

Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022: исследование метрологических характеристик

Екатерина Андреевна Карауш^{1✉}, Дмитрий Станиславович Печерица²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹khanykova_ea@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5357-4089>

²pecheritsa_ds@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7585-9803>

Аннотация. Рассмотрены координатно-временные измерения как один из распространенных видов измерений в различных системах радионавигации и радиолокации в области геодезии и радиосвязи. Показано, что увеличение числа координатно-временных средств измерений, а также возросший уровень требований к точности определений координат потребителя обусловили актуальность разработки Государственного первичного специального эталона координат местоположения. Представлен состав разработанного во ВНИИФТРИ Государственного первичного специального эталона координат местоположения ГЭТ 218-2022, который позволит обеспечить единство измерений координат и азимута, спутниковой геодезической и навигационной аппаратуры, использующей сигналы глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и наземных дополнений. Исследованы метрологические характеристики ГЭТ 218-2022 в части хранения абсолютных координат, воспроизведения/измерения беззапросной дальности по фазам дальномерного кода и несущей частоты, воспроизведения координат потребителя глобальных навигационных спутниковых систем, измерения приращений координат в системы координат. Результаты исследований метрологических характеристик ГЭТ 218-2022 в части хранения абсолютных координат и измерений приращений координат потребителя показали сопоставимый уровень точности с характеристиками международной системы ITRS. С применением ГЭТ 218-2022 можно проводить испытания таких перспективных средств измерений, как высокоточные беззапросные измерительные системы, прецизионные приёмники глобальных навигационных спутниковых систем в режиме абсолютных/относительных фазовых измерений.

Ключевые слова: эталон координат местоположения, координатно-временные средства измерений, глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), беззапросная дальность

Для цитирования: Карауш Е. А., Печерица Д. С. Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022: исследование метрологических характеристик // Измерительная техника. 2022. № 11. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-3-8>

State primary special standard of position coordinates GET 218-2022: the metrological characteristics study

Ekaterina A. Karaush^{1✉}, Dmitry S. Pecheritsa²

^{1, 2} Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleev, Moscow region, Russia

¹khanykova_ea@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5357-4089>

²pecheritsa_ds@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7585-9803>

Abstract. The paper considers positioning and timing as one of the common types of measurements in various radio navigation and radiolocation systems in the field of geodesy and radio communication. It is shown that an increase in the number of positioning and timing measuring instruments, as well as an increased level of requirements to the accuracy of user coordinate determinations has led to the relevance of developing the State primary special standard of position coordinates. The composition of the VNIIFTRI State primary special measurement standard of position coordinates GET 218-2022 is presented, which will allow providing the unity of coordinate and azimuth measurements, satellite geodetic and navigation equipment using the signals of global navigation satellite systems GLONASS, GPS, Galileo, BeiDou and ground augmentations. Metrological characteristics of GET 218-2022 in terms of storing absolute coordinates, reproducing/measuring unsolicited range by phases of distance code and carrier frequency, reproducing coordinates of global navigation satellite systems consumer, measuring coordinate increments into coordinate systems. The results of GET 218-2022 metrological characteristics research with regard to absolute coordinate storage and measurement of the consumer coordinate increments showed a comparable level of accuracy with the characteristics of the ITRS international system. Using GET 218-2022 it is possible to conduct tests of such prospective measuring instruments as high-precision pseudorange measuring systems, precision receivers of global navigation satellite systems in absolute/relative phase measurements mode.

Keywords: standard of position coordinates, position and timing measuring instruments, global navigation satellite systems (GNSS), pseudorange

Введение. В настоящее время существенно возросла востребованность координатно-временных измерений. За последние 5 лет произошло массовое внедрение новых образцов навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), таких как бортовые устройства системы «Платон», тахографы, средства мониторинга транспорта и др. Необходимо также учитывать возросший уровень точности прецизионных и перспективных координатно-временных средств измерений (КВСИ), метрологические характеристики которых на уровне или выше характеристик рабочего эталона координат местоположения 1-го разряда (далее – РЭ)¹ (табл. 1).

В свою очередь аттестация РЭ производится косвенным способом с прослеживаемостью к эталонам других единиц величин. Такая работа продолжительна и трудоёмка, только сбор результатов измерений занимает 2–3 месяца. В целях обеспечения единства и требуемой точности измерений координат местоположения спутниковой геодезической и навигационной аппаратуры, использующей сигналы ГНСС и наземных дополнений, во ВНИИФТРИ разработан

и утверждён Государственный первичный специальный эталон координат местоположения ГЭТ 218-2022².

ГЭТ 218-2022 будет способствовать дальнейшему развитию координатно-временных измерений в Российской Федерации, позволит испытывать перспективные средства измерений и оценивать характеристики беззапросных измерительных систем дистанционно, а также повысит эффективность аттестации рабочих эталонов 1-го и 2-го разряда.

Состав ГЭТ 218-2022. ГЭТ 218-2022 предназначен для воспроизведения, хранения координат местоположения и их передачи рабочим эталонам 1-го, 2-го и 3-го разрядов и координатно-временным средствам измерений.

ГЭТ 218-2022 состоит из стационарного комплекса средств метрологического обеспечения средств измерений координат (КСМО СИК) и комплекса средств метрологического обеспечения средств измерений азимута (КСМО СИА) (рис. 1). КСМО СИК предназначен для обеспечения единства измерений координат спутниковой геодезической и навигационной аппаратуры, использующей сигналы ГНСС и наземных дополнений. КСМО СИА обеспечивает единство измерений определения

азимутов исходных направлений, их хранение и передачу единицы астрономического азимута от исходных направлений средствам измерений азимута.

Исследование метрологических характеристик ГЭТ 218-2022. Результаты исследования метрологических характеристик ГЭТ 218-2022 при воспроизведении и передаче координат местоположения приведены в табл. 2, где НСП – неисключённая систематическая погрешность при доверительной вероятности P , СКО – среднее квадратическое отклонение.

Для сопоставления метрологических характеристик ГЭТ 218-2022 можно рассмотреть характеристики Международной наземной системы координат (International Terrestrial Reference Frame (ITRF)), использующей в качестве исходных данных координаты опорных станций и параметры вращения Земли [2]. Система ITRF представляет собой набор точек с трёхмерными декартовыми координатами, которые реализуют идеальную систему отсчёта – Международную наземную систему отсчёта (International Terrestrial Reference System

Таблица 1

Сравнение метрологических характеристик рабочего эталона координат местоположения 1-го разряда и существующих средств измерений

Метрологическая характеристика	РЭ	КВСИ
ПДП хранения абсолютных координат в системах WGS-84, ПЗ-90.11, ГСК-2011, м	0,02	0,02
ПДП воспроизведения координат местоположения потребителя ГНСС в системах WGS-84, ПЗ-90.11, ГСК-2011, м	0,1	0,05
ПДП измерения приращений координат в системах координат WGS-84, ПЗ-90.11, ГСК-2011, м	$0,003 + 0,5 \cdot 10^{-3} L^*$	$0,003 + 0,5 \cdot 10^{-6} L^*$
ПДП воспроизведения/измерения беззапросной дальности, м:		
по фазе дальномерного кода	0,05	0,05
по фазе несущей частоты	0,002	0,001
ПДП воспроизведения/измерения скорости изменения беззапросной дальности, м/с	0,01	0,01
ПДП формирования скорости потребителя ГНСС, м/с	0,02	0,01
ПДП измерения углов пространственной ориентации, °	1	1,5

Примечание. ПДП – предел допускаемой погрешности; * L – приращение координат, м.

¹ ГОСТ Р 8.750-2011. ГСИ. Государственная поверочная схема координатно-временных средств измерений.

² Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 01.09.2022 г. № 2175 «Об утверждении Государственного первичного специального эталона координат местоположения».



Рис. 1. Состав Государственного первичного специального эталона координат местоположения ГЭТ 218-2022:
 КСМО СИК – комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений координат; КСМО СИА – комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений азимута

Fig. 1. Composition of state primary special standard of position coordinates GET 218-2022:
 KSMO SIC – complex of metrological support means of measuring coordinates; KSMO SIA – complex of metrological support means of measuring azimuth

(ITRS)) [3]. Согласно решению 24-й Генеральной конференции по мерам и весам [4] ведущими метрологическими организациями принята рекомендация по применению в качестве международной системы отсчёта ITRS, реализованной Международной службой вращения Земли (The International Earth Rotation Service (IERS)) для достижения совместимости ГНСС и унификации решений навигационных задач. К средствам измерений, на основе данных которых реализуется система ITRF³, предъявляются следующие требования: НСП хранения абсолютных координат не должна превышать 0,01 м [3]; СКО приращения координат – не более 0,003 м, НСП приращения координат – не более $1 \cdot 10^{-6} L$ м.

Метрологические характеристики ГЭТ 218-2022

Характеристика	СКО	НСП $\Theta(P=0,99)$
Хранение абсолютных координат, м	–	<0,01
Измерение приращений координат в системах координат WGS-84, ПЗ-90.11, ГСК-2011, ITRF, м	$<0,5 \cdot 10^{-6} L^*$	<0,001
Воспроизведение координат потребителя ГНСС в системах координат WGS-84, ПЗ-90.11, ГСК-2011, ITRF, м	<0,02	<0,03
Воспроизведение/измерение беззапросной дальности по фазе дальномерного кода, м	<0,02	<0,02
Формирование скорости потребителя ГНСС, м/с	<0,004	<0,002
Воспроизведение/измерение скорости изменения беззапросной дальности, м/с	<0,004	<0,001
Измерение астрономического азимута оптического хранителя азимутальных направлений, °	<0,5	<0,5
Воспроизведение/измерение беззапросной дальности по фазе несущей частоты, м	<0,0006	–

* L – приращение координат, м.

³ Координаты и скорость станций ITRF2020. URL: https://itrf.ign.fr/ftp/pub/itrf/itrf2020/ITRF2020_GNSS.SSC.txt (дата обращения: 01.08.2022).

Хранение абсолютных координат обеспечено сетью стационарных геодезических пунктов (СГП) из состава КСМО СИК (см. рис. 1). Погрешность хранения координат рассчитывали по результатам измерений координат СГП с привлечением средств из состава Государственного первичного специального эталона единицы длины ГЭТ 199-2018 (навигационной аппаратуры потребителя) и ГНСС-приёмника Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли с кодовым обозначением MDVJ, входящего с международную систему ITRF2020 [5]. Расстояние между СГП менее 2 км. Навигационную аппаратуру потребителя размещали в СГП и измеряли радионавигационные параметры по сигналам навигационных космических аппаратов ГНСС. ГНСС-приёмник MDVJ непрерывно измеряет радионавигационные параметры по сигналам ГНСС ГЛОНАСС. Координаты пункта ГНСС-приёмника MDVJ выбраны в качестве опорных. С помощью программного обеспечения авторами обработаны псевдодальномерные результаты измерений, проведённых в течение не менее 8 суток (один сеанс наблюдений). Погрешность координат СГП Θ оценена для 10 сеансов наблюдений в период с 27 ноября 2020 г. по 30 августа 2021 г. (рис. 2). Результаты обработки измерений показали, что максимальное отклонение измеренных координат от среднего значения не превышает 0,01 м.

Измерение/воспроизведение беззапросной дальности по фазе дальномерного кода обеспечивается осциллографом LabMaster 10-Zi-A, имитатором сигналов ГНСС GSS7000,

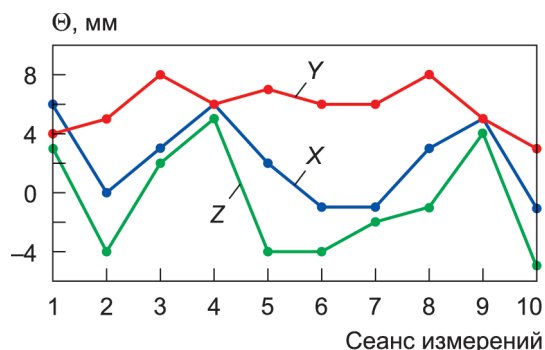


Рис. 2. Результаты расчётов погрешности координат (отклонение измеренного значения координат X, Y, Z от среднего значения координат) 10 сеансов измерений в период с 27 ноября 2020 г. по 30 августа 2021 г.

Fig. 2. The coordinate error calculations (deviation of the measured value from the mean value of X, Y, Z coordinates) for 10 measurement sessions conducted in the period from November 27, 2020 to August 30, 2021

специальным программно-математическим обеспечением с применением эталонного комплекса средств хранения шкалы времени. Имитатор сигналов ГНСС использовали в качестве источника эталонного идеального навигационного сигнала. Осциллограф предназначен для определения характеристик сигнала. Предварительно для определения систематической погрешности воспроизведения псевдодальности имитатор калибруется с помощью цифрового осциллографа [6]. Таким образом, НСП воспроизведения беззапросной дальности содержит НСП измерения беззапросной дальности (табл. 3) и НСП метода непосредственной калибровки [6]. Погрешность метода полностью обусловлена погрешностью оценки групповой временной задержки (ГВЗ) в соединительных кабелях векторным анализатором цепей и обеспечивается прослеживаемостью к Государственному первичному эталону единицы величины волнового сопротивления ГЭТ 75-2017.

Таким образом, НСП измерения беззапросной дальности по фазе дальномерного кода θ_R не превышает 0,019 м.

Среди всех источников шума наибольшую энергию имеет шум в тракте осциллографа (рис. 3) и описывается как СКО погрешности измерения положения k -го фронта моделирующей последовательности. Следует отметить, что СКО единичного измерения будет редуцировано за счёт осреднения всех измерений в интервале накопления, т. е. при обработке всей записанной последовательности дисперсия ошибки будет уменьшена в N раз, где N – количество фронтов единичной псевдослучайной последовательности в интервале накопления. При работе по сигналам системы ГЛОНАСС [6] с частотным разделением с санкционированным доступом СКО измерения беззапросной дальности по фазе дальномерного кода S_R оценивается как

$$S_R = c\sigma_N(k)/\sqrt{N} = 0,01 \text{ м},$$

где c – скорость света; $\sigma_N(k)$ – СКО невязок фронтов псевдослучайной последовательности; для сигналов ГЛОНАСС $N > 5000$; k – момент времени.

Вклад погрешности формы псевдослучайной последовательности в шум измерений временной задержки навигационных радиосигналов пренебрежимо мал, поэтому эта составляющая не учитывается.

Воспроизведение координат потребителя ГНСС обеспечивается имитатором сигналов ГНСС. Погрешность воспроизведения координат потребителя ГНСС прямо зависит от погрешности воспроизведения беззапросной дальности по фазе кода [7] и пространственного геометрического фактора ухудшения точности в режиме трёхмерных измерений местоположения (position dilution of precision (PDOP)) [8], который обусловлен конфигурацией формируемого навигационного созвездия и может быть задан на этапе формирования сценария для имитатора. Согласно правилам применения

Таблица 3

НСП измерений беззапросной дальности по фазе дальномерного кода

Источник неопределённости	Значение, м
Измерение ГВЗ в соединительных кабелях	0,009
Неравномерность задержки в разных каналах осциллографа	0,004
Измерение временных интервалов осциллографом	$3 \cdot 10^{-6}$
Температурный дрейф задержки в радиочастотном тракте осциллографа	0,009

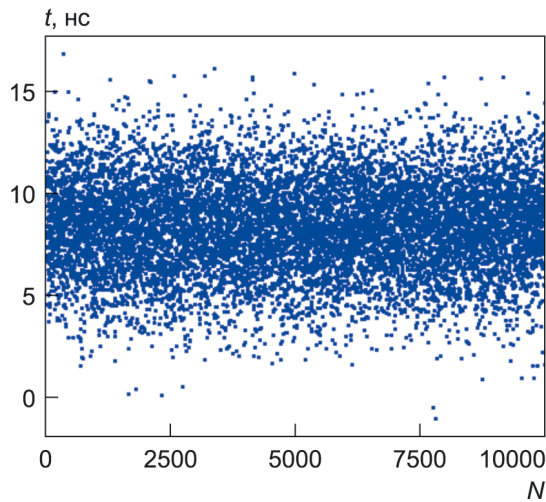


Рис. 3. Невязки t измерений положения фронтов псевдослучайной последовательности в интервале накопления N

Fig. 3. Measurement residual t of pseudo-random sequence fronts measurements at the interval N

КСМО СИК $PDOP \leq 1,5$, что достижимо при хороших условиях приёма: полная орбитальная группировка, чистый небосвод, отсутствие затенений и помех с углов места выше 5° над горизонтом [6–10].

НСП воспроизведения координат рассчитывается на основе НСП воспроизведения беззапросной дальности имитатором сигналов ГНСС по формуле

$$\theta_{XYZ} = PDOP \theta_R = 0,029 \text{ м.}$$

СКО воспроизведения координат потребителя ГНСС в системах WGS-84, ПЗ-90.11, ГСК-2011, ITRF вычисляется по формуле:

$$S_{XYZ} = S_R PDOP = 0,015 \text{ м.}$$

Измерение/воспроизведение беззапросной дальности по фазе несущей частоты обеспечивается имитатором сигналов ГНСС и осциллографом LabMaster 10-Zi-A. Измерения фазы несущей частоты принципиально всегда содержат неопределённое количество длин волн [10], поэтому для этого вида измерений нормируется только СКО случайной составляющей.

СКО измерения беззапросной дальности по фазе несущей частоты обусловлено погрешностями измерений временных интервалов осциллографом и формы формируемого сигнала. Случайная погрешность измерений временных интервалов осциллографом обусловлена кратковременной нестабильностью частоты опорного генератора осциллографа и погрешностью отсчётов. СКО измерения беззапросной дальности по фазе несущей частоты составляет 0,0003 м.

Определение СКО воспроизведения беззапросной дальности по фазе несущей частоты рассчитывается из разности фаз между оцифрованным сигналом несущей частоты и

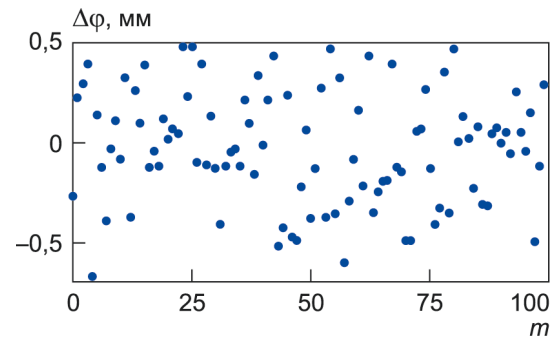


Рис. 4. Результаты измерений псевдофазы $\Delta\varphi$; m – номер измерения

Fig. 4. Results of pseudophase measurements $\Delta\varphi$; m – measurement number

математически синтезируемым образцовым сигналом той же частоты (рис. 4), что и несущая частота:

$$\Delta\varphi = \frac{2}{A_{\text{оп}} A_0} K^{-1} \sum_{k=1}^K [s_{\text{оп}}(k) s_0(k)],$$

где $s_{\text{оп}}(k)$, $s_0(k)$ – дискретные отсчёты опорного и измеряемого сигналов в k -й момент времени; $A_{\text{оп}}$, A_0 – амплитуды опорного и измеряемого сигналов; K – количество отсчётов (не менее 20 млн) [8].

СКО воспроизведения беззапросной дальности по фазе несущей частоты имитатором сигналов ГНСС не превышает 6 мм.

Заключение. Характеристики ГЭТ 218-2022 подтверждены результатами государственных испытаний, что позволит оценить параметры перспективных средств измерений, таких как высокоточные беззапросные измерительные системы, прецизионная навигационная аппаратура потребителя с режимом абсолютных и относительных фазовых измерений, прецизионные имитаторы сигналов ГНСС. Точностные характеристики эталона сопоставимы с требованиями, предъявляемыми службой IERS в части хранения абсолютных координат, приращения координат потребителя.

Список источников

1. Антонович К. М. Использование радионавигационных систем в геодезии. Т. 1. М: ФГУП «Картгеоцентр», 2006. 360 с.
2. Petit G., Luzum B., *IERS Conventions (2010)*, *IERS Technical Note*, no. 36, available at: <http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf> (accessed: 01.08.2022).
3. *Proceedings of the 24th meeting of the General Conference on Weights and Measures (October 2011)*, available at: <https://www.bipm.org/documents/20126/35657008/CGPM24.pdf/5cc3fc20-f45c-42f2-ea67-9b7f1e92408f> (accessed: 01.08.2022).
4. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X., *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, vol. 121, no. 8, pp. 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>
5. Печерица Д. С. Калибровка навигационной аппаратуры потребителей ГЛОНАСС // Журнал Сибирского федерального

университета. Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 1. С. 126–131. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0078>

6. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Под ред. Перова А. И., Харисова В. Н. 4-е изд. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

7. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien GmbH, 2001, 404 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-99>

8. ГЛОНАСС. Модернизация и перспективы развития. Монография / Под ред. А.И. Перова. М.: Радиотехника, 2020. 1072 с.

9. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications: Noordwijk, 2013, 223 p., available at: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf (accessed: 01.08.2022).

10. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, eds. Peter J.G. Teunissen, Oliver Montenbruck, Springer Cham, 2017, 1327 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>

Reference

1. Antonovich K. M., *Ispol'zovanie radionavigacionnyh sistem v geodezii [The use of radio navigation systems in geodesy]*, Moscow, FSUE "Kartgeocenter" Publ., 2006, book 1, 360 p. (In Russ.)

2. Petit G., Luzum B., *IERS Conventions (2010)*, *IERS Technical Note*, no. 36, available at: <http://iers-conventions.obspm.fr/content/tn36.pdf> (accessed: 01.08.2022).

3. *Proceedings of the 24th meeting of the General Conference on Weights and Measures (October 2011)*, available at: <https://www.bipm.org/documents/20126/35657008/CGPM24.pdf/5cc3fc20-f45c-42f2-ea67-9b7f1e92408f> (accessed: 01.08.2022).

4. Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X., *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, vol. 121, no. 8, pp. 6109–6131. <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>

5. Pecheritsa D. S., GLONASS Receivers Calibration, *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2019, vol. 12(1), 126–131. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0078>

6. GLONASS. *Principy postroenija i funkcionirovanija [GLONASS. Principles of construction and operation]*, eds. Perov A. I., Harisov V. N., Moscow, Radio Engineering, 2010, 800 p. (In Russ.)

7. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J., *Global Positioning System. Theory and Practice*, Springer-Verlag Wien GmbH, 2001, 404 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-6199-99>

8. Perov A. I., GLONASS. Modernizacija i perspektivy razvitija [GLONASS. Modernization and development prospects], Moscow, Radio Engineering, 2020, 1072 p.

9. Sanz Subirana J., Juan Zornoza J. M., Hernández-Pajares M., *GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms*, ESA Communications: Noordwijk, 2013, 223 p., available at: https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf (accessed: 01.08.2022).

10. *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*, eds. Peter J.G. Teunissen, Oliver Montenbruck, Springer Cham, 2017, 1327 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1>

Статья поступила в редакцию 01.08.2022; одобрена после рецензирования 21.09.2022; принята к публикации 29.09.2022.
The article was submitted 01.08.2022; approved after reviewing 21.09.2022; accepted for publication 29.09.2022.