

О комплексном подходе к оценке характеристик бортовых стандартов частоты и точности поправок к бортовым шкалам времени ГНСС

© К. Г. Шупен¹, А. В. Сальцберг², О. Е. Нечаева²

¹Филиал «ПНБО» АО «НПК «СПП», г. Королёв, Моск. обл., Россия

²АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

При анализе функционирования ГНСС требуется постоянное сопровождение и оперативное подтверждение точностных характеристик бортовых стандартов частоты и характеристик точности частотно-временного обеспечения, основной из которых является точность определения частотно-временных поправок на расхождение бортовой шкалы времени космического аппарата относительно системной шкалы времени ГНСС.

С этой целью авторами разработан комплексный подход к оценке характеристик бортовых стандартов частоты и точности прогнозирования частотно-временных поправок, выполнен сравнительный анализ данных от различных источников, представлены результаты оценки точности прогнозирования поправок к бортовым шкалам времени, доступных через навигационный сигнал космических аппаратов систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo и BeiDou.

Полученные результаты дают возможность качественного анализа состояния стандартов частоты при эксплуатации на основе информации различных центров обработки данных, сравнения точностных характеристик различных ГНСС, совершенствования методов прогнозирования частотно-временных поправок, что в итоге может улучшить эксплуатационные характеристики системы ГЛОНАСС.

Ключевые слова: ГНСС, частотно-временное обеспечение, стандарт частоты, бортовая шкала времени, девиация Аллана, временная девиация, точность прогнозирования.

Контакты для связи: Шупен Ксения Григорьевна (k.shupen@mail.ru).

Для цитирования: Шупен К. Г., Сальцберг А. В., Нечаева О. Е. О комплексном подходе к оценке характеристик бортовых стандартов частоты и точности поправок к бортовым шкалам времени ГНСС // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 68. С. 15–25.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.68.15-25>

On a Comprehensive Approach to Assessing the Characteristics of Onboard Frequency Standards and the Accuracy of Corrections to Onboard GNSS Time Scales

© K. G. Shupen¹, A. V. Saltsberg², O. E. Nechaeva²

¹Affiliated branch “Precision Navigation and Ballistic Support” of JSC “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Korolev, Russia

²JSC “Obukhov Plant”, Saint Petersburg, Russia

Abstract

When analyzing the GNSS performance, constant monitoring and operational confirmation of precision characteristics of onboard atomic frequency standards and the accuracy characteristics of the time-frequency support are required. The main accuracy characteristic is the accuracy of determining the satellite clock time scale corrections for the offset between the onboard satellite time scale and the GNSS system time scale.

To this end, the authors have developed a comprehensive approach to assessing the characteristics of onboard frequency standards, the accuracy of satellite clock time offset predictions, and performed a comparative analysis of data from various sources. The results are presented of assessing the accuracy of predicting corrections to onboard time scales available through the navigation signal of satellites of systems GLONASS, GPS, Galileo and BeiDou.

The results obtained make it possible to qualitatively analyze the state of atomic frequency standards during operation with inputs from various data centers, to compare various GNSS characteristics, to improve the methods for predicting satellite time clock offset, which can result in improving the performance of the GLONASS system.

Keywords: GNSS, time-frequency support, frequency standard, satellite time scale, Allan deviation, time deviation, predicting accuracy.

Contacts: Kseniya. G. Shupen (k.shupen@mail.ru).

For citation: Shupen K. G., Saltsberg A. V., Nechaeva O. E. On a comprehensive approach to assessing the characteristics of onboard frequency standards and the accuracy of corrections to onboard GNSS time // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 68. P. 15–25.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.68.15-25>

Введение

Актуальность темы обусловлена непосредственной взаимосвязью характеристик бортовых стандартов частоты (СЧ) и точности частотно-временного обеспечения различных ГНСС, т. к. в основе реально достижимой точности расчета частотно-временных поправок (ЧВП) к бортовой шкале времени (БШВ) космического аппарата (КА) лежат характеристики нестабильности бортовых СЧ. Комплексный подход к оцениванию точностных характеристик (ТХ) СЧ позволяет выполнять качественный анализ состояния бортовых СЧ при эксплуатации, совершенствовать методы прогнозирования ЧВП к БШВ КА, сравнивать ТХ СЧ различных ГНСС, что в итоге может быть использовано для улучшения эксплуатационных характеристик системы ГЛОНАСС.

В настоящее время основополагающим документом следующего уровня значимости вслед за ИКД ГЛОНАСС ([ГНСС ГЛОНАСС. ИКД \(ред. 5.1\)](#)) является «Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС)» [СТЭХОС. Ред. 2.2 \(6.2019\)](#). Согласно СТЭХОС, оценка и подтверждение достигнутого уровня основных характеристик (доступность, непрерывность, пригодность, точность и пр.) выполняется ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш» ([ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш](#)) на основе значительного объема статистических данных на длительных интервалах времени (до 1 года). В качестве эталонных данных при реализации методик оценивания СТЭХОС используется апостериорная эфемеридно-временная информация (ЭВИ), рассчитываемая ИАЦ КВНО.

СТЭХОС ориентирован на оценку предельных значений точностных, приведенных в ИКД ([ГНСС ГЛОНАСС. ИКД \(ред. 5.1\)](#)), и эксплуатационных [СТЭХОС. Ред. 2.2 \(6.2019\)](#) характеристик системы ГЛОНАСС, которые гарантируются с высокой степенью доверия.

Однако при анализе функционирования составных частей системы ГЛОНАСС требуется систематическое сопровождение и более оперативное подтверждение основных характеристик частотно-временного обеспечения (ЧВО) системы ГЛОНАСС на интервалах, соответствующих интервалам технологического цикла управления КА и стандартным интервалам оценки ТХ СЧ в процессе эксплуатации на борту КА системы ГЛОНАСС или в составе наземных средств.

Показатели точности частотно-временного обеспечения ГНСС

Основными точностными характеристиками ЧВО ГНСС ГЛОНАСС являются:

— точность определения ЧВП на расхождение БШВ КА относительно шкалы времени системы (ШВС) ГЛОНАСС и вклад точности ЧВП в значе-

ние эквивалентной погрешности дальности потребителя за счет космического сегмента;

— точность определения времени потребителя в ШВС ГЛОНАСС;

— точность согласования ШВС ГЛОНАСС с национальной шкалой Всемирного координированного времени UTC(SU);

— точность определения потребителем времени UTC(SU).

В основе реально достижимой точности расчета поправок на расхождение шкал времени, обеспечивающих доступ потребителя к ШВС ГЛОНАСС и к времени UTC(SU), лежат характеристики нестабильности СЧ, формирующих БШВ КА, и СЧ в составе комплекса наземных средств формирования шкалы времени наземного сегмента ГЛОНАСС.

В качестве показателей нестабильности частоты СЧ до недавнего времени были утверждены (ГОСТ 8.567-99) и до настоящего времени по традиции применяются на практике различные показатели: СКО частоты, среднеквадратическая относительная случайная вариация частоты, среднее квадратическое относительное двухвыборочное отклонение (СКДО), или девиация Аллана, СКДО с исключенным дрейфом частоты, девиация Адамара.

При введении новой редакции межгосударственного стандарта ГОСТ 8.567-2014 «Измерения времени и частоты. Термины и определения» в качестве действующих характеристик нестабильности частоты указаны к применению только СКДО (девиация Аллана) и СКО.

Применение различных показателей, строго не связанных между собой аналитически, существенно затрудняет сравнительный анализ характеристик различных СЧ как в рамках одной ГНСС, так и при сравнении характеристик СЧ различных ГНСС с целью определения достигнутого уровня развития навигационных систем.

В СТЭХОС устанавливаются в качестве единого показателя СКДО (девиация Аллана), что является исключительно положительным фактом, т. к. не только приводит к единообразию, но и позволяет проводить качественный анализ характеристик конкретного СЧ.

Исходными данными для расчета девиации Аллана и ее модификаций ([Riley, 2008](#)) (ADEV с перекрытием, MDEV и пр.), а также для расчета девиации Адамара (HDEV, ...) при наличии у СЧ дрейфа частоты могут являться как результаты наземной экспериментальной отработки, так и данные, предоставляемые функциональными дополнениями ГНСС, Международной службой ГНСС (International GNSS Service for Geodynamics — IGS) и публикуемые в открытом доступе.

Девиация Аллана (или ее модификации) должна рассчитываться для всех доступных интервалов измерения, что позволяет не только оце-

нивать ТХ для стандартных значений длительности интервала измерений (1 с, 10 с, 100 с, 1000 с, 10000 с, 1 ч, 1 сут, 30 сут, 3 мес, 6 мес, 1 год), но и определять качественный состав шумов в сигнале квантового СЧ на среднесрочных интервалах времени (1–12 ч) прогнозирования ЧВП. Базовый состав шумов, наблюдаемый в сигнале КСЧ, представлен ниже:

- белый фазовый шум;
- белый частотный шум;
- частотный шум случайных блужданий (ЧШСБ);
- случайные блуждания дрейфа частоты;
- фазовый фликкер-шум;
- частотный фликкер-шум.

Наличие информации о составе шумов напрямую связано с построением высокоточного алгоритма прогнозирования, т. к. включение описания наблюдаемых шумов в модель расчета ЧВП к БШВ КА позволяет повысить точность прогнозирования расхождения шкал времени на 10–30 % (Салыц-берг, Шупен, 2020, С. 83–91), что является основным фактором повышения точности ЧВО ГЛОНАСС и отражает суть комплексного подхода к оценке характеристик СЧ.

Источники данных и их сравнение

В качестве источников данных о значениях расхождения БШВ КА ГЛОНАСС и БШВ КА зарубежных ГНСС рассматриваются следующие:

- данные ИАЦ КВНО (ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИмаш) — источник эталонных данных для применения методик оценки СТЭХОС;
- данные системы высокоточного определения эфемерид и временных поправок СВОЭВП (СВОЭВП);
- данные аналитического центра European Space Agency (ESA) из состава Международной службы ГНСС (IGS).

Работа перечисленных сервисов основана на наблюдениях глобальной сети станций, оснащенных двухчастотными навигационными ГНСС-приемниками геодезического класса и временными ГНСС-приемниками. Наблюдения ведутся непрерывно, результаты ежедневно (а по возможности ежечасно) передаются через Интернет в центры сбора данных либо непосредственно, либо через операционные центры, осуществляющие методическое сопровождение нескольких станций.

Накапливаемые в центрах сбора данных результаты наблюдений поступают в центры обработки, также называемые аналитическими центрами. В ходе обработки наблюдений применяются алгоритмы, позволяющие с максимальной точностью и полностью учитывать эффекты трассы распространения сигнала, релятивистские и гравитационные эффекты формирования БШВ КА, вклады геофизических и геодинамических состав-

ляющих. В результате сетевого решения вычисляются высокоточные эфемериды КА, поправки бортовых и наземных шкал времени, параметры вращения Земли (координаты полюса и длительность суток), изменения координат станций, параметры ионосферы и тропосферы. Результаты вычислений, полученные в разных аналитических центрах, подвергаются совместной статистической обработке, по окончании которой публикуются официальные данные IGS. Результаты работы аналитических центров и данные IGS загружаются на HTTP- или FTP-серверы и находятся в открытом доступе.

Аналогичным образом организована работа и других подобных аналитических центров координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО).

Существует два основных вида выходных данных, публикуемых такими центрами:

- оперативная частотно-временная информация, передаваемая в составе навигационного сообщения;
- апостериорная частотно-временная информация нескольких типов, различающихся по точности и оперативности вычислений, выдаваемая с 15-минутной, 5-минутной, 5-секундной или 30-секундной дискретизацией.

Аналитические центры, входящие в IGS, в том числе ИАЦ КВНО, имеющий официальную аттестацию в IGS, гарантируют точность предоставляемых данных (IGS) о расхождении БШВ КА в соответствии с табл. 1.

Данные типа Final каждого аналитического центра характеризуются согласованностью между значениями поправок к БШВ и эфемеридами КА, а также отличаются высокой точностью устранения задержек сигнала вдоль трассы распространения

Таблица 1
Состав апостериорной временной информации Международной службы ГНСС

Типы поправок		Точность (СКО)	Задержка выдачи	Максимальная дискретизация данных
Ultra-Rapid	оперативно уточненные, сверхсрочные	~150 пс	3–9 ч	15 мин
Rapid	уточненные, срочные	~75 пс	17–41 ч	5 мин
Final	сверхточные, финальные	~75 пс	12–18 сут.	30 с

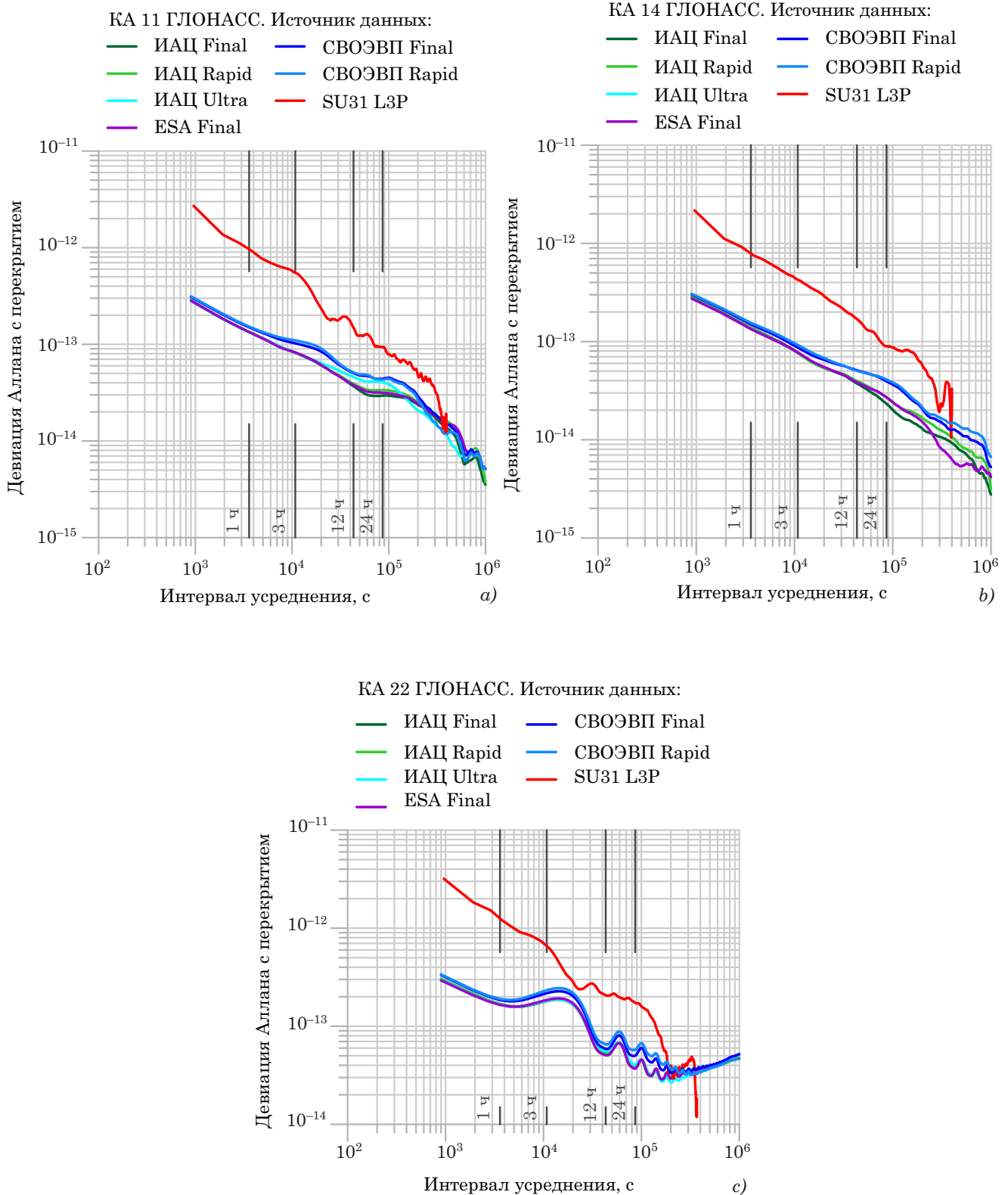


Рис. 1. Оценки девиации Аллана по данным различных источников на интервале 01.09.2020–01.10.2020: а) КА ГЛОНАСС 11, б) КА ГЛОНАСС 14, в) КА ГЛОНАСС 22

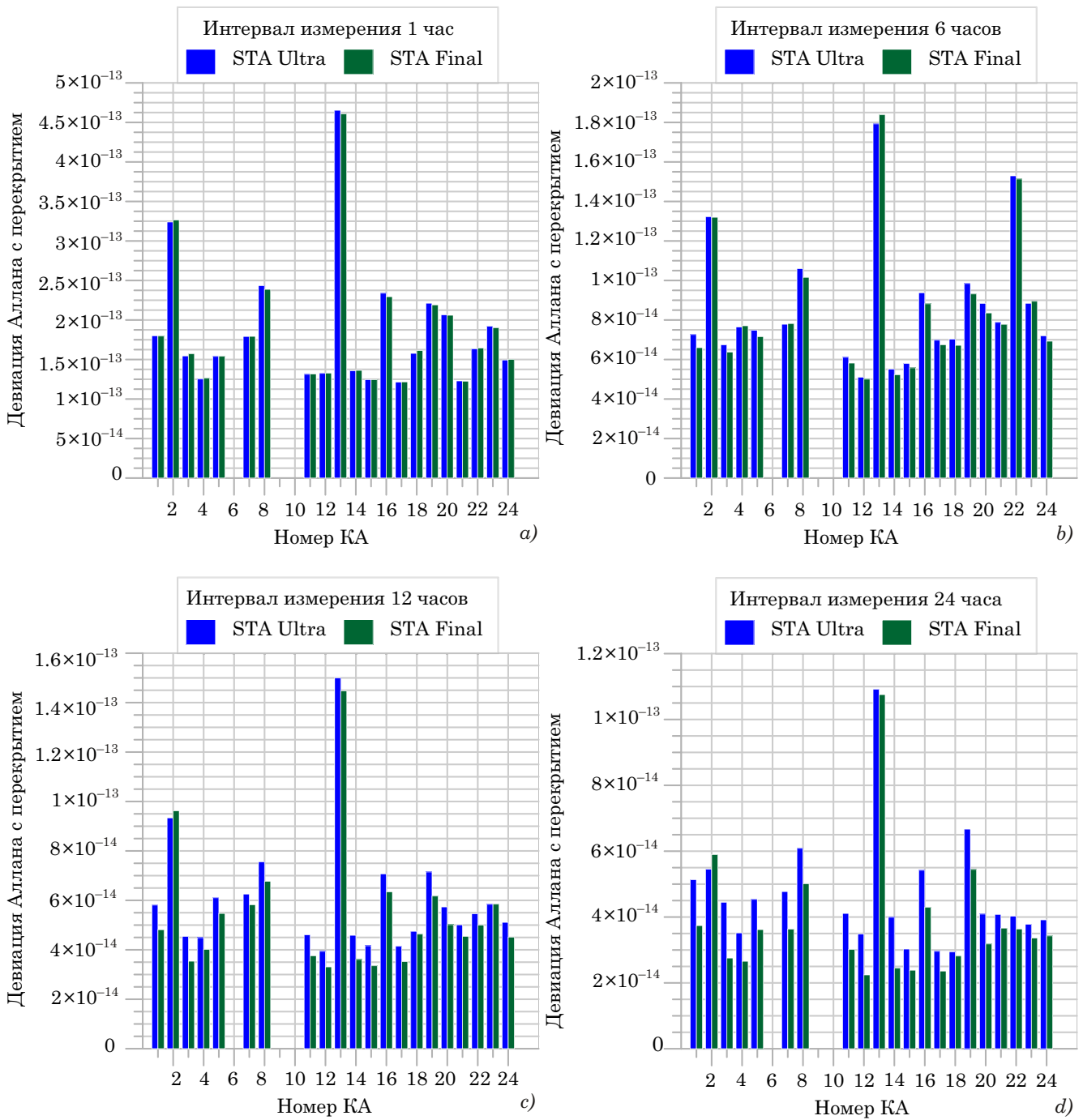


Рис. 2. Оценки девиации Аллана (с перекрытием) по финальным и оперативным данным ИАЦ КВНО на интервале 01.09.2020–01.10.2020 для СЧ КА орбитальной группировки ГЛОНАСС при времени измерения: а) 1 час, б) 6 часов, в) 12 часов, д) 24 часа

Таблица 2

Различие оценок девиации Аллана с перекрытием по данным ИАЦ Final и ИАЦ Ultra

ε	$\tau = 1$ ч	$\tau = 2$ ч	$\tau = 3$ ч	$\tau = 6$ ч	$\tau = 9$ ч	$\tau = 12$ ч	$\tau = 24$ ч
среднее	$1.5 \cdot 10^{-15}$	$1.4 \cdot 10^{-15}$	$1.4 \cdot 10^{-15}$	$2.9 \cdot 10^{-15}$	$4.8 \cdot 10^{-15}$	$6.2 \cdot 10^{-15}$	$8.5 \cdot 10^{-15}$
min	$1.1 \cdot 10^{-16}$	$2.1 \cdot 10^{-16}$	$7.4 \cdot 10^{-17}$	$3.1 \cdot 10^{-16}$	$2.4 \cdot 10^{-16}$	$3.7 \cdot 10^{-17}$	$1.2 \cdot 10^{-15}$
max	$4.6 \cdot 10^{-15}$	$5.8 \cdot 10^{-15}$	$3.0 \cdot 10^{-15}$	$6.6 \cdot 10^{-15}$	$9.6 \cdot 10^{-15}$	$1 \cdot 10^{-14}$	$1.7 \cdot 10^{-14}$

и влияния релятивистских, гравитационных, геодинимических и других эффектов. Однако из-за большой задержки в выдаче этих данных они используются в основном для задач, в которых оперативность не является критически важным условием, например в геодезии и геофизике.

Данные типа Ultra-Rapid, включающие в себя как оценки текущего значения поправок к БШВ КА, так и их прогнозные значения, предназначены в основном для пользователей режима реального времени, например для быстрого определения орбиты низкоорбитальных КА или решения метеорологических задач.

Точность поправок к БШВ КА, предоставляемых СВОЭВП, определяется ИКД СВОЭВП (ГНСС ГЛОНАСС) и составляет 3 нс (предельное значение) для финальных данных, что является заведомо худшим показателем. Это подтверждается оценками, полученными по данным СВОЭВП, которые показывают потерю точности при оценке девиации Аллана для бортовых СЧ на уровне $2 \cdot 10^{-14}$ для времени измерения 1 сутки.

Для примера и сравнения получаемых результатов приведены оценки девиации Аллана по КА ГЛОНАСС 11 (рис. 1а), КА ГЛОНАСС 14 (рис. 1б) и КА ГЛОНАСС 22 (рис. 1с) на интервале 01.09.2020–01.10.2020 по данным перечисленных источников.

Для контраста с высокоточными данными на рис. 1 добавлены результаты оценивания девиации Аллана для СЧ КА ГЛОНАСС 11, 14, 22 по измерениям одиночного ГНСС-приемника GTR51 (красный график, условное обозначение SU31), который в качестве опорной шкалы времени использует рабочую шкалу времени UTC(SU), что исключает вклад ТХ опорной шкалы времени в результаты оценивания ТХ СЧ. В целях вычисления расхождения БШВ КА двухчастотные кодовые измерения обработаны с использованием эфемерид, передаваемых в составе цифровой информации навигационного кадра КА ГЛОНАСС. Очевидно, что использование кодовых измерений отдельного приемника вне общего сетевого решения, выполняемого по измерениям глобальной сети станций ГНСС, ухудшает точность оценивания девиации Аллана на $6\text{--}8 \cdot 10^{-14}$ и не может применяться для оценки характеристик СЧ КА с заявленной точностью лучше $1 \cdot 10^{-13}$.

Как показывает сравнение данных высокоточных источников, для решения задачи оценки нестабильности бортовых СЧ могут быть эффективно использованы не только финальные данные со сроком получения 7 дней (Final), но и ЭВИ, получаемая с задержкой от 6 часов (Ultra) до 1 суток (Rapid).

Оценки девиации Аллана (с перекрытием) для бортовых СЧ по всем КА орбитальной группировки ГЛОНАСС на интервале 01.09.2020–01.10.2020

сведены в табл. 2, где представлены абсолютные отклонения оценок, рассчитанных по финальным (Final) и оперативным (Ultra) данным ИАЦ КВНО, при различных временах измерения τ в виде среднего, минимального и максимального значений отклонения.

Таким образом, расхождение в точности оценивания характеристик нестабильности СЧ по данным Ultra составляет не более $1.7 \cdot 10^{-14}$ в худшем случае, в среднем $8.5 \cdot 10^{-15}$ для времени измерения 1 сут. На интервалах измерения до 12 ч (интервал равен типичному времени обновления частотно-временных поправок на борту КА) расхождение в точности оценивания составляет не более $1 \cdot 10^{-14}$, что является незначительным при существующем уровне ТХ СЧ системы ГЛОНАСС.

Сравнение оценок девиации Аллана (с перекрытием) для СЧ в составе КА ГЛОНАСС для данных Ultra и Final ИАЦ КВНО при времени измерения 1, 6, 12, 24 часа представлено в виде гистограмм на рис. 2.

Таким образом, для оперативного оценивания ТХ СЧ могут быть использованы не только данные ИАЦ КВНО, но и данные других центров Международной службы ГНСС или результаты работы других сервисов, например СВОЭВП. Сопоставление данных нескольких центров позволяет обеспечить достоверность и надежность полученных на их основе статистических оценок.

О взаимосвязи нестабильности частоты СЧ и точности формирования и прогнозирования БШВ КА

Во временной области точность формирования шкалы времени характеризуется временной девиацией. Она определяется через теоретическую связь между девиацией Аллана (ADEV или $\sigma_y(\tau_p)$) как характеристикой нестабильности частоты и девиацией времени TDEV или $\sigma_x(\tau_p)$ как характеристикой нестабильности времени. Эта связь установлена Алланом для оптимального алгоритма прогнозирования на интервале τ_p и имеет следующие переходные коэффициенты связи для преобладающих видов шумов (Allan, 1987):

$$\sigma_x(\tau_p) = \frac{\tau_p}{\sqrt{3}} \sigma_y(\tau_p) \text{ — для белого фазового шума;}$$

$$\sigma_x(\tau_p) \approx \tau_p \cdot \sigma_y(\tau_p) \sqrt{\frac{\ln \tau_p}{2 \ln \tau_0}} \text{ — для фазового фликкер-шума;}$$

$$\sigma_x(\tau_p) = \tau_p \cdot \sigma_y(\tau_p) \text{ — для белого частотного шума и для частотного шума случайных блужданий;}$$

$$\sigma_x(\tau_p) = \tau_p \cdot \frac{\sigma_y(\tau_p)}{\sqrt{\ln 2}} \text{ — для частотного фликкер-шума.}$$

Девияция времени $\sigma_x(\tau)$ является уникальной временной характеристикой, которая соотносится только с девиацией Аллана.

В последующем временная девиация была определена через модифицированную девиацию Аллана (MDEV или $\text{Mod}\sigma_y^2(\tau)$) в соответствии со следующим выражением (Riley, 2008):

$$\sigma_x(\tau) = \frac{1}{3} \tau \cdot \text{Mod}\sigma_y^2(\tau).$$

В данной формулировке TDEV как характеристика нестабильности времени нашла более широкое применение, в частности, в сетях синхронизации, когда возникает необходимость оценки не частотных, а фазовых шумов, т. к. TDEV совпадает с обычным стандартным отклонением (СКО) для случая белого фазового шума и близка к СКО в случае фазового фликкер-шума. Во всех остальных случаях с преобладанием других видов шумов TDEV, определяемая через модифицированную дисперсию Аллана, является заведомо более жестким показателем, однако из-за ее близости к СКО может быть использована в качестве нижней границы для оценки точности прогнозирования для модельных или реальных данных, т. к. в качестве показателя точности прогнозирования также используется СКО прогнозируемых значений относительно эталонных.

Таким образом, взаимосвязь TDEV и MDEV позволяет сопоставить требования к нестабильности СЧ и требования к точности привязки БШВ КА к ШВС ГНСС в любой момент времени, и наоборот (Сальцберг, Шупен, 2020, С. 83–91).

Суть подхода проиллюстрирована на графиках. На рис. 3 и рис. 4 красным цветом обозначены требования к нестабильности стандарта частоты $\text{Mod}\sigma_y(\tau)$ — MDEV, а синим цветом — взаимосвязанный переход к временной девиации $\sigma_x(\tau)$ — TDEV как к мере временной стабильности, которая определяет теоретический (или потенциально достижимый) порог при нулевых ошибках определения параметров идеальной модели часов.

Таким образом, предполагая (или точно зная) требования, предъявляемые к точности прогноза ЧВП к БШВ КА (синие линии, шкала слева), можно однозначно определить требования к СЧ (красные линии, шкала справа). И в обратную сторону: имея СЧ с определенными (пусть и произвольно назначенными) характеристиками, можно определить потенциально достижимый порог точности прогнозирования при нулевых ошибках определения параметров идеальной модели часов. Идеальная модель в принципе недоступна, поэтому на рис. 2 справа пунктиром прорисованы уже

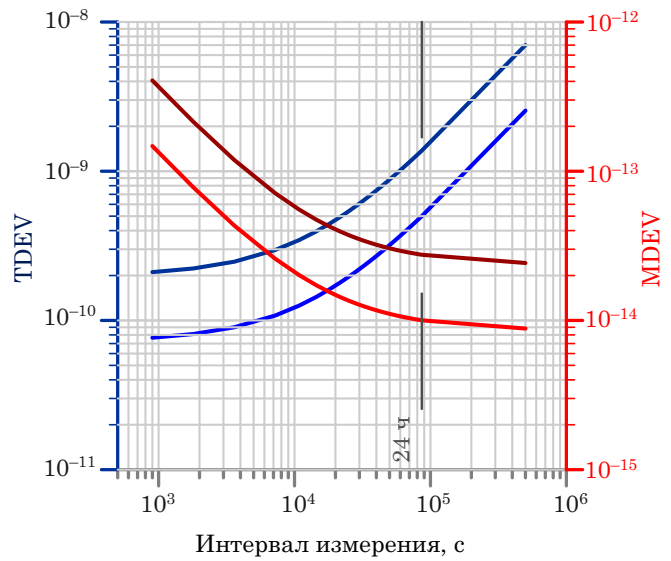


Рис. 3. Взаимосвязь условных требований ГНСС к погрешности прогнозирования поправок к шкале времени и требований к нестабильности бортового стандарта частоты

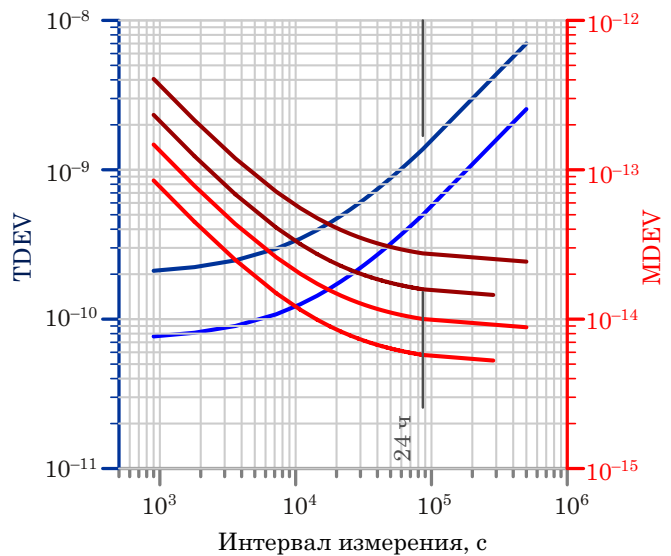


Рис. 4. Взаимосвязь условных требований ГНСС к погрешности прогнозирования поправок к шкале времени и требований к нестабильности бортового стандарта частоты с учетом методического запаса

сточенные требования к СЧ, обусловленные необходимостью обеспечить минимальный методический запас для применяемого метода прогнозирования, который на сегодняшний день оценивается на уровне 0.2–0.4 нс (СКО) для типичных видов шумов СЧ на интервалах времени измерения менее 12 ч (Сальцберг, Шупен, 2020, С. 83–91).

Таким образом, изложенный комплексный подход обеспечивает необходимую гармонизацию требований к ЧВО ГНСС и требований к СЧ.

Оценка точности формирования и прогнозирования БШВ КА ГНСС

Точность определения ЧВП к БШВ КА относительно ШВС ГЛОНАСС или, что то же самое, вклад точности ЧВП в значение эквивалентной погрешности дальности потребителя за счет космического сегмента является одной из основных точностных характеристик ГНСС.

В СТЭХОС отсутствуют рекомендации по раздельному оцениванию вклада эфемерид и ЧВП в значение эквивалентной погрешности дальности потребителя, оценивается только интегральный показатель, поэтому целесообразно отдельно оценивать точность определения ЧВП к БШВ КА. Данная характеристика может быть оценена по данным ИАЦ КВНО ([ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИ-маш](#)), который осуществляет сбор и хранение информации, передаваемой КА всех ГНСС (файлы с расширением .brdc). В качестве эталонных данных используются финальные апостериорные ЧВП ИАЦ КВНО.

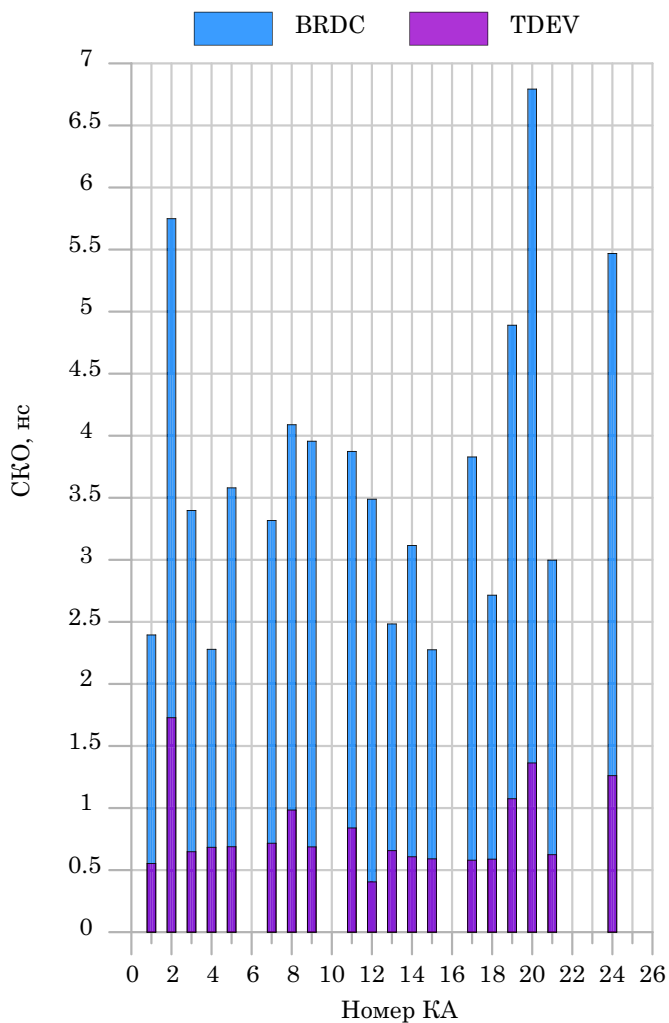


Рис. 5. Ошибки ЧВП БШВ КА ГЛОНАСС относительно потенциального порога точности TDEV (6 ч)

При оценивании ЧВП-brdc ([ИАЦ КВНО ФГУП ЦНИИ-маш](#)) относительно эталонных значений ЧВП-СТА (Final, Rapid, Ultra) исключается различие в опорных шкалах времени или способах приведения ЧВП к системному времени ГЛОНАСС ([Сальцберг, Шупен, 2020, С. 51–56](#)), исключаются постоянные систематические смещения в данных, обусловленные различием калибровок опорных приемников штатного контура ЧВО ГЛОНАСС и ИАЦ КВНО, отбраковываются аномальные данные на основе классических статистических методов.

Гистограммы на рис. 5–9 показывают соотношение вклада нестабильности бортового стандарта частоты при идеальной модели ухода БШВ КА, пересчитанного согласно концепции «комплексного подхода» во временную девиацию (фиолетовый цвет), и текущей ошибки прогноза ЧВП к БШВ КА (голубой цвет) для всех ГНСС на интервале 01.09.22–01.10.22.

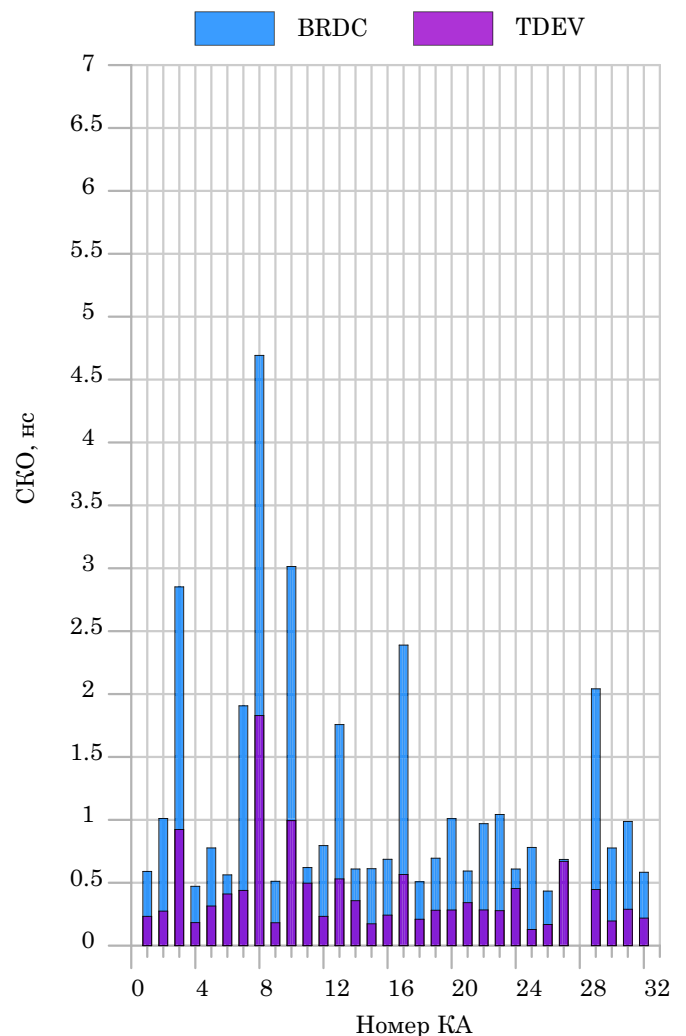


Рис. 6. Ошибки ЧВП БШВ КА GPS относительно потенциального порога точности прогнозирования TDEV (12 ч)

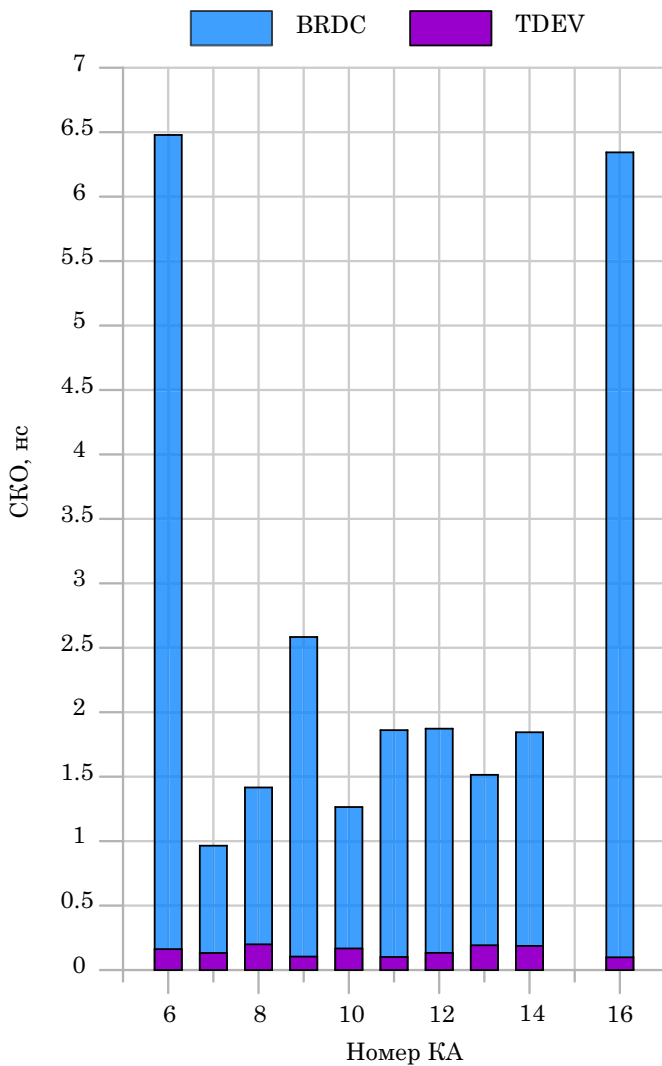


Рис. 7. Ошибки ЧВП БШВ КА BDS-2 относительно потенциального порога точности прогнозирования TDEV (1 час)

В качестве интервала прогнозирования при расчете TDEV принят «возраст» оперативных данных ЧВП, который определен для каждой ГНСС индивидуально, исходя из регламентированного для каждой системы периода обновления информации на борту КА. Для Galileo и Beidou «возраст» данных составляет 1 ч, что примерно соответствует времени обновления данных на борту КА. Для GPS принято время 12 ч, что соответствует среднему значению времени между обновлениями данных на борту КА с интервалом 24 ч. Для ГЛОНАСС принято время 6 ч, близкое к среднему времени обновления ЧВП по всей орбитальной группировке в целом.

Наиболее информативным оказывается график отношения реальных ошибок прогнозирования к потенциальному порогу точности, определяемому нестабильностью бортового стандарта частоты КА для всех ГНСС (рис. 10). Это отношение демонстрирует степень соответствия технологии обра-

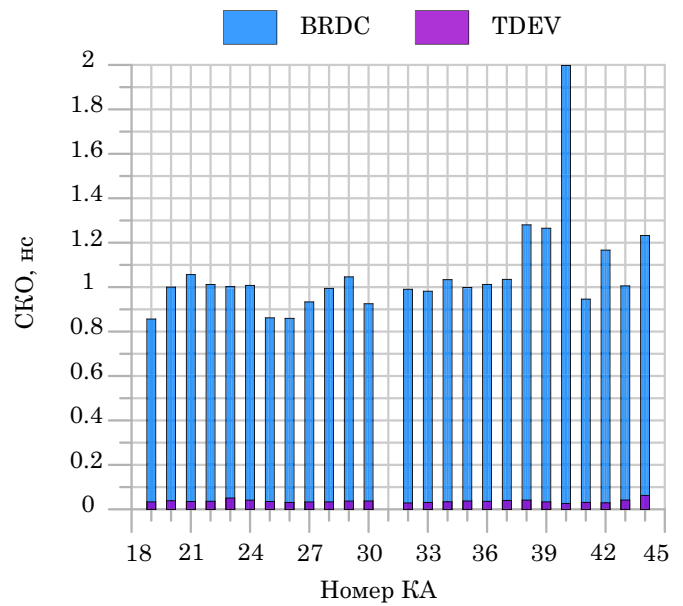


Рис. 8. Ошибки ЧВП БШВ КА BDS-3 относительно потенциального порога точности прогнозирования TDEV (1 час)

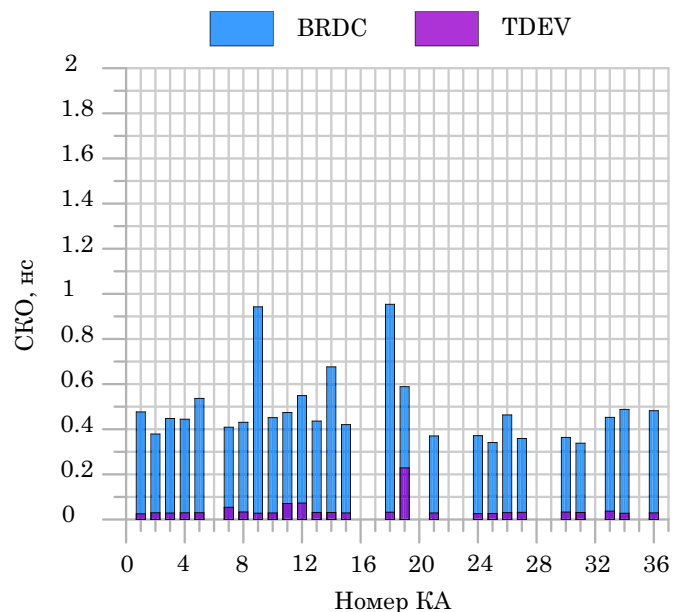


Рис. 9. Ошибки ЧВП БШВ КА Galileo относительно потенциального порога точности прогнозирования TDEV (1 час)

ботки данных, применяемой в подсистеме управления ГНСС, и математической модели прогнозирования БШВ точностным характеристикам бортовых стандартов частоты. Совпадение графиков по ГЛОНАСС и GPS показывает, что алгоритмы обработки данных в ГЛОНАСС так же хорошо соответствуют ТХ бортовых стандартов частоты, как и в системе GPS. Galileo и Beidou, напротив, демонстрируют несоответствие технологии и методов обработки данных, которые в настоящее время

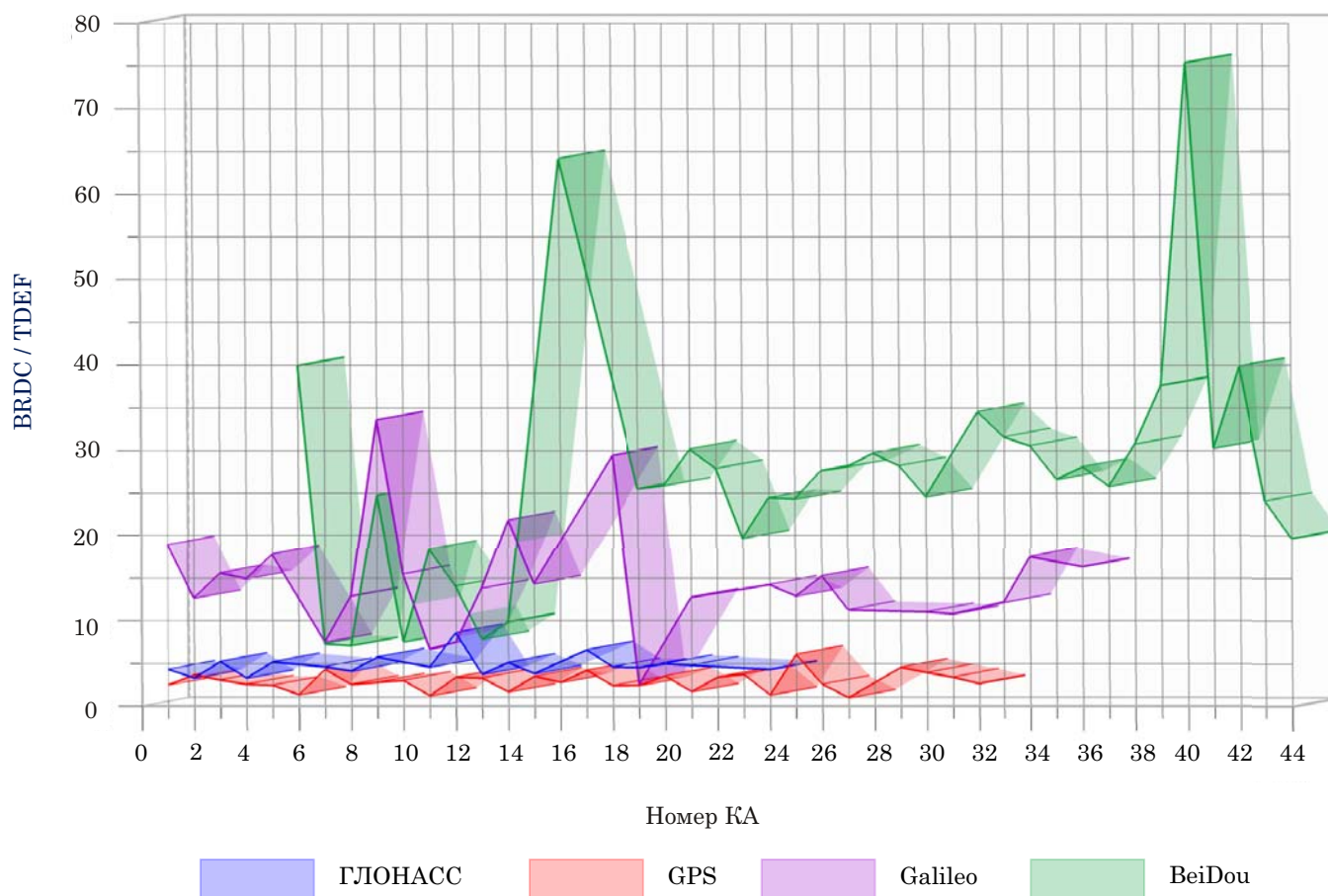


Рис. 10. Отношение ошибок ЧВП БШВ КА к потенциальному порогу точности прогнозирования для всех ГНСС как качество моделей прогнозирования и соответствия технологии обработки данных и ТХ бортовых стандартов частоты

уступают ТХ бортовых СЧ, однако, с другой стороны, это также свидетельствует о потенциальных возможностях дальнейшего повышения ТХ ГНСС Galileo и Beidou.

Заключение

1. Унифицированный подход к оцениванию ТХ СЧ различных ГНСС через девиацию Аллана и ее модификации позволяет сравнивать ТХ СЧ различных ГНСС, выполнять качественный анализ КСЧ и совершенствовать методы прогнозирования ЧВП.

2. Показано, что анализ данных различных источников апостериорной частотно-временной информации позволяет наилучшим образом отслеживать и учитывать особенности поведения каждого бортового СЧ в составе ГНСС при эксплуатации, в том числе и в оперативном режиме.

3. Сравнение бортовых ЧВП КА с эталонными значениями (Final, Rapid, Ultra) может обеспечить сопровождение ЧВО системы ГЛОНАСС.

4. Комплексный подход к оценке характеристик бортовых стандартов частоты и частотно-временного обеспечения позволяет гармонизировать взаимные требования и оценивать соответ-

ствие методов и алгоритмов обработки данных уровню точностных характеристик используемых средств.

Литература

Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). М.: РНИИ КП, 2008. С. 74.

Глобальная навигационная система ГЛОНАСС. Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП). Интерфейсный контрольный документ. Редакция 3.0. М.: ОАО «НПК «СПП», 2011.

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 15.03.2023)

Сальцберг А. В., Шупен К. Г. Пути улучшения среднесрочного прогноза частотно-временных поправок к бортовым шкалам времени ГНСС // Сб. статей «Радионавигационные технологии». Вып. 9 / Под ред. А. И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. С. 83–91.

Сальцберг А. В., Шупен К. Г. Расширенная схема прогнозирования частотно-временных поправок с использованием неравноточных данных // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 51–56.

Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП). Филиал «Прецизионного навигационно-баллистического обеспечения» АО «НПК «СПП» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-svoevp.ru/> (дата обращения: 15.03.2023).

Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса (СТЭХОС). Редакция 2.2 (6.2019). Королев, 2019. С. 59.

Allan D. W. Time and frequency (Time-Domain) characterization, estimation, and prediction of precision clocks

and oscillators // IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control/ Vol. UFFC-34, № 6. 1987. P. 647–654.

International GNSS Service (IGS) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.igs.org/> (дата обращения: 15.03.2023).

Riley W. J. Handbook of frequency stability analysis // NIST Special Publication 1065. Washington: U.S. Government Printing office, 2008. 136 p.