

IV. Время-частотные и навигационные измерения

УДК 521.3 + 521.92

**ВЫЧИСЛЕНИЕ ОРБИТ НАВИГАЦИОННЫХ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ГЛОНАСС И GPS
В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ ВО ФГУП «ВНИИФТРИ»****И.В. Безменов***ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
bezmenov@vniiftri.ru*

В работе представлены результаты разработки в Главном метрологическом центре Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВЧ) ФГУП «ВНИИФТРИ» алгоритма и программы расчёта эфемеридно-временной информации (координат и временных поправок) навигационных космических аппаратов ГЛОНАСС и GPS в оперативном режиме. Расчёты проводятся по данным измерений, получаемых в виде часовых RINEX-файлов наблюдений от станций слежения сети IGS (International GNSS Service — международная служба GPS). Представлены результаты проведённых тестовых расчётов. Приведён анализ точности полученных результатов по сравнению с апостериорными данными других Центров обработки и анализа данных.

Ключевые слова: Навигационный космический аппарат, Глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), эфемериды и временные поправки, Центры анализа и обработки данных, часовые RINEX-файлы.

**ORBIT ESTIMATION OF GLONASS AND GPS NAVIGATION
SATELLITES IN ULTRA-RAPID REGIME
IN FSUE “VNIIFTRI”****I.V. Bezmenov***FSUE “VNIIFTRI”, Mendeleevo, Moscow region
isaev@vniiftri.ru*

In the article have been presented results on development of the algorithm and the program for calculation in ultra-rapid regime of ephemerides and time information (orbits and clocks corrections) for GLONASS and GPS satellites performed in the Main Metrological Centre of the State Service of Time and Frequency (MMC SSTF) of Federal State Unitary Enterprise “VNIIFTRI”. The calculations are based on observation data in hourly RINEX-files received from tracking stations of IGS network. Test results are presented. The analysis of the accuracy of the obtained results compared to the final data of other Analysis Centers is given.

Key words: Navigation satellite, Global Navigation Satellite Systems (GNSS), ephemerids and clock corrections, Analysis Centers, hourly RINEX-files.

Введение

Исходными данными при решении многих задач в областях: космической геодезии, геодинамики, координатно-временного и навигационного обеспечения — являются данные об эфемеридах и временных поправках навига-

Альманах современной метрологии, 2020, № 1 (21)

онных космических аппаратов (НКА) Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Эфемеридно-временная информация (ЭВИ) об орбитах НКА является основой во многих приложениях, связанных, например, с проведением кадастровых работ, осуществлением точного позиционирования объектов, как неподвижно расположенных на поверхности Земли, так и перемещающихся в околоземном пространстве. Кроме того, ЭВИ НКА ГНСС используется при осуществлении метрологического обеспечения средств и систем измерений, передачи времени и частоты на большие расстояния.

ЭВИ НКА ГНСС формируется рядом Центров анализа и обработки данных (ниже для краткости называемых Центрами) как за рубежом, так и на территории РФ. Такими Центрами являются, например, информационно-аналитический центр (ИАЦ) — СОД ЦНИИмаш КВНО ГЛОНАСС, РФ; система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП), РФ; Международная служба ГНСС (*International GNSS Service, IGS*) (США), Европейский центр определения орбит (*Center Orbit Determination in Europe, CODE*), Швейцария. Исходными данными при расчётах этими Центрами орбит (эфемерид и временных поправок) НКА ГНСС являются, как правило, данные измерений, полученные от радиоприёмных устройств (ГНСС-приёмников [1]), расположенных на станциях слежения, входящих в глобальную международную сеть IGS. Эти данные формируются на основе измерений фаз и времени распространения радиосигналов, излучаемых навигационными спутниками в *L*-диапазоне, и передаются в международные базы данных (МБД) в виде RINEX-файлов измерений (*d*-формат) и RINEX-файлов навигационных сообщений GPS и ГЛОНАСС (*n*-, *g*-форматы) [2]¹.

Несмотря на то что большинство констант и моделей известны и рекомендованы к использованию Стандартами IERS² (*IERS Conventions*, см. [3]), получаемые разными Центрами значения эфемерид и временных поправок НКА, как правило, различаются. Так, в определении пространственных координат НКА различия (среднеквадратичные отклонения, СКО) между двумя Центрами могут достигать нескольких сантиметров, а временные поправки — 10–20 нс и более. Это может объясняться различиями в математическом аппарате, применяемом каждым из Центров при отыскании решений, различными предустановленными значениями порогов для детектирования и устранения грубых измерений (выбросов) при обработке данных, незначительными различиями в параметрах алгоритмов и другими факторами.

Поскольку точные значения координат орбит и временных поправок НКА остаются неизвестными, то для получения опорных значений прибегают к так называемой процедуре комбинирования [4–5], состоящей в совместной

¹ Спутниковые системы Galileo и Beidou здесь не рассматриваются.

² Международная служба вращения Земли и опорных систем отсчёта.

обработке данных, полученных различными Центрами. Обработка данных по эфемеридам выполняется по специальному алгоритму, состоящему из нескольких шагов. На первом шаге определяются параметры трансформаций Гельмерта, целью которых является приведение эфемерид НКА ГНСС, полученных различными Центрами, к единой орбитальной системе. На втором шаге на основе статистического подхода определяются весовые коэффициенты Центров и каждого из НКА. На третьем заключительном шаге определяются средневзвешенные значения эфемерид всех НКА, которые декларируются как опорные. Соответствующей процедуре подвергаются временные поправки каждой из спутниковых группировок, целью которой является приведение шкал времени различных Центров к единой системной шкале, определяемой по данным навигационных сообщений. Именно таким образом, начиная с 1993 г., Международный Центр IGS формирует ЭВИ для спутников GPS по результатам расчётов девяти (на 2019 г.) Центров. Аналогичная процедура в рамках программы IGLOS-PP (*International GLONASS Service Pilot Project*) применяется Центром NOAA/NGS³ [6] с 2004 г. до настоящего момента для получения ЭВИ НКА ГЛОНАСС. При этом используются результаты расчётов восьми Центров. Файлы с ЭВИ формируются в оперативном, срочном и апостериорном режимах и выкладываются в виде готовых продуктов на ftp-серверах соответствующих Центров (см. таблицу 1).

Таблица 1
Формирование ЭВИ КА GPS и ГЛОНАСС в Центрах IGS и NOAA/NGS

Центр	IGS(США)	NOAA/NGS(США)
Группировка НКА	GPS	ГЛОНАСС
Метод получения ЭВИ	Комбинирование (эфемериды и поправки часов)	Комбинирование (только эфемериды)
Количество участвующих Центров	9	8
Файлы оперативной ЭВИ в формате SP3 (Ultra rapid)	IGUwwwwd_00.SP3* IGUwwwwd_06.SP3 IGUwwwwd_12.SP3 IGUwwwwd_18.SP3	IGVwwwwd_00.SP3 IGVwwwwd_06.SP3 IGVwwwwd_12.SP3 IGVwwwwd_18.SP3
Оперативность Периодичность	Реальное время 6 часов	Реальное время 6 часов

³ Национальная геодезическая служба США.

Продолжение таблицы 1

Центр	IGS(США)	NOAA/NGS(США)
Файлы срочной ЭВИ в формате SP3 (Rapid)	IGRwwwwd.SP3	—
Задержка	1–2 суток	
Периодичность	1 сутки	
Файлы апостериорной ЭВИ в формате SP3	IGSwwwwd.SP3	IGLwwwwd.SP3
Задержка	2 недели	2–3 недели
Периодичность	1 сутки	1 сутки

* Здесь «www» и «d» обозначают порядковый номер и день недели GPS соответственно.

Следует заметить, что на территории РФ имеются по крайней мере два Центра — ИАЦ и СВОЭВП, осуществляющих оценивание ЭВИ НКА ГНСС (см. таблицу 2). В то же время ни один из них не формирует опорные значения ЭВИ, которые могли бы иметь статус официальных.

Таблица 2

Формирование ЭВИ НКА ГНСС в Центрах ИАЦ КВНО и СВОЭВП

Центр	ИАЦ (РФ)	СВОЭВП (РФ)
Группировка НКА	ГНСС	ГНСС
Метод получения ЭВИ	Оценивание	Оценивание
Файлы оперативной ЭВИ в формате SP3	Stark_1D_yymmddhh.SP3	PMKyymmdd.SPU ^{**}
Оперативность	Реальное время	Реальное время
Периодичность	6 часов	1 сутки
Файлы срочной ЭВИ в формате SP3 (Rapid)	Stawwwwd.SP3	PMKyymmdd.SPR
Задержка	1–2 суток	1–2 суток
Периодичность	1 сутки	1 сутки
Файлы апостериорной ЭВИ в формате SP3.	Stawwwwd.SP3	PMKyymmdd.SP3
Задержка	~5 суток	2 недели
Периодичность	1 сутки	1 сутки

^{**} Здесь «уу», «mm», «dd» и «hh» обозначают соответственно две последние цифры года, месяц, день месяца и часовой сдвиг (00/06/12/18).

Одна из целей проведения работ в данной области — создание в России, а именно в Главном метрологическом центре Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) ФГУП «ВНИИФТРИ», системы метрологического контроля над ЭВИ НКА ГЛОНАСС, аналогичной IGS и NOAA/NGS (США). Предпосылкой служит тот факт, что ГМЦ ГСВЧ, являясь организацией Росстандарта, по своему статусу может явиться высшим звеном в системе обеспечения единства измерений в области ЭВИ в соответствии с целями, установленными в ГОСТ Р 8.000-2015 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Основные положения».

Основная сложность при создании в РФ системы метрологического контроля, основанной на технологии комбинирования, как это осуществлено в IGS и NOAA/NGS (США), заключается в том, что в РФ отсутствует достаточное количество Центров, результаты которых после надлежащей обработки могли бы использоваться для получения опорных значений эфемерид и временных поправок НКА ГЛОНАСС. Поэтому получение альтернативной ЭВИ НКА ГЛОНАСС ещё одним Центром, а именно ГМЦ ГСВЧ, может создать реальные предпосылки для формирования (также в ГМЦ ГСВЧ) статистически обоснованного решения.

1. Определение орбит и временных поправок НКА ГЛОНАСС и GPS в ГМЦ ГСВЧ

В настоящей статье представлены основные результаты по разработке программно-аппаратного комплекса формирования альтернативной ЭВИ НКА ГНСС в оперативном режиме, достигнутые к настоящему времени в ГМЦ ГСВЧ. Отметим, что прикладное программное обеспечение по формированию ЭВИ НКА ГНСС в срочном и апостериорном режимах было разработано в ГМЦ ГСВЧ ранее [7, 8].

Программно-аппаратный комплекс (ПАК) расчёта в оперативном режиме эфемерид и временных поправок НКА ГНСС формирует файлы данных с периодичностью 4 раза в сутки (с интервалом 6 часов) в соответствии с устоявшейся международной практикой. В настоящее время ПАК работает в режиме тестирования, целью которого является совершенствование программного обеспечения, улучшение точностных характеристик вычисляемых эфемерид НКА и повышение оперативности получения конечного результата. Последнее предполагает доработку ряда существующих алгоритмов обработки с целью их распараллеливания и достижения максимальной эффективности при использовании многопроцессорных вычислительных систем.

Исходными данными для расчётов являются данные часовых RINEX-файлов в форматах d/n/g, содержащих результаты измерений на двух несущих

щих частотах кодовых и фазовых псевдодальностей входящими в глобальную сеть IGS станциями слежения за спутниками ГНСС. Требование по оперативности предполагает использование именно часовых RINEX-файлов, которые поступают в международные базы данных с периодом в 1 час и с задержкой ~4 часа. Это существенно отличает их от суточных RINEX-файлов, которые становятся доступными для использования только спустя сутки и более (по отношению к моменту времени, к которому относятся последние данные в этих файлах).

Общее количество станций, данные от которых используются в расчётах, варьируется от 450 до 700. В течение одних суток ПАК формирует 4 файла в формате SP3, каждый из которых содержит данные по орбитам и временным поправкам спутников ГНСС за двое суток по аналогии с оперативными (ultra-rapid) орбитами, формируемыми зарубежными Центрами IGS (США) и NOAA/NGS (см. [6]). Первая половина каждого такого файла содержит ЭВИ НКА GPS и ГЛОНАСС, полученную по результатам обработки данных измерений, — «оценённая часть». Вторая половина файла содержит ЭВИ, полученную на основе прогнозирования — «спрогнозированная» часть. В течение суток, обозначаемых как «*wwwd*», где «*www*» и «*d*» — неделя и день GPS соответственно, создаются следующие файлы, перечисляемые в порядке их формирования: VNU*wwwd*_00.SP3, VNU*wwwd*_06.SP3, VNU*wwwd*_12.SP3 и VNU*wwwd*_18.SP3. Аббревиатура «VNU» происходит от «VNIIFTRI» и «Ultra-rapid». Через подчёркивание указан сдвиг в часах от начала предыдущих суток до того момента времени, начиная с которого в файле приведены оценённые значения орбит и временных поправок. Например, первый из вышеперечисленных файлов VNU*wwwd*_00.SP3 содержит оценённые значения орбит и поправок часов спутников, начиная с 00:00 до 23:59 часов предыдущих суток («*wwwd*» — 1), и спрогнозированные значения этих величин — с 00:00 до 23:59 часов текущих суток, что схематично представлено на рис. 1а.

Часовые RINEX d/g/n-файлы скачиваются с ftp-серверов международных баз данных (МБД):

1. Информационно-аналитический Центр СОД ЦНИИмаш КВНО ГЛОНАСС (ИАЦ), РФ;
2. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS), США;
3. Европейский центр определения орбит (CODE), г. Берн, Швейцария.

Как было сказано выше, часовые RINEX-файлы поступают на серверы МБД примерно с 4-часовой задержкой, откуда они скачиваются в автоматическом режиме в базу данных ГМЦ ГСВЧ. Запуск программы вычисления орбит и временных поправок НКА ГНСС происходит автоматически после проверки наличия необходимого количества скачанных файлов. Примерно через 4 часа вычислений создаётся файл с оперативной ЭВИ НКА ГНСС. На рисунке 1б показана временная диаграмма формирования

файла VNUwwwwd_00.SP3. В таблице 3 приведено расписание выпуска каждого из четырёх типов файлов, а также временные интервалы, к которым относятся содержащиеся в этих файлах данные.

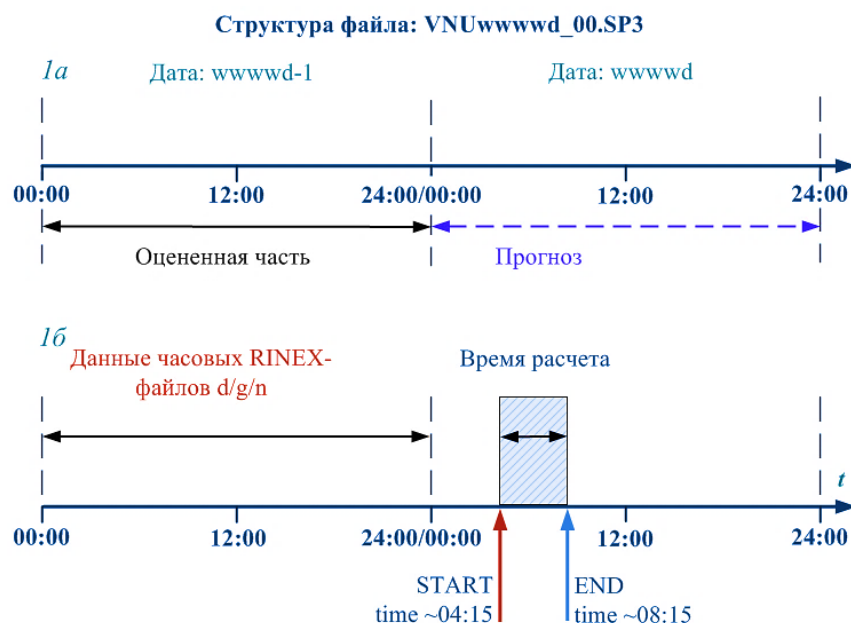


Рис. 1. Временная диаграмма формирования файла VNUwwwwd_00.SP3 в оперативном режиме

Таблица 3

Расписание формирования файлов с оперативной ЭВИ

Файл	Время выпуска	Интервалы данных	
		Оценённая часть	Прогноз
VNUwwwwd_00.SP3	~08:15	00:00(–24) – 23:59(–24)	00:00 – 23:59
VNUwwwwd_06.SP3	~14:15	06:00(–24) – 05:59	06:00 – 05:59(+24)
VNUwwwwd_12.SP3	~20:15	12:00(–24) – 11:59	12:00 – 11:59(+24)
VNUwwwwd_18.SP3	~02:15(+24)	18:00(–24) – 17:59	18:00 – 17:59(+24)

2. Анализ точности оперативной временной информации

2.1. Результаты расчётов

Для контроля точности вычисления орбит и временных поправок НКА ГНСС по разработанной в ГМЦ ГСВЧ методике были проведены тестовые расчёты за 4 последовательные даты, начиная с 30.05.2018 и заканчивая 03.06.2018. При этом для анализа были выбраны файлы оператив-

Альманах современной метрологии, 2020, № 1 (21)

ных данных, соответствующих 6-часовому сдвигу: VNU20033_06.SP3, VNU20034_06.SP3, VNU20035_06.SP3, VNU20036_06.SP3.

Оценка точности вычисленных в ГМЦ ГСВЧ эфемерид спутников GPS и ГЛОНАСС осуществлялась путём их сравнения (координат спутников) с апостериорными орбитами, полученными зарубежными Центрами IGS и NOAA/NGS. При этом оценённые и спрогнозированные значения орбит и временных поправок сравнивались отдельно.

Значения среднеквадратичных погрешностей (СКП), оценённых в оперативном режиме орбит НКА GPS, оказались не более 2 см, а орбит НКА ГЛОНАСС ~ 4–5 см. Значения СКП, спрогнозированных в оперативном режиме орбит НКА, составили ~6 и 10 см по всем спутникам каждой из систем GPS и ГЛОНАСС соответственно. При оценивании точности спрогнозированной части рассматривались интервалы длиной 14 часов от момента формирования данных до момента их обновления (см. раздел 4).

В таблице 4 приведены СКП (нс) временных поправок для различных Центров, перечисленных ниже в таблице 6, а также для оценённой части файлов оперативных данных («VNF») и прогноза («VNP»). Сравнение осуществлялось с апостериорными значениями временных поправок IGS на четырёх следующих друг за другом суточных интервалах, начиная с 06:00 30.05.2018 и заканчивая 05:59 03.06.2018. Так, например, интервал 1 начинался в 06:00 часов 30.05.2018 и заканчивался в 05:59 часов 31.05.2018.

Таблица 4
СКП (нс) поправок часов НКА GPS, оценённых различными Центрами

Центр	COD	EMX	ESA	GFZ	GRG	MIT	PMK	VNF	VNP
Интервал 1	0.692	1.095	1.406	0.353	0.165	2.246	3.771	0.294	—
Интервал 2	0.701	1.550	0.872	0.379	0.166	2.306	3.543	0.410	1.930
Интервал 3	0.636	1.294	1.157	0.376	0.167	2.255	3.897	0.467	1.854
Интервал 4	0.636	0.764	1.289	0.389	0.151	2.305	3.894	0.625	1.709

Аналогичные данные для временных поправок ГЛОНАСС приведены в таблице 5. Сравнение осуществлялось с опорными значениями (см. ниже).

Таблица 5
СКП (нс) поправок часов НКА ГЛОНАСС, оценённых различными Центрами

Центр	ESA	GRG	IAC	PMK	VNF	VNP
Интервал 1	3.418	1.524	2.544	7.381	0.675	—
Интервал 2	3.315	1.768	2.480	6.977	0.614	5.663
Интервал 3	3.491	2.072	2.231	6.946	0.609	4.405
Интервал 4	4.053	2.297	1.392	6.564	0.975	6.468

В следующей таблице 6 приведены расшифровки используемых аббревиатур Центров.

Таблица 6

Аббревиатура Центров обработки и анализа данных НКА ГНСС

№	Название	Аббревиатура
1	Международная служба Глобальной навигационной спутниковой системы, США	IGS
2	Европейский центр определения орбит, Астрономический институт, г. Берн, Швейцария	COD
3	Центр геодезических исследований, г. Потсдам, Германия	GFZ
4	Национальный центр космических исследований, Франция	GRG
5	Министерство природных ресурсов Канады	EMX
6	Европейское космическое агентство, Германия	ESA
7	Информационный аналитический центр КВНО ГЛОНАСС, ЦНИИмаш, РФ	IAC
8	Центр обработки и анализа данных NOAA/NGS, США	IGL
9	Массачусетский технологический институт, США	MIT
10	Система высокоточного определения эфемерид и временных поправок (СВОЭВП), РФ	PMK
11	Данные из навигационных сообщений	BRD
12	ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ», РФ; оценённая часть	VNF
13	ГМЦ ГСВЧ ФГУП «ВНИИФТРИ», РФ; спрогнозированная часть	VNP

2.2. Построение опорного ряда для временных поправок НКА ГЛОНАСС

Эфемериды НКА ГЛОНАСС формируются Центром NOAA/NGS путём совместной обработки данных восьми Центров по алгоритму [4, 5], и получаемое для них средневзвешенное комбинированное решение может рассматриваться как опорное. Однако содержащиеся в файле IGLwwwd.SP3 временные поправки $\delta_{IGL,k}^i$, где k, i — номера эпохи и НКА соответственно, не могут использоваться в качестве опорных значений, несмотря на то что величины $\delta_{IGL,k}^i$, как указано в заголовке файла IGLwwwd.SP3, также являются результатом комбинирования. Это следует из того факта, что после

приведения значений $\delta_{IGL,k}^i$ к системной шкале времени (ШВ) ГЛОНАСС полученные значения $\delta_{IGL,k}^{*i}$ почти не отличаются от аналогичных значений $\delta_{BRD,k}^i$, передаваемых в навигационных сообщениях НКА ГЛОНАСС:

$$\delta_{IGL,k}^{*i} \cong \delta_{BRD,k}^i; \quad i = 1, \dots, N_{Sat}, \quad (1)$$

где N_{Sat} — количество спутников. Эти равенства выполняются, как показывают расчёты, достаточно точно (в пределах $\sim 1-2$ нс), что можно видеть, например, из рис. 2 для НКА с системным номером $PRN = 08$. С другой стороны, известно, что временные поправки из навигационных сообщений НКА ГЛОНАСС ввиду недостаточной точности их определения не могут быть приняты в качестве опорных значений. Следовательно, и временные поправки IGL, ввиду (1), также не могут рассматриваться как опорные для сопоставления с ними данных других Центров. Поэтому для получения точностных характеристик временных поправок НКА ГЛОНАСС, полученных разными Центрами, необходимо построение опорного временного ряда. Такой ряд строится для каждого НКА в соответствии с описанным в [5] методом следующим образом.

Определим опорные значения $\delta_{Ref,k}^i$ для i -го НКА в эпоху k по формуле:

$$\delta_{Ref,k}^i = \frac{\left(\sum_{j=1, \dots, N} \delta_{j,k}^i \sigma_j^{-2} \right)}{\left(\sum_{j=1, \dots, N} \sigma_j^{-2} \right)}, \quad (2)$$

где j — индекс Центра; $\delta_{j,k}^i$ — временные поправки i -го НКА, оценённые j -м Центром в эпоху k ; σ_j — сигма j -го Центра:

$$\sigma_j = \left(\frac{1}{N_{Sat} K} \sum_{j=1, \dots, N_{Sat}} \sum_{k=1, \dots, K} (\delta_{j,k}^i - \bar{\delta}_k^i)^2 \right)^{1/2}; \quad (3)$$

$$\bar{\delta}_k^i = \frac{1}{N} \sum_{j=1, \dots, N} \delta_{j,k}^i. \quad (4)$$

Здесь N — количество Центров; K — число эпох.

При построении опорного временного ряда $\delta_{Ref,k}^i$ по формулам (2–4) использовались данные следующих Центров: ESA, GRG, IAC, PMK, VNF (полные названия Центров даны в таблице 6). Данные IGL и BRD в формировании опорных значений не участвовали.

На рисунке 2 представлены временные поправки для НКА ГЛОНАСС с системным номером $PRN = R08$ (выбор номера НКА случайный), оценённые различными Центрами из таблицы 6, за период с 06:00 часов 31.05.2018 до

05:59 часов 01.06.2018. На том же рисунке пунктирной линией представлены опорные данные (*REF*).

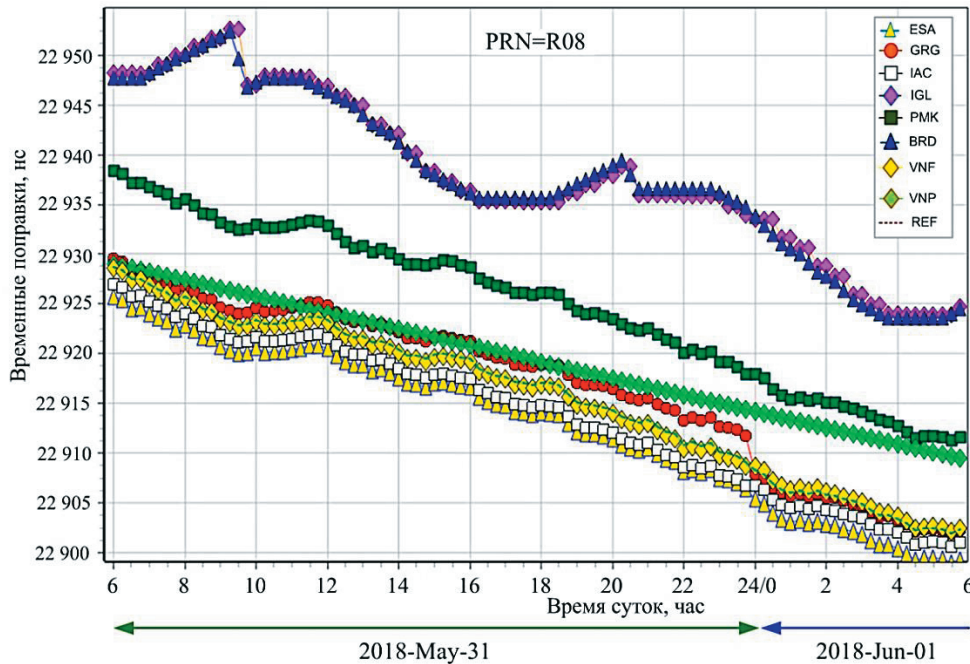


Рис. 2. Поправки часов НКА ГЛОНАСС ($PRN = R08$), полученные в ГМЦ ГСВЧ в оперативном режиме: *VNF* — оценённая часть; *VNP* — прогноз с предыдущих суток. Сравнение оценённых значений временных поправок с аналогичными апостериорными значениями других Центров

2.3. Процедура приведения временных поправок, оценённых по ШВ GPS, к системной ШВ ГЛОНАСС

Так как временные поправки $\delta_{VNF,k}^i$ ГМЦ ГСВЧ («VNF») вычислялись по шкале времени GPS, то для сравнения с результатами других центров эти значения были приведены к ШВ ГЛОНАСС.

Процедура приведения временных поправок $\delta_{j,k}^i$ j -го Центра, оценённых по ШВ GPS, к системной ШВ ГЛОНАСС состоит из двух этапов. Сначала определяются параметры смещения ΔT между двумя шкалами и их относительного дрейфа d . Затем найденные значения смещения и дрейфа вычитаются из рядов $\delta_{j,k}^i$:

$$\delta_{j,k}^{*i} = \delta_{j,k}^i - \Delta T - d\Delta t_k; \quad i=1, \dots, N_{Sat}; \quad k=1, \dots, K. \quad (5)$$

Здесь $\delta_{j,k}^{*i}$ — временные поправки j -го Центра, приведённые к системной ШВ ГЛОНАСС; $\Delta t_k = t_k - t_1$ — временной интервал между k -й и 1-й эпохами.

Значения параметров ΔT и d находятся из решения вариационной задачи по минимизации функционала:

$$\sum_{i=1, \dots, N_{Sat}} \sum_{k=1, \dots, K} |\delta_{j,k}^i - \Delta T - d \cdot \Delta t_k - \delta_{BRD,k}^i| \xrightarrow{\Delta T, d} \min. \quad (6)$$

Следует отметить, что функционал вида (6), являющийся аналогом L_1 -нормы, более устойчив к выбросам во временных рядах $\delta_{BRD,k}^i$ по сравнению с функционалом, представляющим среднеквадратичное отклонение. Тем не менее наличие грубых значений во временных рядах $\delta_{BRD,k}^i$ может отрицательно повлиять на точность оцениваемых параметров. Скачки в несколько десятков нс и более время от времени случаются во временных поправках из данных навигационных сообщений. Так, например, для НКА ГЛОНАСС с номером 18 на интервале с 17:45 ч до 18:15 ч 3.05.2018 произошёл скачок величиной 245 мкс. Скачок в 640 мкс произошёл для НКА GPS с номером 26 на интервале 23:30–23:59 ч 3.06.2018.

Чтобы устранить грубые выбросы из временных рядов $\delta_{BRD,k}^i$ данных навигационных сообщений, применяется следующая процедура, состоящая из двух шагов. На первом шаге при каждом фиксированном индексе i из ряда $\delta_{BRD,k}^i$ вычитается составляющая дрейфа:

$$\bar{\delta}_{BRD,k}^i = \delta_{BRD,k}^i - \bar{d}_{BRD}^i \cdot (t_k - t_1); k = 1, \dots, K, \quad (7)$$

где $\bar{d}_{BRD}^i$ — среднее значение дрейфа, вычисленное по значениям $d_{BRD,k}^i$ дрейфа в моменты t_k из файла навигационных сообщений. После устранения дрейфа временные ряды $\bar{\delta}_{BRD,k}^i$ для каждого индекса i могут быть представлены в виде суммы

$$\bar{\delta}_{BRD,k}^i = z^i + \xi_k^i; k = 1, \dots, K \quad (8)$$

с неизвестной величиной z^i , не зависящей от k , и величиной ξ_k^i , которая может рассматриваться как случайная центрированная величина. В этом случае для детектирования во временных рядах (8) выбросов может быть применён алгоритм из [9], что и осуществляется на втором шаге процедуры. Далее, при отыскании параметров ΔT и d , минимизирующих функционал (6), все найденные выбросы предварительно удаляются из рядов $\delta_{BRD,k}^i$.

2.4. Устранение межсуточных скачков в рядах временных поправок Центров

В рядах временных поправок, оценённых некоторыми Центрами, возможны межсуточные скачки, вызванные, по-видимому, софтверными проблемами. Так, например, межсуточные скачки в рядах $\delta_{ESA,k}^i$, полученных в Европейском космическом агентстве, могут достигать нескольких десятков нс

(см. рис. 3). Наличие таких скачков неизбежно приводит к межсуточным скачкам в опорных значениях и, как следствие, к необъективным точностным оценкам данных каждого из Центров. Из-за возможных межсуточных скачков в рядах $\delta_{j,k}^i$ описанная в разделе 2.3 процедура приведения временных поправок к системной ШВ ГЛОНАСС должна применяться только на суточных временных интервалах от 0:00 до 23:59 часов.

В свою очередь, приведение временных поправок j -го Центра к системной ШВ позволяет устранить межсуточные скачки в их значениях. Чтобы устранить скачки в рядах $\delta_{ESA,k}^i$, описанная выше процедура приведения к системной ШВ ГЛОНАСС была применена к временным поправкам ESA на каждом суточном интервале от 0:00 ч до 23:59 ч. Результаты по оцениванию СКП после устранения межсуточных скачков в данных ESA приведены в таблице 5.

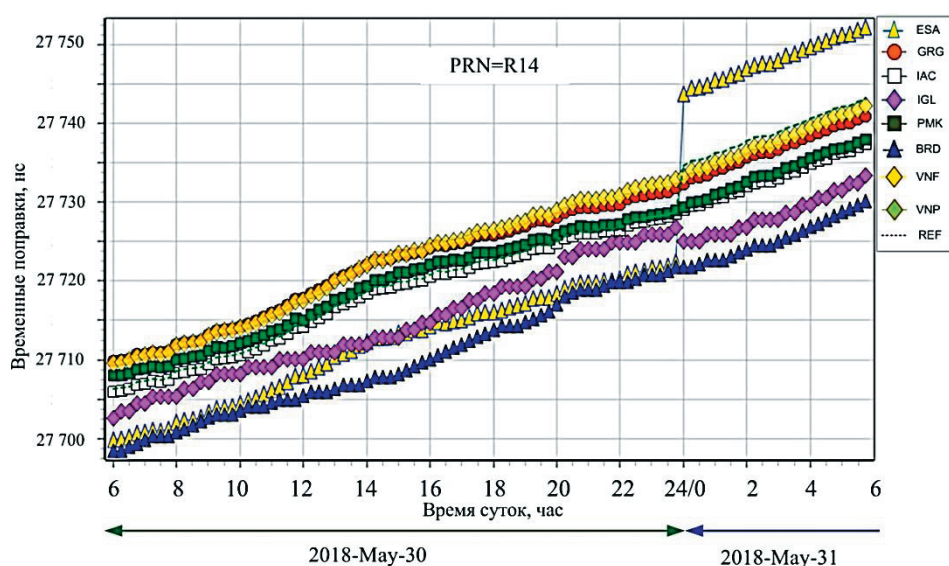


Рис. 3. Временные поправки НКА ГЛОНАСС ($PRN = R14$), полученные в ГМЦ ГСВЧ в оперативном режиме, и апостериорные значения временных поправок других Центров.

Значения временных поправок «ESA» приведены до приведения их к системной ШВ ГЛОНАСС. Межсуточный скачок в данных «ESA» составляет ~ 23 нс

3. Анализ точности оперативной эфемеридной информации

В данном разделе приводятся оценки точности в определении спрогнозированных эфемерид НКА GPS и ГЛОНАСС. На рисунках 4–6 показаны отклонения спрогнозированных эфемерид НКА ГЛОНАСС от апостериорных эфемерид IGL на временном интервале от 9.09.2019 18:00 до 10.09.2019 17:59 вдоль радиуса (рис. 4), вдоль траектории (рис. 5) и в направлении, перпендикулярном плоскости орбиты (рис. 6).

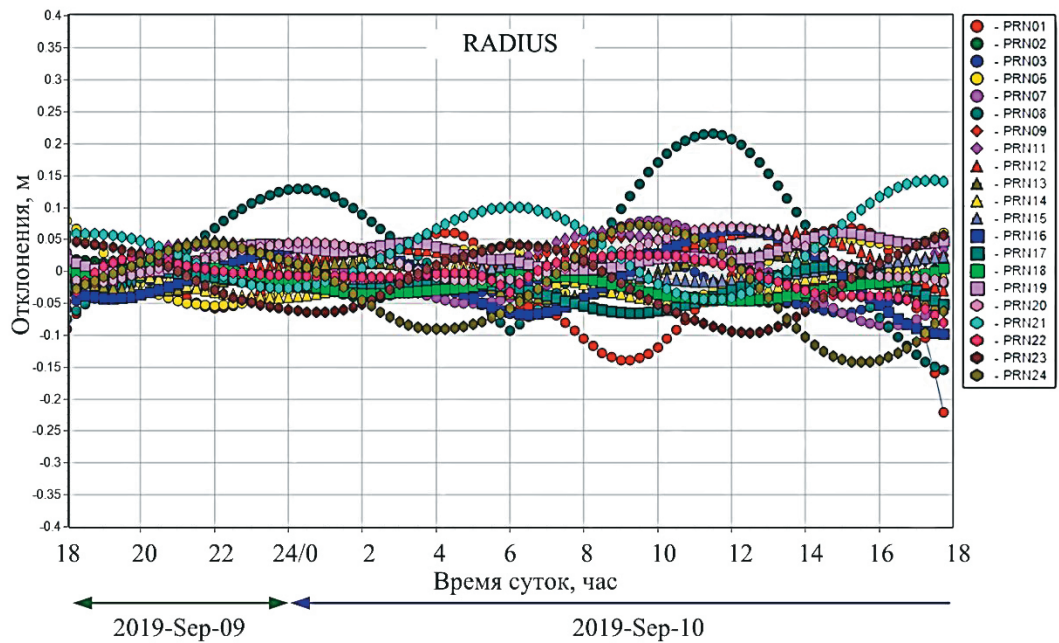


Рис. 4. Отклонения спрогнозированных эфемерид НКА ГЛОНАСС от апостериорных эфемерид IGL на временном интервале от 9.09.2019 18:00 до 10.09.2019 17:59 вдоль радиуса

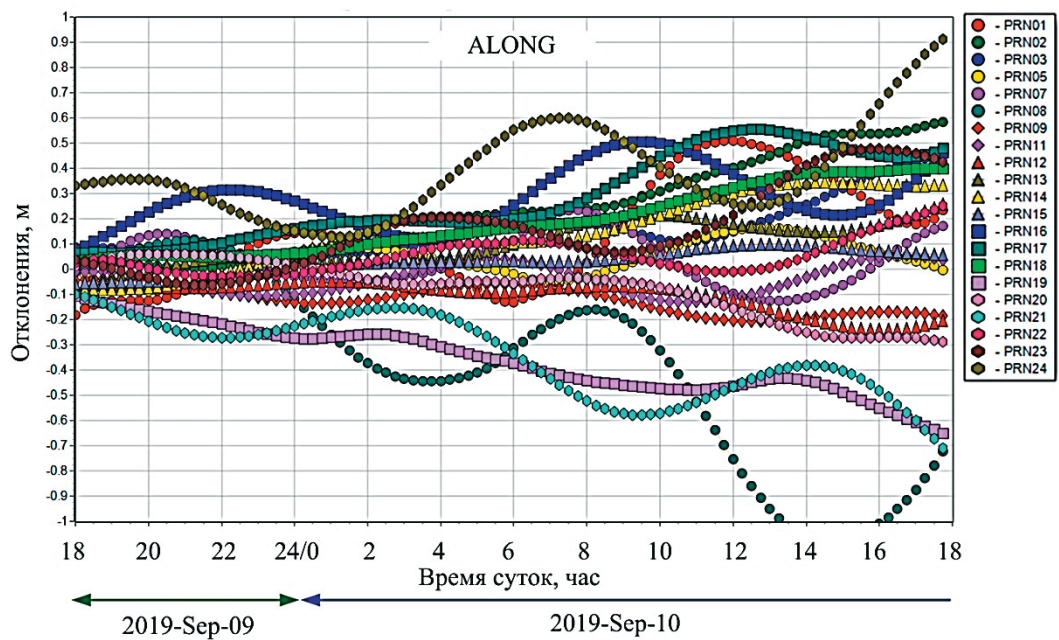


Рис. 5. Отклонения спрогнозированных эфемерид НКА ГЛОНАСС от апостериорных эфемерид IGL на временном интервале от 9.09.2019 18:00 до 10.09.2019 17:59 вдоль траектории

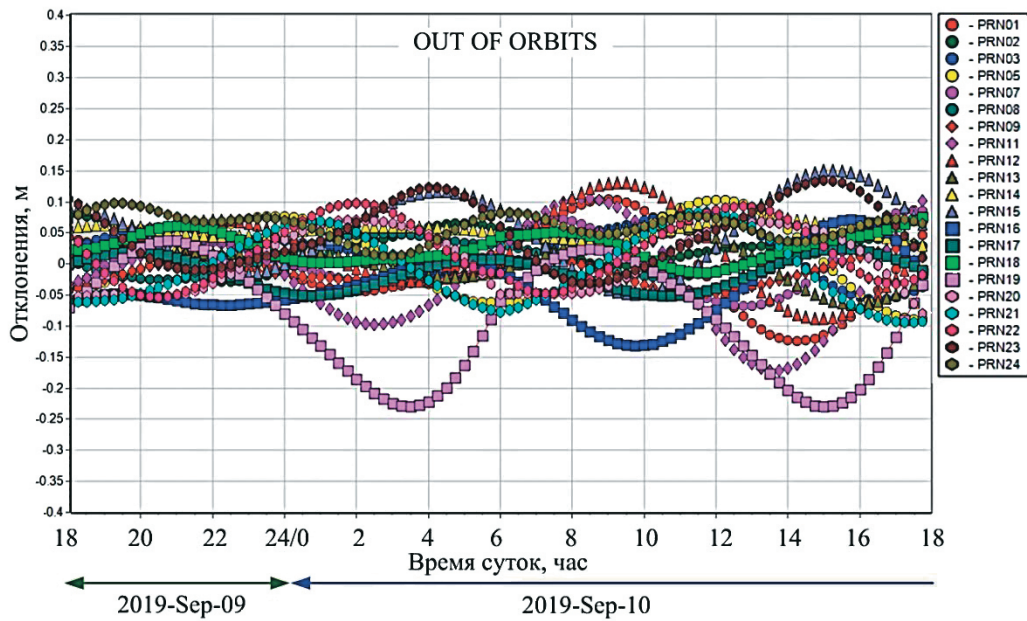


Рис. 6. Отклонения спрогнозированных эфемерид НКА ГЛОНАСС от апостериорных эфемерид IGL на временном интервале от 9.09.2019 18:00 до 10.09.2019 17:59 в направлении, перпендикулярном плоскости орбиты

Получим оценки точности спрогнозированных эфемерид. Для простоты дальнейших рассуждений примем момент времени, соответствующий началу прогноза, за 0. Пусть $СКП(\tau)$ — среднеквадратичная погрешность эфемерид, вычисленная на интервале $[0, \tau]$. Погрешность $СКП_{\max}(t)$ эфемерид на отрезке $[0, t]$ определим как максимальное значение $СКП(\tau)$ на этом отрезке и обозначим $СКП_{\max}(t)$:

$$СКП_{\max}(t) = \max_{0 < \tau \leq t} СКП(\tau). \quad (9)$$

Таким образом, для определения погрешности спрогнозированных эфемерид необходимо знать: длину t интервала прогнозирования и зависимость $СКП(\tau)$.

Получим оценку длины интервала прогнозирования. Рассмотрим файл VNUwwwd_00.SP3. Левая граница интервала, к которому относятся спрогнозированные данные в этом файле, начинается в 0:00 часов суток «wwwd». Формально правая граница интервала прогнозирования соответствует моменту времени 23:59. Однако спрогнозированные данные этого файла могут использоваться до тех пор, пока не выйдет обновлённый файл VNUwwwd_06.SP3. Этот момент времени обозначим t_{pred} (отсчёт от начала прогноза). С момента времени $t = t_{pred}$ данные файла VNUwwwd_00.SP3 теряют свою актуальность, поскольку могут быть использованы более точные обновлённые данные файла VNUwwwd_06.SP3.

Величина t_{pred} складывается из трёх слагаемых (см. рис. 7):

$$t_{pred} = t_{wait} + t_{calc} + t_{period}, \quad (10)$$

где t_{wait} — время ожидания поступления необходимых данных измерений на серверы МБД; t_{calc} — время вычислений; t_{period} — период выдачи результатов (= 6 часов).



Рис. 7. Интервалы использования спрогнозированных данных

Спрогнозированная часть файла VNUwwwwd_00.SP3 доступна для использования потребителем сразу после окончания вычислений, т.е. ~ в 8:00. С этого момента времени до момента выпуска через $t_{period} = 6$ часов очередного файла VNUwwwwd_06.SP3 с оперативными данными потребителем используются данные файла VNUwwwwd_00.SP3. Из приведённых выше оценок величин $t_{wait} \sim 4$ ч и $t_{calc} \sim 4$ ч следует, что $t_{pred} \sim 14$ часов.

Чтобы определить погрешность прогнозирования эфемерид, определяемую как $СКП_{\max}(t_{pred})$, найдём численно зависимости $СКП(t)$ каждой из спутниковых систем в зависимости от длины t интервала прогноза за конкретный период: от 9.09.2019 18:00 до 10.09.2019 17:59.

На рисунке 8 представлены значения $СКП(t)$ для GPS и ГЛОНАСС.

Как видно из рис. 8, максимум $СКП(t)$ на интервале $[0, t_{pred}] = [0, 14]$ для GPS и ГЛОНАСС достигается в одной и той же точке $t = t_{pred} = 14$, при этом $СКП_{GPS, \max} = 0,06$ м, $СКП_{ГЛОНАСС, \max} = 0,1$ м.

Работы по увеличению точности спрогнозированных эфемерид могут, таким образом, осуществляться в нескольких направлениях:

1. уменьшение погрешности расчёта эфемерид в оценённой их части;
2. уменьшение значения параметра t_{pred} за счёт уменьшения времени t_{calc} расчёта (см. (10)), что предполагает дальнейшее совершенствование алгоритмов обработки, в том числе связанных с распараллеливанием.

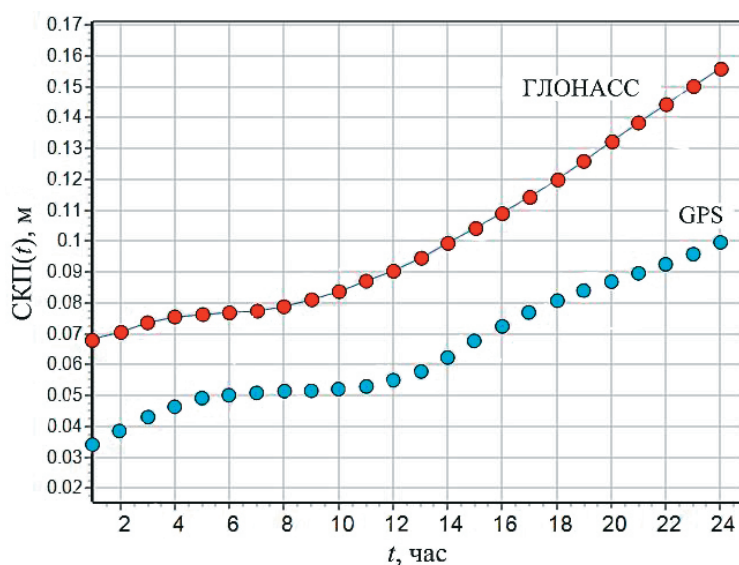


Рис. 8. Зависимость СКП(t) каждой из спутниковых систем от длины интервала прогноза

Заключение

Разработан ПАК для получения ЭВИ КА ГНСС в оперативном режиме. Значения СКП оценённых в оперативном режиме орбит НКА GPS оказались не более 2 см, орбит КА ГЛОНАСС ~ 4–5 см. Значения СКП спрогнозированных в оперативном режиме орбит НКА составили ~ 6 и ~10 см по всем спутникам систем GPS и ГЛОНАСС соответственно. Эти и другие результаты проведённых тестовых расчётов отражены в следующей таблице 7.

Таблица 7

Установленные СКП определения параметров

Параметры	Оперативный режим	
	Оценённая часть, СКП	Прогноз, СКП
Эфемериды НКА GPS, м	~ 0,017	~0,06
Эфемериды НКА ГЛОНАСС, м	~0,045	~0,1
Временные поправки GPS, нс	~1,0	~3,0
Временные поправки ГЛОНАСС, нс	~1,0	~5,0

При вычислениях использовались программные модули Бернского ППО обработки ГНСС-измерений версии 5.2 (BERNESE Software, Version 5.2), некоторые из которых были адаптированы к распараллеливанию, бернское ядро обработки BPE (*Bernese Processing Engine*), методы BPE, позволяющие

Альманах современной метрологии, 2020, № 1 (21)

также вести обработку на многопроцессорных вычислительных системах в параллельном режиме. Ряд новых разработанных программ и скриптов был имплементирован в ВРЕ. При написании программ и скриптов использовались языки программирования FORTRAN-90, Delphi XE7, Perl 6.0.

Литература

1. Перов А.И., Харисов В.Н. ГЛОНАСС: принципы построения и функционирования. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010.
2. Сайт Международной службы GNSS [Электронный ресурс]. URL: <http://www.igs.org/network> (Дата обращения: 09.07.2019).
3. Сайт Международной службы IERS [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/Conventions/conventions.html> (Дата обращения: 09.07.2019).
4. Beutler G., Kouba J., Springer T. Combining the orbits of the IGS Analysis Centers // *Bulletin Geodesique*. 1995. 69. P. 200–222.
5. Kouba J., Mireault Y., Lahaye F. 1995, 1994 IGS Orbit/Clock Combination and Evaluation, Appendix I of the Analysis Coordinator Report, International GPS Service for Geodynamics (IGS). 1994 Annual Report. P. 70–94.
6. Сайт Национальной геодезической службы (NGS) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ngs.noaa.gov/> (Дата обращения: 09.07.2019).
7. Безменов И.В., Пасынок С.Л. Формирование опорных значений координат и поправок часов КА ГЛОНАСС // *Альманах современной метрологии*. 2015. № 2. С. 143–158.
8. Безменов И.В., Пасынок С.Л. Определение эфемеридно-временной информации космических аппаратов ГНСС в срочном режиме по данным измерений // *Альманах современной метрологии*. 2017. № 11, С. 104–120.
9. Безменов И.В., Наумов А.В., Пасынок С.Л. Эффективный алгоритм устранения выбросов из данных измерений глобальных навигационных спутниковых систем // *Измерительная техника*. 2018. № 9. С. 26–30.