

Результаты анализа передачи времени через ГНСС

© П. П. Богданов, А. Ю. Феоктистов

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Рассмотрены принципы формирования системных шкал времени глобальных навигационных спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и региональных навигационных спутниковых систем QZSS, NavIC, а также передачи системных шкал времени и шкалы координированного времени UTC потребителям, представлены результаты анализа передачи времени через ГНСС в 2022 г.

Результаты получены на основе обработки данных информационной системы данных о динамике земной коры, отделения времени Международного бюро весов и мер и измерительных средств на пунктах Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли и в Национальном центре службы времени Китая.

Полученные результаты показывают следующее:

— в системе GPS расхождение системной шкалы времени относительно UTC поддерживалось в пределах ± 5 нс, погрешность передачи системной шкалы времени и UTC потребителям также не превышала 5 нс;

— расхождение системной шкалы времени ГЛОНАСС относительно UTC не превышало ± 4 нс, за исключением отдельных интервалов. В то же время, в системе ГЛОНАСС по-прежнему сохранялась систематическая погрешность передачи системной шкалы времени и UTC потребителям ~ 20 нс на интервале до 12.02.2022 и 35–40 нс после 12.02.2022;

— расхождение системной шкалы времени Galileo относительно UTC поддерживалось в пределах ± 5 нс;

— в системе BeiDou расхождение системной шкалы времени относительно опорной шкалы времени поддерживалось в пределах ± 10 нс. Однако значения расхождения системной шкалы времени BeiDou и UTC, передаваемые потребителям, находились в диапазоне от 15 нс до 30 нс;

— в региональных навигационных спутниковых системах QZSS (Япония) и NavIC (Индия) расхождение системных шкал времени и UTC поддерживалось в пределах ± 10 нс.

Ключевые слова: глобальная навигационная спутниковая система, космический аппарат, системная шкала времени, шкала координированного времени, поправка на расхождение шкал времени, центральный синхронизатор.

Контакты для связи: Богданов Петр Петрович (bogdanov_pp@rirt.ru).

Для цитирования: Богданов П. П., Феоктистов А. Ю. Результаты анализа передачи времени через ГНСС // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 29–34.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.67.29-34>

The Results of GNSS Time Transfer Analysis

P. P. Bogdanov, A. Y. Feoktistov

“Russian Institute of Radionavigation and Time” JSC, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The paper considers the principles of Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou and Regional Navigation Satellite Systems QZSS, NavIC time scales generating and providing system time scales and Universal Time Coordinated to users. The results of GNSS time transfer analysis for the year of 2022 are presented.

The results were obtained on the basis of processing data provided by the Crustal Dynamics Data Information System, Time Department of Bureau International des Poids et Mesures, measuring facilities located at the sites of Russian State Service of Time, Frequency and Determination of the Earth Rotation Parameters and China National Time Service Center.

The obtained results show the following:

— GPS Time — UTC offset was maintained within ± 5 ns, the error of UTC broadcast to users also didn't exceed 5 ns;

— GLONASS Time — UTC offset was maintained within ± 4 ns, except for some intervals. At the same time, in GLONASS there still remains the systematic error of GLONASS Time and UTC broadcast to users of about 20 ns at the interval till 12.02.2022 and 35–40 ns after 12.02.2022;

— Galileo Time — UTC offset was maintained within ± 5 ns;

— BeiDou Time — reference time offset was maintained within ± 10 ns. However, the values of BeiDou Time — UTC offsets broadcast to users were from 15 ns up to 30 ns;

— in Regional Navigation Satellite Systems QZSS (Japan) and NavIC (India) the values of the offsets between system time scales and UTC were maintained within ± 10 ns.

Key words: Global Navigation Satellite System, space vehicle, system time scale, Universal Time Coordinated, correction for the time scale offset.

Contacts: Petr P. Bogdanov (bogdanov_pp@irt.ru).

For citation: Bogdanov P. P., Feoktistov A. Y. The results of GNSS time transfer analysis // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 67. P. 29–34.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.67.29-34>

Введение

Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) предназначены для высокоточного определения местоположения, скорости движения, а также времени сухопутных, морских, воздушных и других видов потребителей. Используя информацию, передаваемую в навигационных сообщениях космических аппаратов (КА), любой потребитель может определить свое время как в системной шкале времени (ШВ) ГНСС, так и в принятой для данной ГНСС опорной ШВ, в качестве которой, как правило, используется реализация шкалы координированного времени UTC(k), которая, в свою очередь, поддерживается с высокой точностью относительно международной шкалы координированного времени UTC.

В работе рассмотрены принципы формирования системных ШВ ГНСС GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou и региональных навигационных спутниковых систем (РНСС) QZSS, NavIC и передачи системных ШВ и UTC потребителям и представлены результаты анализа передачи времени через ГНСС в 2022 г. Результаты получены на основе обработки данных информационной системы данных о динамике земной коры (Crustal Dynamics Data Information System, CDDIS), отделения времени Международного бюро весов и мер (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) и измерительных средств на пунктах Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГСВЧ) и в Национальном центре службы времени Китая (China National Time Service Center, NTSC).

1. Принцип определения времени потребителем по сигналам ГНСС

Определение времени потребителем в системной ШВ ГНСС осуществляется по формуле:

$$T_{\text{ГНСС}} = t + \Delta T_{\text{ШВС-БШВ}},$$

где t — бортовое время КА; $T_{\text{ШВС-БШВ}}$ — значение расхождения бортовой ШВ КА относительно системной ШВ ГНСС, вычисляемое на основе передаваемых в составе навигационных сообщений поправок.

Определение времени потребителем в опорной ШВ UTC(k) осуществляется по формуле:

$$T_{\text{UTC}(k)} = T_{\text{ГНСС}} + \Delta T_{\text{UTC-ШВС}},$$

где $\Delta T_{\text{UTC-ШВС}}$ — значение расхождения системной ШВ ГНСС относительно опорной ШВ UTC(k), вычисляемое на основе передаваемых в составе навигационных сообщений поправок.

2. Системная ШВ GPS

Системная ШВ GPS является условной «компаративной» шкалой времени, формируемой главной станцией управления на основе ШВ всех станций слежения и бортовых ШВ КА в процессе вычисления эфемерид и поправок к бортовым часам ([GNSS Timescale Description. GPS](#)). Ведущей ШВ при формировании системной ШВ GPS в настоящее время является ШВ, формируемая резервными главными часами военно-морской обсерватории США (United States Naval Observatory, USNO) на авиабазе Шрайвер. Резервные главные часы синхронизируются с главными часами USNO с точностью на уровне 1 нс.

Опорной ШВ для системы GPS является шкала координированного времени UTC(USNO). USNO выполняет мониторинг расхождения системной ШВ GPS относительно UTC(USNO) и передает данные о расхождении в центр управления системы, где они используются для синхронизации системной ШВ GPS с UTC(USNO) и расчета поправок к системной ШВ GPS относительно UTC(USNO). Расхождение системной ШВ GPS относительно UTC(USNO) не должно превышать 1 мкс.

Поправки на расхождение бортовых ШВ КА относительно системной ШВ представляют собой три параметра квадратичной модели расхождения ШВ на каждом двухчасовом интервале прогнозирования. Погрешность поправок на расхождение бортовых ШВ КА относительно системной ШВ является составной частью погрешности потребителя по дальности, которая не должна превышать 6 м.

Поправки к системной ШВ GPS относительно UTC(USNO) представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ. Заданная точность поправок (двух параметров линейной модели) на расхождение системной ШВ GPS относительно UTC(USNO) составляет 40 нс (2σ). Обновление поправок осуществляется не реже одного раза в сутки.

В то же время, в системе GPS существует отличие системной ШВ от UTC(USNO) на целое число секунд, поскольку она не корректируется на ± 1 с при соответствующих корректировках UTC.

С января 2017 года системная ШВ GPS опережает UTC на 18 с.

3. Системная ШВ ГЛОНАСС

В качестве системной ШВ ГЛОНАСС принята условная ШВ, формируемая на основе ШВ центральных синхронизаторов (ЦС), расположенных на двух пунктах наземного комплекса управления ([ГНСС ГЛОНАСС, 2008](#)).

Опорной ШВ для системы ГЛОНАСС является национальная шкала времени России UTC(SU), формируемая Государственным эталоном времени и частоты (ГЭВЧ). Расхождение системной ШВ ГЛОНАСС относительно UTC(SU) не должно превышать 1 мс.

Поправки к бортовой ШВ КА «Глонасс-М» относительно системной ШВ представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ на каждом тридцатиминутном (часовом) интервале прогнозирования. Поправки к бортовой ШВ КА «Глонасс-К» представляют собой три параметра квадратичной модели расхождения ШВ. Погрешность поправок на расхождение бортовых ШВ КА относительно системной ШВ не должна превышать 5.6 нс (σ).

Поправки к системной ШВ ГЛОНАСС относительно UTC(SU), передаваемые КА «Глонасс-М», представляют собой одно значение расхождения ШВ на сутках. Поправки к системной ШВ ГЛОНАСС, передаваемые КА «Глонасс-К», представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ. Заданная точность передаваемых поправок к системной ШВ ГЛОНАСС составляет 1 мкс.

В результате периодической плановой секундной коррекции ШВ ЦС при соответствующих корректировках UTC на ± 1 с между системной ШВ ГЛОНАСС и UTC(SU) не существует сдвига на целое число секунд. Однако между системной ШВ ГЛОНАСС и UTC(SU) существует постоянный сдвиг на 3 часа, обусловленный особенностями функционирования наземного комплекса управления.

4. Системная ШВ Galileo

Системная ШВ Galileo является независимой непрерывной ШВ, реализуемой в двух центрах управления системы и подстраиваемой под шкалу координированного времени UTC*, формируемую на основании данных нескольких ведущих европейских лабораторий времени ([GNSS Timescale Description, Galileo](#)). Мониторинг расхождения системной ШВ Galileo относительно UTC* осуществляется провайдером системного времени Galileo, который рассчитывает расхождение системной ШВ относительно UTC* и параметры перехода от системной ШВ к UTC*. Расхождение системной ШВ Galileo относительно UTC* не должно превышать 50 нс (2σ).

Поправки к бортовым часам КА относительно системной ШВ представляют собой три параметра квадратичной модели расхождения ШВ, которые могут обновляться с периодичностью до 100 мин. Погрешность поправок на расхождение бортовых ШВ КА относительно системной ШВ является составной частью погрешности потребителя по дальности, которая не должна превышать 65 см (σ).

Поправки к системной ШВ Galileo относительно UTC* представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ. Заданная точность поправок составляет 28 нс (95 %). Параметры расхождения системной ШВ относительно UTC*, как правило, обновляются каждые сутки.

Системная ШВ Galileo также не корректируется на ± 1 с при соответствующих корректировках UTC и с января 2017 г. опережает UTC на 18 с.

5. Системная ШВ BeiDou

Системная ШВ BeiDou является непрерывной ШВ, формируемой в центре управления системы на основе ШВ базовой контрольной станции и нескольких станций мониторинга, расположенных на территории Китая ([BeiDou Timescale Description](#)). Опорной ШВ для системы BeiDou является ШВ, формируемая в Пекинском центре спутниковой навигации (Beijing Satellite Navigation Center, BSNC). Расхождение системной ШВ BeiDou относительно опорной ШВ должно поддерживаться в пределах ± 100 нс.

Поправки к бортовым часам КА относительно системной ШВ представляют собой три параметра квадратичной модели расхождения ШВ. Погрешность поправок на расхождение бортовых ШВ КА относительно системной ШВ не должна превышать 2 нс.

Поправки к системной ШВ BeiDou относительно опорной ШВ представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ. Заданная точность поправок составляет 5 нс (2σ). Обновление поправок осуществляется каждый час.

Системная ШВ BeiDou связана с UTC через шкалу координированного времени UTC(NTSC), формируемую в NTSC.

Системная шкала времени BeiDou в настоящее время не корректируется на ± 1 с при соответствующих корректировках UTC и с января 2017 г. опережает UTC на 4 с.

6. Системная ШВ QZSS

В региональной навигационной спутниковой системе (PHCC) QZSS (Япония) системная ШВ формируется аналогично системе GPS в процессе вычисления эфемерид и поправок к бортовым часам КА ([GNSS Timescale Description, QZSS](#)).

Опорной ШВ для системы QZSS является шкала координированного времени UTC(NICT), формируемая в Национальном институте инфор-

мационных и коммуникационных технологий (National Institute of Information and Communication Technology, NICT).

Поправки к бортовым часам КА относительно системной ШВ представляют собой три параметра квадратичной модели расхождения ШВ. Погрешность поправок является составной частью погрешности потребителя по дальности, которая не должна превышать 1.6 м (2σ).

Поправки к системной ШВ QZSS относительно UTC(NICT) представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ. Точность поправок на расхождение системной ШВ QZSS относительно UTC(NICT) не определена. Расхождение системной ШВ QZSS относительно UTC(NICT) не должно превышать 1 мкс.

7. Системная ШВ NavIC

Системная ШВ RHCC NavIC (Индия) является математической и формируется в навигационном центре Индийской организации по космическим исследованиям (Indian Space Research Organisation, ISRO) на основе ансамбля активных водородных мазеров, цезиевых стандартов частоты и пассивных водородных мазеров ([Ramakrishna, 2018](#)).

Опорной ШВ для системы NavIC является шкала координированного времени UTC(NPLI), формируемая Национальной физической лабораторией Индии (National Physical Laboratory of India, NPLI).

Расхождение системной ШВ NavIC относительно UTC(NPLI) должно поддерживаться в пределах ± 40 нс (2σ).

Поправки к бортовым часам КА относительно опорной ШВ представляют собой три параметра квадратичной модели расхождения ШВ. Поправки к системной ШВ QZSS относительно UTC(NPLI) представляют собой два параметра линейной модели расхождения ШВ.

8. Результаты оценки передачи времени через ГНСС

Зависимости расхождения системных ШВ всех ГНСС относительно опорных ШВ, полученные на основе передаваемых в составе навигационных сигналов КА параметров расхождения ШВ ([CDDIS, 2023](#)), и зависимости точности передачи системных ШВ ГНСС и UTC потребителям через системы GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, полученные по данным отделения времени ВРМ ([ВРМ, 2023](#)), а также по измерениям на пункте ГСВЧ в Новосибирске ([ВНИИФТРИ, 2023](#)) и в NTSC (данные предоставлены NTSC) представлены на рис. 1–6. Оценки точности передачи системных ШВ RHCC и UTC через системы QZSS и NavIC не получены в связи с отсутствием соответствующих измерений.

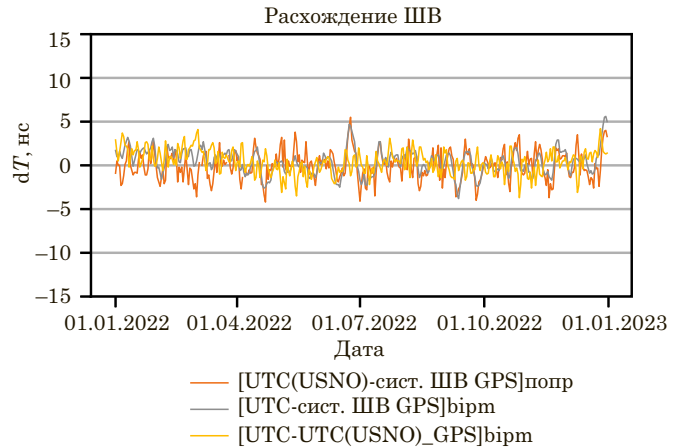


Рис. 1. Зависимости расхождения системной ШВ GPS относительно UTC(USNO) и точности передачи системной ШВ GPS и UTC потребителям

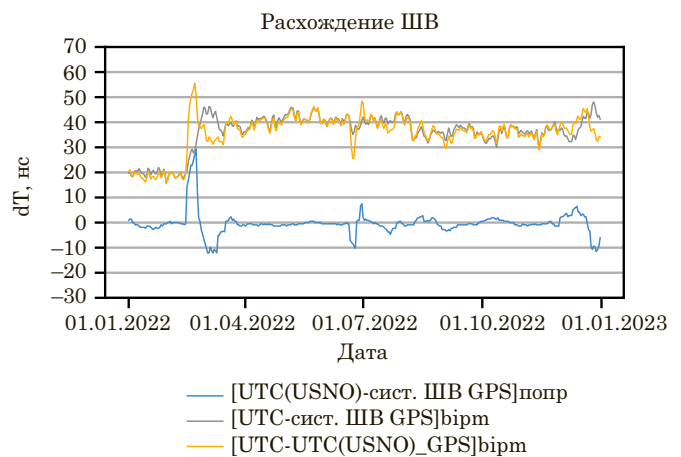


Рис. 2. Зависимости расхождения системной ШВ ГЛОНАСС относительно UTC(SU) и точности передачи системной ШВ ГЛОНАСС и UTC потребителям

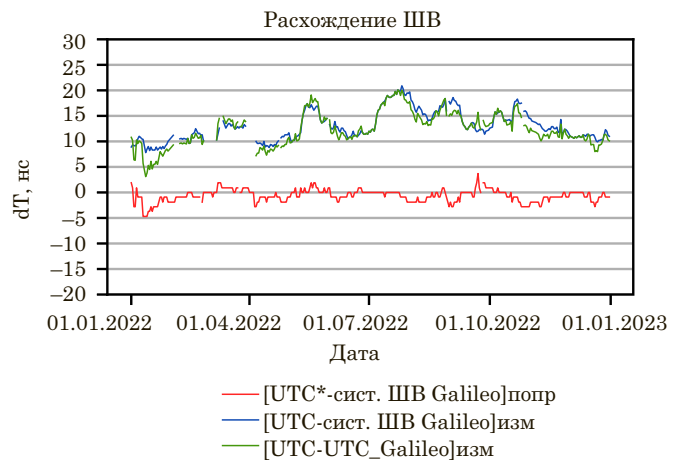


Рис. 3. Зависимости расхождения системной ШВ Galileo относительно UTC* и точности передачи системной ШВ Galileo и UTC потребителям

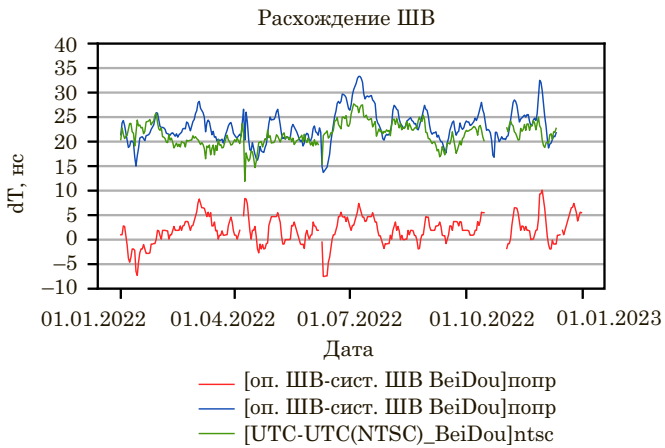


Рис. 4. Зависимости расхождения системной ШВ BeiDou относительно опорной ШВ и точности передачи системной ШВ BeiDou и UTC потребителям

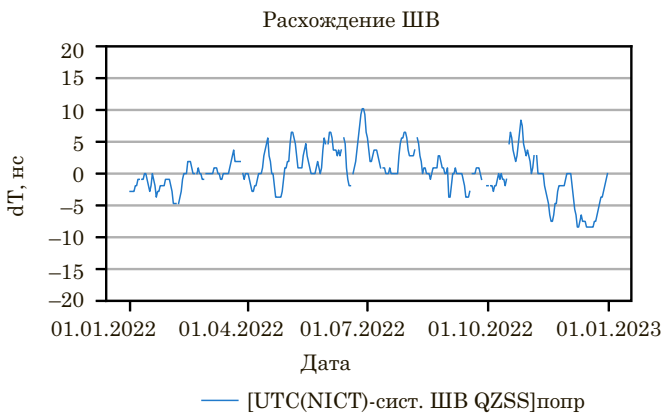


Рис. 5. Зависимость расхождения системной ШВ QZSS относительно UTC(NICT)

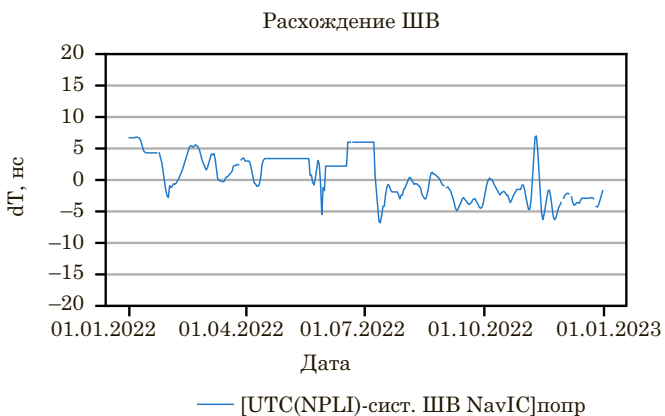


Рис. 6. Зависимость расхождения системной ШВ NavIC относительно UTC(NPLI)

Представленные данные показывают следующее.

В системе GPS расхождение системной ШВ относительно UTC(USNO) в 2022 г. поддерживалось в пределах ± 5 нс. Погрешность передачи системной ШВ и UTC потребителям не превышала также 5 нс. Следовательно, любой потребитель, оснащенный калиброванным приемником сигнала

GPS, может получить шкалу UTC с точностью на уровне 5 нс.

Расхождение системной ШВ ГЛОНАСС относительно UTC(SU) в 2022 г., за исключением отдельных интервалов, не превышало ± 4 нс, что соответствует заданным требованиям. В то же время в системе ГЛОНАСС по-прежнему сохранялась систематическая погрешность передачи системной ШВ и UTC(SU) потребителям ~ 20 нс на интервале до 12.02.2022 и 35–40 нс после 12.02.2022. Судя по всему, причиной этого является некорректный учет задержек сигналов между ЦС системы и средствами, измерения на которых в дальнейшем используются при формировании поправок к бортовым ШВ КА и поправок к системной ШВ ГЛОНАСС.

В системе Galileo расхождение системной ШВ относительно UTC в течение 2022 г. поддерживалось в пределах ± 5 нс. По результатам измерений на пункте ГСВЧ в Новосибирске погрешность передачи системной ШВ и UTC потребителям находится в пределах 10–20 нс. Такое отличие результатов объясняется, очевидно, тем, что используемый на пункте приемник не является абсолютно калиброванным.

В системе BeiDou расхождение системной ШВ относительно опорной ШВ BSNC поддерживалось, как правило, в пределах ± 10 нс. В то же время, значения расхождения системной ШВ BeiDou и UTC, передаваемые потребителям, находились в диапазоне от 15 нс до 35 нс. Вероятной причиной этого является (то, что положение ШВ BSNC относительно UTC не определено) наличие расхождения между ШВ BSNC и UTC (NTSC).

В системах QZSS и NavIC расхождение системных ШВ относительно опорных ШВ поддерживается в пределах ± 10 нс.

Заключение

Полученные результаты анализа передачи времени через ГНСС на основе данных CDDIS, VIPM и по измерениям на пункте ГСВЧ в Новосибирске и в NTSC показывают, что расхождение системных ШВ ГНСС относительно опорных ШВ, как правило, поддерживается лучше заявленных характеристик на системы.

При этом погрешность передачи системной ШВ и UTC потребителям в системах GPS и Galileo в 2022 году не превышала 5 нс.

В то же время, в системах ГЛОНАСС и BeiDou в 2022 г. сохранялась систематическая погрешность передачи системных ШВ и UTC потребителям.

Литература

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений [Электронный ресурс]. URL: ftp://ftp.vniiftri.ru/Atomic_Time/ (дата обращения: 20.02.2023).

ГНСС ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ // М.: 2008. [Электронный ресурс]. URL: https://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD_GLONASS_rus_v5.1.pdf (дата обращения: 20.02.2023).

Bureau international des poids et mesures. [Электронный ресурс]. URL: <https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/other-products/utcgNSS/utc-gNSS> (дата обращения: 20.02.2023).

Crustal dynamics data information system. [Электронный ресурс]. URL: <https://cddis.gsfc.nasa.gov/archive/data/daily> (дата обращения: 20.02.2023).

Ramakrishna B. N. Indian regional navigation satellite system: ground segment // Thirteen meeting of the international committee on Global Navigation Satellite Systems. Working group: Reference Frames, Timing and Ap-

plications, 2018. [Электронный ресурс]. URL: https://www.unoosa.org/documents/pdf/icg/2018/icg13/wgd/wgd_07.pdf (дата обращения: 20.02.2023).

GNSS Timescale description. GPS. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/icg/2012/Timescale-GPS.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).

GNSS Timescale description. Galileo. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/icg/2016/gst2016.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).

Beidou timescale description. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/icg/2016/Beidou-Timescale2016.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).

GNSS Timescale description. QZSS. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unoosa.org/pdf/icg/2016/QZSS-Timescale2016.pdf> (дата обращения: 20.02.2023).