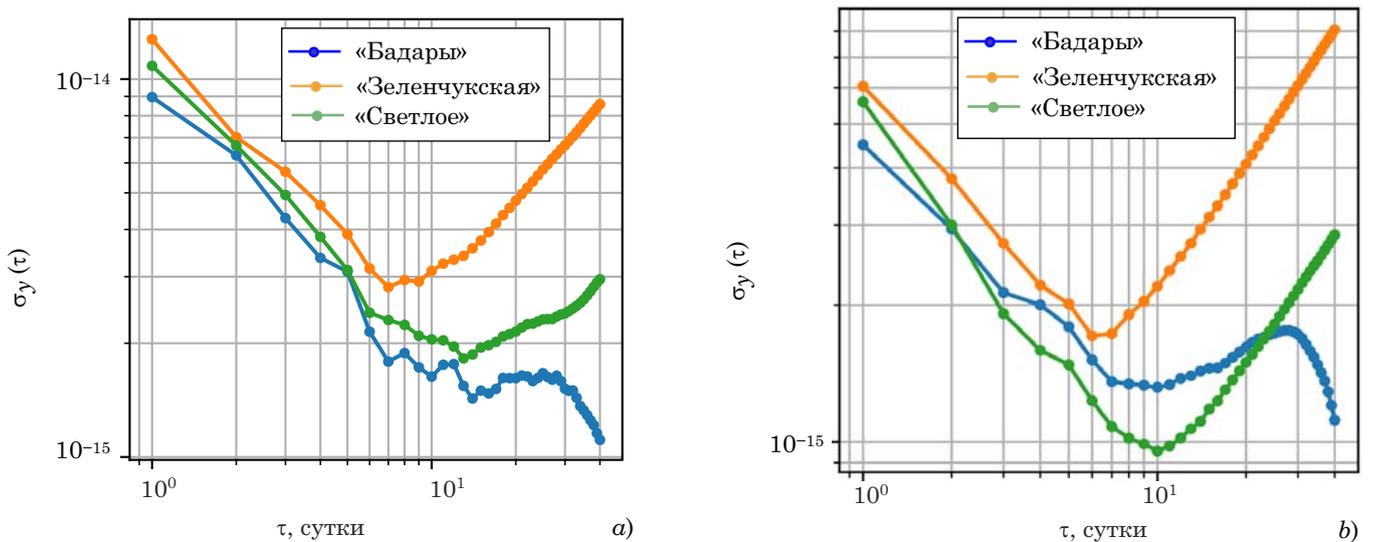


Рис. 2. Девиация Аллана опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» относительно UTC(SU), полученная дифференциальным методом ГНСС: а) ГЛОНАСС, б) GPS

На рис. 3 приведена девиация Адамара, которая не учитывает линейный дрейф частоты. Можно предположить, что при компенсации дрейфа стабильность частоты сможет достигать единиц -16 -ого порядка на интервалах более 10 сут («Бадарь» и «Зеленчукская»).

4. Сличение шкал времени с UTC по данным ВРМ

Департамент времени МБМВ предоставляет программный интерфейс (API) для доступа к машиночитаемым данным, среди которых есть поправки к системным шкалам ГНСС. Данные поправки получены на основе псевдодальномерных

ГНСС-наблюдений национальными лабораториями времени, а также данных Циркуляра Т.

При вычислении поправок UTC-GNSS_Time (рис. 4) берется средневзвешенное значение по всем наблюдаемым спутникам в 24-часовом интервале с центром, приходящимся на 0 часов UTC. Веса пропорциональны $\sin(\epsilon)$, где ϵ — возвышение спутника (Defraigne, et al., 2023). Аналогично получены значения разности шкал «Квазар-КВО» и ГНСС. Вычитая поправки МБМВ, получаем разность шкал «Квазара-КВО» и UTC.

Результаты исследования нестабильности частот (рис. 5 и 6) хорошо согласуются с результатами относительно UTC(SU).

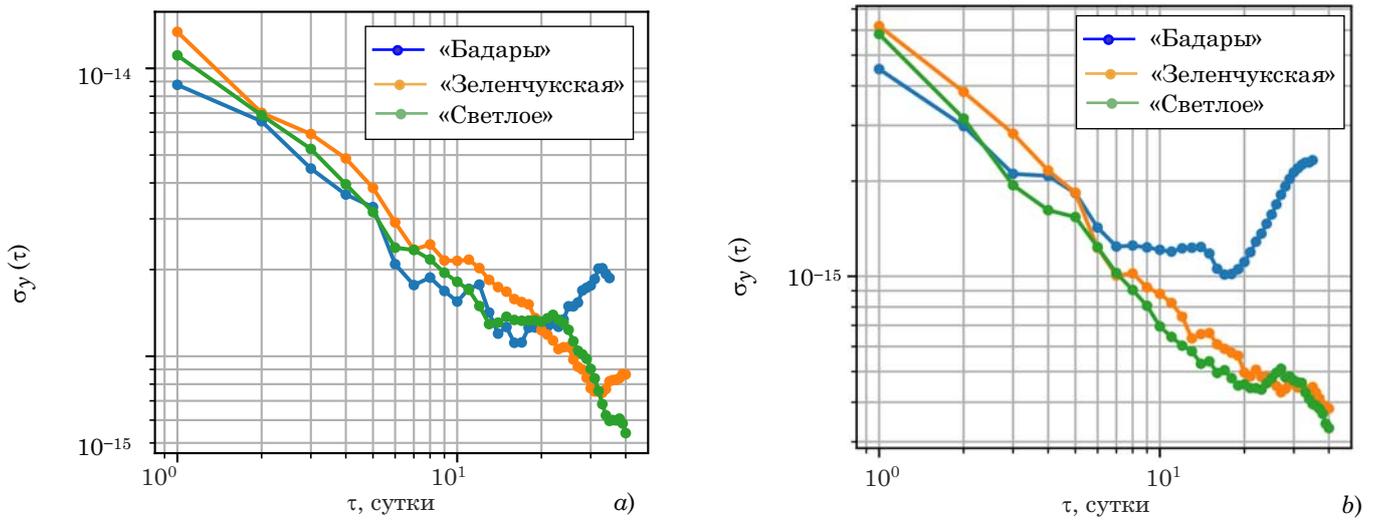


Рис. 3. Девияция Адамара опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» относительно UTC(SU), полученная дифференциальным методом ГНСС: а) ГЛОНАСС, б) GPS

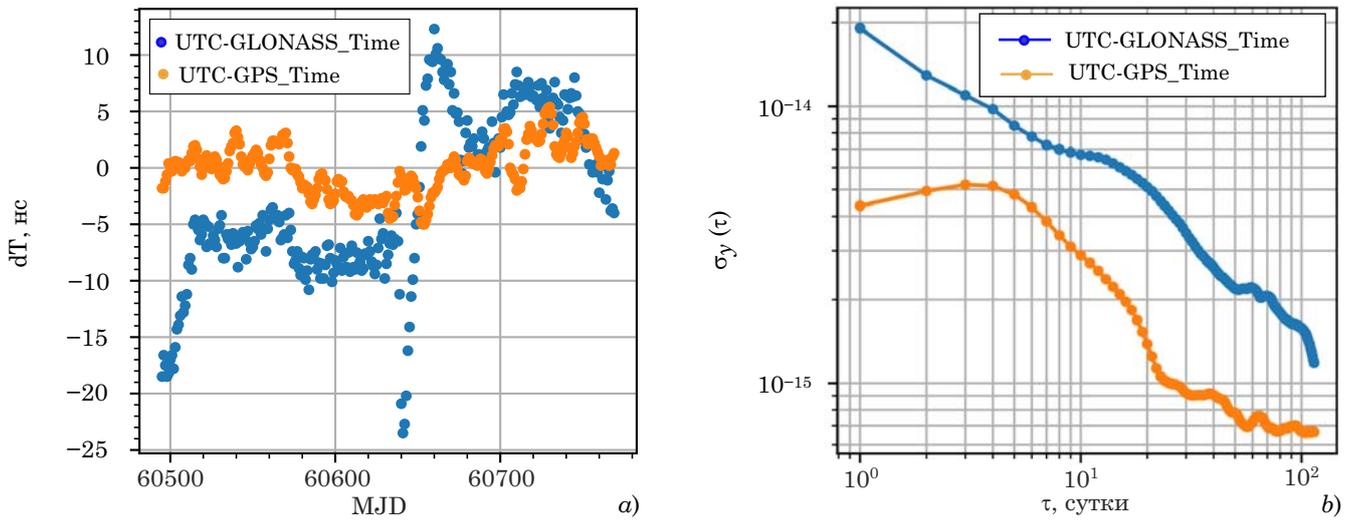


Рис. 4. а) Суточные поправки к системным шкалам времени ГЛОНАСС и GPS на интервале 60495-60769 MJD; б) соответствующая девиация Аллана для системных шкал ГЛОНАСС и GPS относительно UTC

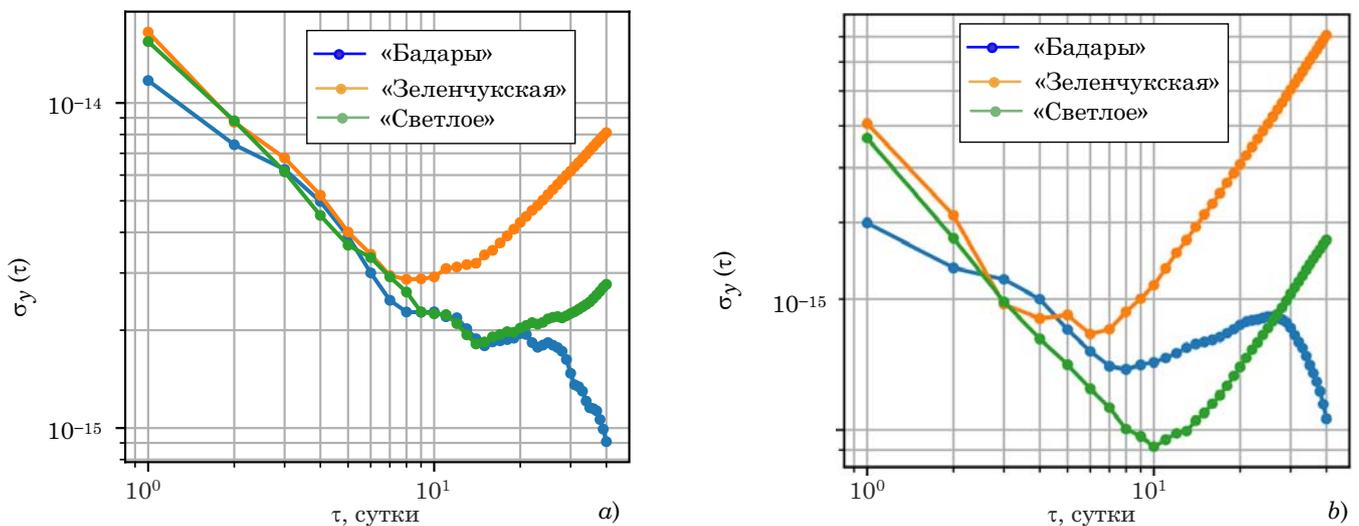


Рис. 5. Девияция Аллана опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» относительно UTC, полученная посредством систем: а) ГЛОНАСС, б) GPS

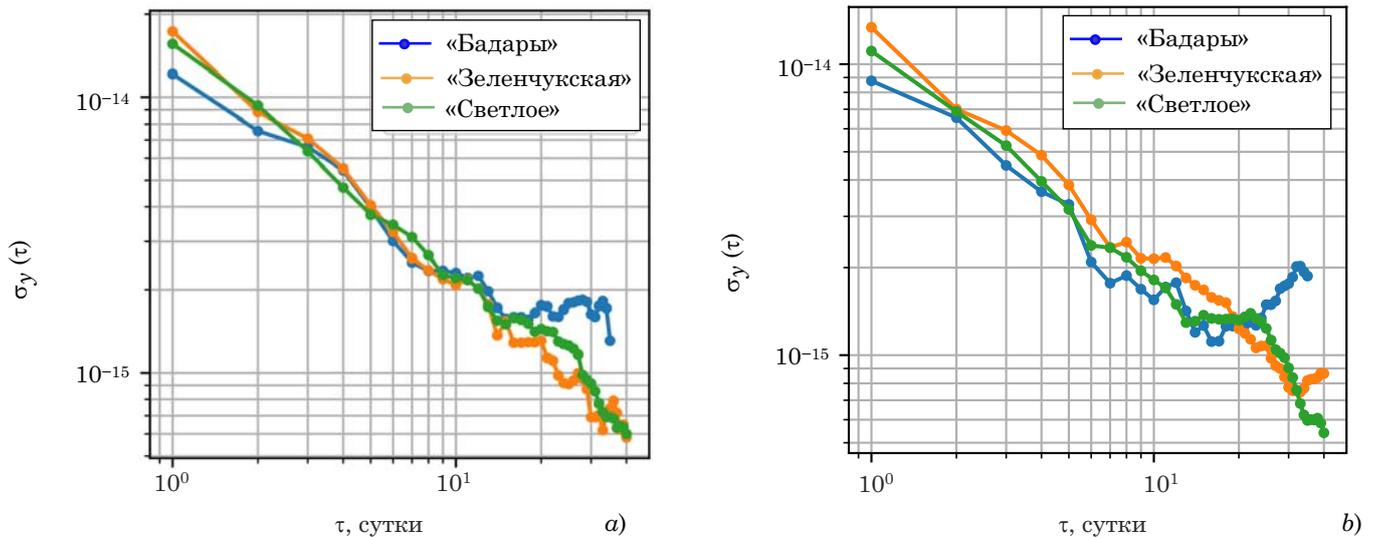


Рис. 6. Девиация Адамара опорных частот обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» относительно UTC, полученная посредством систем: а) ГЛОНАСС, б) GPS

Заключение

В результате исследования показано, что сличение частот относительно UTC(SU) по суточным данным позволяет поддерживать их с относительной точностью $(4..6) \times 10^{-15}$ при использовании GPS и 1×10^{-14} при использовании ГЛОНАСС.

При накоплении данных на более продолжительном интервале (10–20 сут) возможно достижение значений относительной нестабильности менее 1×10^{-15} .

Литература

Аппаратура для высокоточного сравнения шкал времени GTR51/52. Руководство по эксплуатации / MESIT asd, s.r.o. 2018.

Allan D. W., Weiss M. A. Accurate time and frequency transfer during common-view of a GPS satellite // Proc. Frequency Control Symp. 1980. P. 334–6.

Defraigne P., Petit G. CGGTTS-Version 2E: an extended standard for GNSS Time Transfer // Metrologia. 2015. Vol. 52, № 6. P. G1.

Defraigne P., Pinat E., Petit G., Meynadier F. Monitoring of the offset between UTC and its prediction broadcast by the GNSS // Metrologia. 2023. Vol. 60, № 6. P. 065010.

Riley W. J. Variances // NIST Special Publication 1065: Handbook of Frequency Stability Analysis / U. S. Government printing office, Washington, 2008. P. 10–21.