

*А.А. Аржанников; В.Д. Глотов, канд. техн. наук; И.В. Котов;
А.Н. Кузенков, канд. техн. наук (АО «ЦНИИмаш», г. Королёв)*

ОЦЕНКА БАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И КАРТ ИОНОСФЕРЫ СИСТЕМ *SBAS*

Представляются результаты исследования зарубежных систем широкозонных функциональных дополнений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), именуемых *SBAS* (*Space Based Augmentation System* – системы функционального дополнения космического базирования). Приводятся предварительные оценки характеристик восьми региональных *SBAS*-систем, полученные в результате обработки предоставленных ими данных в суточном интервале с использованием программного обеспечения (ПО) Информационно-аналитического центра (ИАЦ) координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО) АО «ЦНИИмаш». Указывается, что передаваемые *SBAS*-системами региональные карты ионосферы обладают точностью, сопоставимой с глобальными картами ионосферы ИАЦ КВНО и других центров анализа. Отмечается, что в целом исследованные параметры *SBAS*-систем (геометрический фактор, количество видимых космических аппаратов (КА), уровень доступности) находятся в пределах допустимых значений.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, глобальная навигационная спутниковая система, функциональное дополнение ГНСС, система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), *SBAS*, *Satellite Based Augmentation System*, ионосфера, карты ионосферы, полное электронное содержание (ПЭС), эфемеридно-временная информация (ЭВИ), частотно-временные поправки, расчёт орбит космических аппаратов, *SISNET*.

A.A. Arzhannikov, V.D. Glotov, I.V. Kotov, A.N. Kuzenkov. Assessment of Basic Characteristics and Ionosphere Maps for SBAS Systems. The objective of this work is to evaluate the characteristics of foreign wide-area augmentation systems for global navigation satellite systems (GNSS), known as SBAS (Space-Based Augmentation Systems). Preliminary results of the characteristics assessment for eight foreign regional SBAS systems obtained using the software of the Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing (IAC PNT) JSC «TsNIIMash». The conducted work confirms that the regional ionospheric maps transmitted by SBAS systems have accuracy comparable to the global ionospheric maps of IAC PNT and other analysis centers. Overall, the studied parameters of SBAS systems are within acceptable range of values.

Key words: GLONASS, GNSS, GNSS augmentation, SDCM, SBAS, ionosphere, ionosphere maps, total electron content, TEC, ephemeris, clock offsets, orbit determination, SISNET.

Во всём мире применяются системы *SBAS*, которые обеспечивают повышение точности и надёжности ГНСС для различных пользователей. На территории Российской Федерации функционирует система

дифференциальной коррекции и мониторинга¹⁾, разрабатываемая специалистами АО «Российские космические системы» [1] и являющаяся функциональным дополнением к ГНСС. Зарубежные *SBAS*-системы включают в себя *WAAS* (США); *EGNOS* (Евросоюз), *BDSBAS* (Китай); *GAGAN* (Индия); *MSAS* (Япония); *SouthPAN* (Австралия); *ANGA* (Африка); *KAAS* (Южная Корея); *UKSBAS* (Великобритания). Их исследование проводится в ИАЦ КВНО с целью сравнительного анализа и независимого подтверждения технических характеристик, что помогает разрабатывать рекомендации по улучшению отечественной системы. В работе [2] были представлены результаты исследования СДКМ. В продолжение этой работы приведём оценку характеристик восьми зарубежных *SBAS*-систем, кратко представленную²⁾ 27 мая 2024 г. на XXXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам [3].

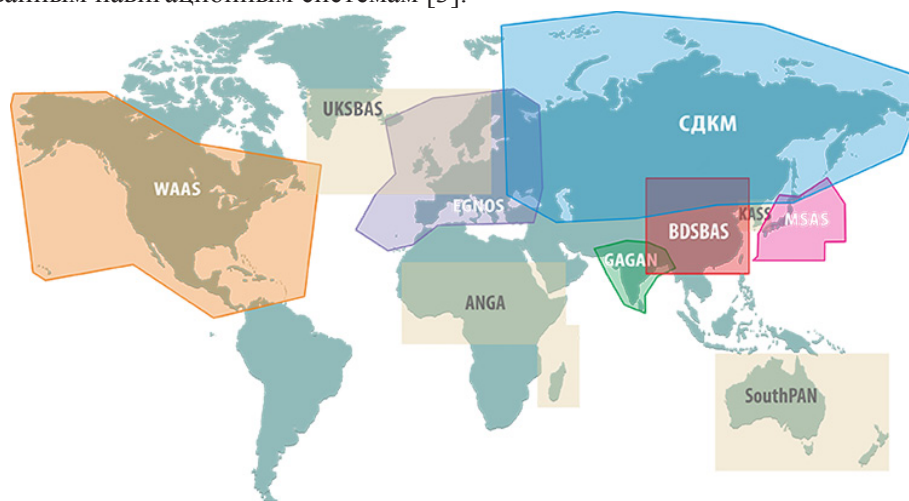


Рис. 1. Зоны покрытия *SBAS*-систем на карте мира

На рис. 1 показана карта зон покрытия существующих *SBAS*-систем, при этом данные для обработки в ИАЦ были доступны по всем упомянутым зарубежным системам, кроме *KAAS*. У каждой системы своя зона покрытия, однако существуют территории, которые охватываются одновременно несколькими системами.

Все *SBAS*-системы имеют собственную инфраструктуру, тем не менее они работают по схожим принципам. В состав *SBAS*-систем обычно входят наземный и космический сегменты. Наземный сегмент *SBAS* включает в себя сеть станций сбора измерений, систему передачи данных, центр управления и станции закладки информации для космического сегмента, который, как правило, состоит из нескольких геостационарных спутников, ретранслирующих целевую информацию потребителям.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СООБЩЕНИЙ *SBAS*

Для повышения точности и обеспечения целостности, под которой понимается соответствие содержания и последовательности навигационных сообщений ГНСС требованиям Интерфейсного контрольного документа,

¹⁾ Сайт СДКМ, контроль точности *SBAS*. <https://www.sdc.ru/> (дата обращения 01.09.2024 г.).

²⁾ <https://glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4162> (дата обращения 01.09.2024 г.).

в кадре SBAS-систем передаётся корректирующая информация в виде поправок к бортовой ЭВИ ГНСС, информация о целостности навигационных сигналов ГНСС (с временем предупреждения о сбоях в ГНСС в пределах 6 с) и цифровая карта ионосферных задержек. Доставка сообщений пользователям SBAS осуществляется в режиме реального времени через космический сегмент при помощи геостационарных КА, а также через наземные средства по сети Интернет с применением технологии SISNET [4] (*Signal-in-Space through Internet*). В качестве исходных данных в работе использовался архив¹⁾ SISNET сообщений SBAS-систем, размещённый на общедоступном FTP-сервере французского Национального центра космических исследований (*Centre National d'Études Spatiales (CNES)*).

Рассматриваемые системы имеют региональные различия, но принципы хранения и передачи целевой информации во многом схожи и соответствуют эксплуатационному стандарту SBAS [5]. Это позволило адаптировать существующий программный комплекс [2], расширив его функционал не только для анализа СДКМ, но и для оценки зарубежных систем. По итогам работы [2] было установлено, что суточного интервала достаточно для оценки базовых характеристик, в ходе представляемых исследований анализ также проводился в суточном интервале 15.12.2023.

Модернизированное ПО, разработанное в ИАЦ КВНО, позволяет выполнять такие задачи, как:

- обработка исходных массивов данных в формате SISNET с контролем корректности форматов данных и полноты сообщений; создание файлов ЭВИ с учётом корректирующей информации SBAS в формате SP3 [6] и региональных карт вертикальных ионосферных задержек SBAS в формате IONEX [7];
- расчёт пространственных карт распределения количества видимых КА, а также геометрического фактора (*DOP – dilution of precision*) применительно к рассматриваемым SBAS-системам. В ходе расчёта учитываются только КА с достоверной корректирующей информацией SBAS, прошедшей контроль корректности форматов данных и полноты сообщений, что позволяет оценить фактический уровень доступности SBAS для потребителей;
- оценка точности региональных карт ионосферных задержек SBAS путём сравнения с глобальными картами ионосферы²⁾ согласно расчётам ИАЦ КВНО и зарубежных центров анализа, а также с моделью Клобучара из кадра GPS.

С помощью созданного ПО в ИАЦ КВНО были обработаны массивы сообщений зарубежных SBAS-систем в апостериорном режиме и созданы файлы ЭВИ с учётом поправок SBAS-систем в формате SP3, а также разработаны региональные ионосферные карты полного электронного содержания (*TEC – Total Electron Content*) в формате IONEX.

На основе полученных файлов в стандартных форматах в рамках представляемого исследования в выбранном суточном интервале был произведён расчёт пространственных карт распределения количества видимых космических аппаратов и геометрического фактора (пространственный *PDOP*, в горизонтальной плоскости *HDOP*). Также было проведено попарное сравнение региональных ионосферных карт SBAS с глобальными картами ионосферы согласно расчётам ИАЦ КВНО³⁾ [8] и четырёх зарубежных цен-

¹⁾ Архив SBAS сообщений, FTP-сервер CNES. ftp://serenad-public.cnes.fr/Niveau0/SERENAD0/FROM_NTMFV2/MSG/ (дата обращения 01.09.2024 г.).

²⁾ Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО. <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения 01.09.2024 г.).

³⁾ <https://glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4023> (дата обращения 01.09.2024 г.).

тров анализа международной службы *IGS* (*International GNSS Service*). Для наглядности представлено сравнение с упрощённой моделью Клобушара из кадра *GPS*. Поскольку зоны покрытия *SBAS*-систем различны, для оценки ионосферы были выбраны общие зоны: от 40 до 50 *град* с.ш. применительно к семи *SBAS*-системам и от 40 до 50 *град* ю.ш. отдельно для *SouthPAN* (Австралия).

ОЦЕНКА БАЗОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

На момент исследования для всех зарубежных *SBAS*-систем дополняемой ГНСС является *GPS*. Для СДКМ основной дополняемой системой служит ГЛОНАСС (24 КА), а сопутствующей – *GPS*. Однако в связи с ограничениями стандарта *SBAS* [5, 9] на передачу информации максимум для 51 КА в кадре СДКМ присутствует корректирующая информация лишь для 27 КА *GPS* из общего состава этой группировки в 32 спутника.

По итогам расчёта общее число дополняемых КА составило от 30 до 32 в различных *SBAS*-системах. При этом одновременно в кадре *SBAS* содержится корректирующая информация лишь для тех КА, которые находятся в зоне видимости сети станций сбора измерений *SBAS*. Таким образом, данные в полученных файлах *SP3* имеют разрывы в те временные промежутки, когда КА *GPS* находятся вне территориальной зоны видимости *SBAS*. Среднее одномоментное число КА в кадре *SBAS* составило от 14 до 21.

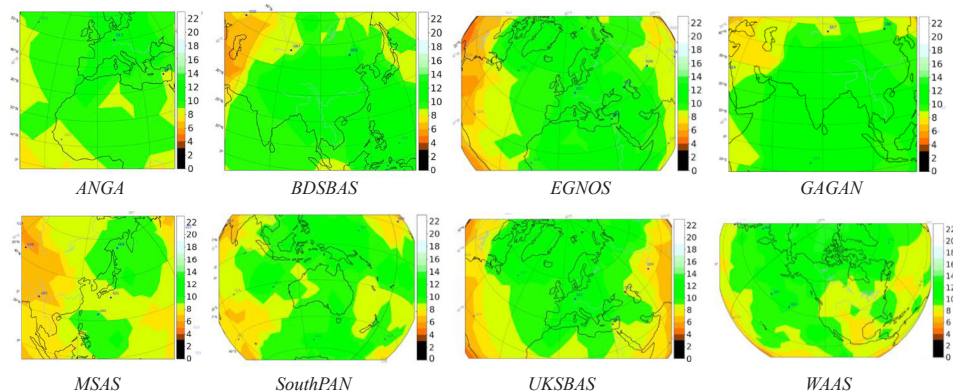


Рис. 2. Количество видимых КА, дополняемых *SBAS* (11:00 UTC 15.12.2023)

На рис. 2 представлены карты распределения наблюдаемых КА, дополняемых *SBAS*, в одном масштабе. Расчёт проводился применительно к каждой пространственной точке, при этом исключались КА с углом места менее 5 *град* и КА с флагом «не использовать» (в том случае, когда дифференциальная пользовательская погрешность измерения дальности *UDRE* более 13 [9]), а усреднённое по пространству значение наблюдаемых КА составило от 8,7 до 10,5.

На основании созданных файлов ЭВИ *SP3* были построены карты распределения геометрических факторов *PDOP* и *HDOP*. Примеры полученных пространственных карт распределения *PDOP* КА *GPS*, дополняемых *SBAS*-системами, представлены на рис. 3 в одном масштабе на 11:00 UTC 15 декабря 2023 г. При расчёте исключались КА с углом места менее 5 *град* и КА с флагом непригодности. Усреднённые суточные значения *PDOP* составили от 1,6 до 1,8, значения *HDOP* – от 0,8 до 1,0.

Результаты расчётов представлены в табл. 1. Для сравнения добавлены аналогичные показатели по СДКМ на основе исследования¹⁾ [2].

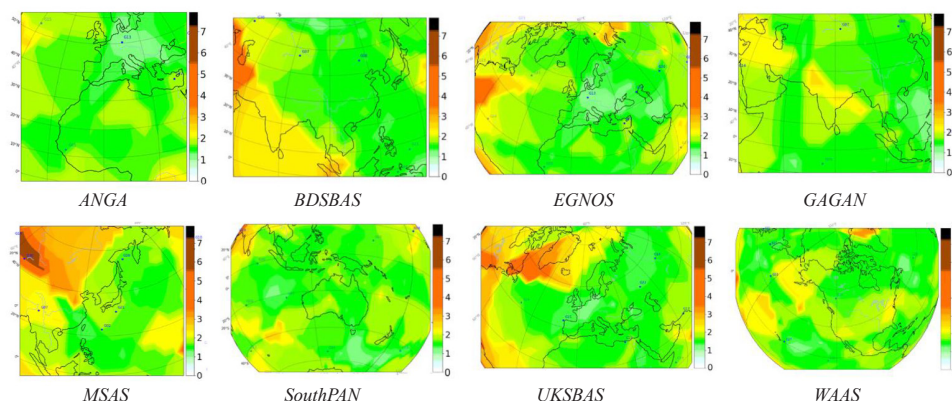


Рис. 3. Карты распределения *PDOP* (11:00 UTC 15.12.2023)

Т а б л и ц а 1

Базовые характеристики *SBAS* систем (15.12.2023)

Система	<i>PDOP</i>	<i>HDOP</i>	Всего КА в кадре <i>SBAS</i>	Среднее количество КА в кадре <i>SBAS</i>	Среднее количество видимых КА <i>SBAS</i>	Уровень доступности, %
<i>ANGA</i>	1,80	0,95	30	14	8,7	100
<i>BDSBAS</i>	1,60	0,88	32	16	10,0	100
<i>EGNOS</i>	1,57	0,84	31	17	10,5	100
<i>GAGAN</i>	1,58	0,83	31	17	10,2	100
<i>MSAS</i>	1,73	0,94	31	13	9,4	100
<i>SouthPAN</i>	1,62	0,85	31	20	10,0	100
<i>UKSBAS</i>	1,70	0,94	31	15	9,7	100
<i>WAAS</i>	1,65	0,88	31	21	9,9	100
СДКМ*	1,21	0,62	51	28	16,9	100

П р и м е ч а н и е: *по результатам исследования [2]

По итогам расчётов уровень доступности *SBAS*-систем при условии, что *PDOP* менее 6 и угол места КА более 5 град, составил 100% у всех систем в выбранном суточном интервале.

ОЦЕНКА ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ *SBAS*

Ионосферная задержка псевдодальности ГНСС прямо пропорциональна электронному содержанию вдоль всего пути сигнала (количеству свободных электронов) и обратно пропорциональна квадрату частоты сигнала в первом приближении. Карты вертикальных ионосферных задержек хранятся в

¹⁾ <https://glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4104> (дата обращения 01.09.2024 г.).

формате *IONEX* [7] и измеряются в единицах TEC_u (*TEC unit*, 1 ед. $TEC_u = 10^{16}$ электронов/ m^2 , что соответствует задержке в 16 см при частоте $L1$ и 26 см применительно к $L2$). Для наглядности в дальнейшем ионосферные задержки и их оценки будут переведены в метры сигнала $L1$.

Степень влияния ионосферы на точность местоопределения не является стабильной величиной, поскольку активность ионосферы непосредственно зависит от ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца, а также от геомагнитного поля Земли. Существует зависимость свойств ионосферы и её влияния на точность координатного решения от положения, времени, суточного и годовых циклов Земли, а также 11-летнего солнечного цикла Швабе – Вольфа. Стоит отметить, что на 2024 – 2025 гг. приходится пик текущего 11-летнего цикла Солнца. Для наглядности на рис. 4 представлен график усреднённой по поверхности Земли суточной ионосферной вертикальной задержки ПЭС в метрах применительно к сигналу $L1$ по расчётам ИАЦ КВНО за последние 29 лет. Значение такой задержки на 15.12.2023 составило 4,3 м.

Вертикальную ионосферную задержку можно пересчитать в наклонную, затем с учётом положения космических аппаратов – в пространственные карты распределения ионосферной ошибки одночастотного потребителя, при условии, что потребитель не использует модели ионосферы. Для наглядности на рис. 5 представлен график суточных усреднённых значений ошибок местоопределения за счёт влияния ионосферы по поверхности Земли и на территории России для одночастотных потребителей ГЛОНАСС при неучёте ионосферы с 01.01.2022 по 01.12.2024.

Для оценки точности региональных ионосферных карт *SBAS* был выбран суточный интервал 15.12.2023, при котором значение средней ионосферной доли в ошибке местоопределения по КА системы ГЛОНАСС составило 4,8 м глобально и 1,9 м на территории России. На территории России эта доля меньше ввиду высокой активности ионосферы на экваториальных широтах, а также соотношения *PDOP* ГЛОНАСС (глобальный ~2,0, по России ~1,8).

В ИАЦ КВНО ежедневно производится формирование файлов региональных карт ионосферы *SBAS* в формате *IONEX* с шагом 5 град по долготе и по широте, 1 ч по времени. На рис. 6 в качестве примера представлены ионосферные карты рассматриваемых *SBAS*-систем на 11:00 UTC 15.12.2023.

Для оценки точности региональные карты *SBAS* сравнивались с условно эталонными глобальными ионосферными картами из открытых источников. В ИАЦ КВНО производится расчёт в апостериорном режиме собственных глобальных карт ионосферы¹⁾, которые открыто публикуются²⁾ в файлах формата *IONEX* с 2018 г. Основой для уточнения параметров ионосферы служат общедоступные измерения глобально распределённой сети беззапросных измерительных станций Международной службы анализа *IGS*. При сравнении были задействованы глобальные карты ионосферы (*Global Ionosphere Map (GIM)*) четырёх центров анализа *IGS*: *CODE* (Европейский центр определения орбит); *ESOC* (Европейский центр управления космическими полётами); *JPL* (Лаборатория реактивного движения Национального

¹⁾ Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО. <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения 01.09.2024 г.).

²⁾ Архив глобальных карт ионосферы на FTP-сервере ИАЦ КВНО. <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/> (дата обращения 01.09.2024 г.).

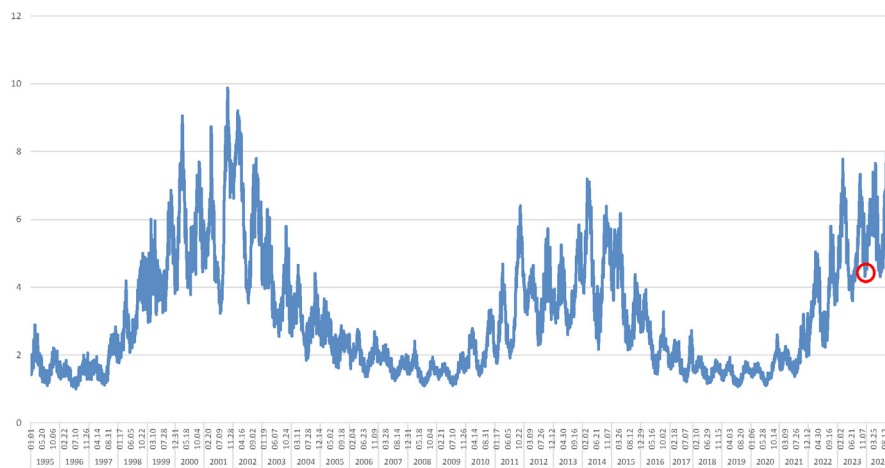


Рис. 4. Вертикальная среднесуточная ионосферная задержка в метрах сигнала L1 (январь 1995 г. – декабрь 2024 г.)

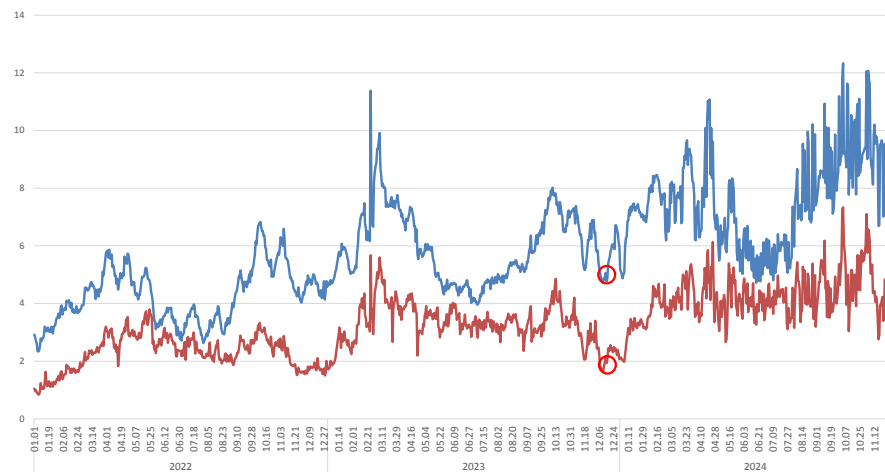


Рис. 5. Среднесуточная ошибка в метрах местоопределения одночастотных потребителей ГЛОНАСС за счёт воздействия ионосферы (при неучёте ионосферных моделей) (январь 2022 г. – декабрь 2024 г.):
— — глобально; — — на территории России

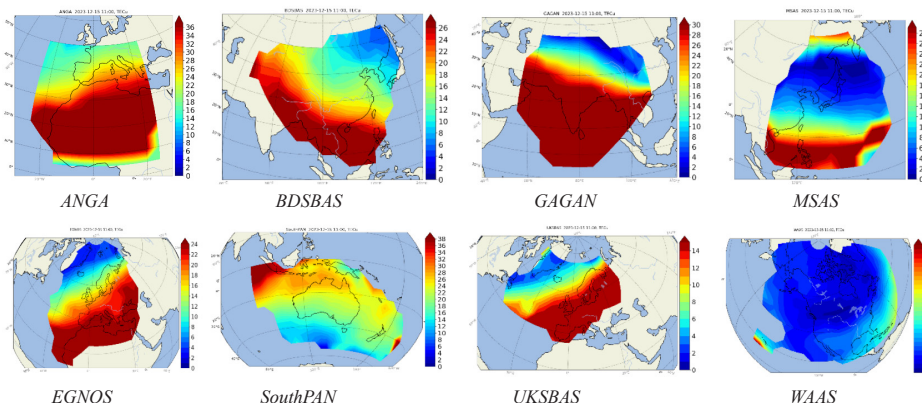


Рис. 6. Региональные карты ионосферы SBAS-систем (TEC_u 11:00 UTC 15.12.2023)

управления по авиации и исследованию космического пространства (НАСА)); *WHU* (Уханьский университет). Также приведены результаты сопоставления с упрощённой моделью Клобучара из навигационного кадра *GPS* (*KLOB*). Сравнение проводилось при общих для всех карт широтах от 40 до 50 град с.ш. применительно к семи *SBAS*-системам и от 40 до 50 град ю.ш. применительно к *SouthPAN*.

В табл. 2 представлены итоги сравнения в метрах 7 региональных карт *SBAS* в Северном полушарии, 5 глобальных карт и модели ионосферы из кадра *GPS*.

Т а б л и ц а 2

Попарные среднеквадратичные отклонения (СКО) (в метрах) карт ионосферы *SBAS* и глобальных карт ионосферы от 40 до 50 град с.ш. (15.12.2023, при сигнале *L1*)

Карта		<i>GIM</i>					<i>SBAS</i>							<i>GPS</i>
		<i>CORG</i>	<i>EHRG</i>	ИАЦ КВНО	<i>JPRG</i>	<i>WHRG</i>	<i>ANGA</i>	<i>BDSBAS</i>	<i>EGNOS</i>	<i>GAGAN</i>	<i>MSAS</i>	<i>UKSBAS</i>	<i>WAAS</i>	<i>KLOB</i>
<i>GIM</i>	<i>CORG</i>	—	0,27	0,31	0,35	0,25	0,42	0,47	0,32	0,79	0,56	0,61	0,44	1,07
	<i>EHRG</i>	0,27	—	0,26	0,29	0,28	0,36	0,37	0,28	0,64	0,50	0,56	0,34	1,12
	ИАЦ КВНО	0,31	0,26	—	0,31	0,33	0,35	0,35	0,24	0,45	0,51	0,57	0,34	1,15
	<i>JPRG</i>	0,35	0,29	0,31	—	0,31	0,39	0,34	0,27	0,51	0,50	0,61	0,35	1,14
	<i>WHRG</i>	0,25	0,28	0,33	0,31	—	0,44	0,39	0,34	0,63	0,57	0,66	0,45	1,12
<i>SBAS</i>	<i>ANGA</i>	0,42	0,36	0,35	0,39	0,44	—	—	0,31	—	—	0,58	—	1,23
	<i>BDSBAS</i>	0,47	0,37	0,35	0,34	0,39	—	—	—	0,59	0,43	—	—	1,27
	<i>EGNOS</i>	0,32	0,28	0,24	0,27	0,34	0,31	—	—	—	—	0,53	0,64	1,15
	<i>GAGAN</i>	0,79	0,64	0,45	0,51	0,63	—	0,59	—	—	0,90	—	—	1,44
	<i>MSAS</i>	0,56	0,50	0,51	0,50	0,57	—	0,43	—	0,90	—	—	—	1,40
	<i>UKSBAS</i>	0,61	0,56	0,57	0,61	0,66	0,58	—	0,53	—	—	—	0,39	1,27
	<i>WAAS</i>	0,44	0,34	0,34	0,35	0,45	—	—	0,64	—	—	0,39	—	1,07
<i>GPS</i>	<i>KLOB</i>	1,07	1,12	1,15	1,14	1,12	1,23	1,27	1,15	1,44	1,40	1,27	1,07	—

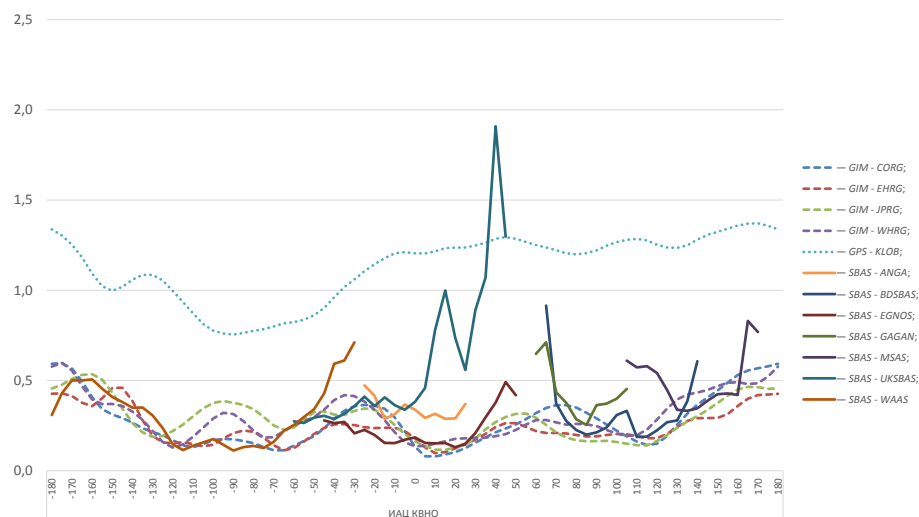


Рис. 7. Среднеквадратичное отклонение (в метрах) карт ионосферы *SBAS* и глобальных карт ионосферы от 40 до 50 град с.ш. по сравнению с картой ИАЦ КВНО в зависимости от долготы (15.12.2023 при сигнале *L1*)

На рис. 7 представлены результаты сравнения карт *SBAS* в Северном полушарии относительно глобальной карты ионосферы ИАЦ КВНО, но расчёт проведён отдельно при каждом значении долготы с шагом в 5 град. Сплош-

ными линиями обозначены *SBAS*-системы, пунктирными – карты центров *IGS*, точечной линией обозначена модель из кадра *GPS*. График свидетельствует о том, что, как правило, точность ионосферных карт *SBAS* ухудшается по мере приближения к границам зоны покрытия, это особенно заметно у системы *UKSBAS*.

В табл. 3 приведены результаты попарного сравнения ионосферных карт в Южном полушарии с участием австралийской *SBAS*-системы *SouthPAN*.

Т а б л и ц а 3

Попарные СКО (в метрах) карт ионосферы *SBAS SouthPAN* и глобальных карт ионосферы от 40 до 50 град ю.ш. (15.12.2023 при сигнале *L1*)

Наименования системы		<i>GIM</i>					<i>SBAS</i>	<i>GPS</i>
		<i>CORG</i>	<i>EHRG</i>	ИАЦ КВНО	<i>JPRG</i>	<i>WHRG</i>	<i>SouthPAN</i>	<i>KLOB</i>
<i>GIM</i>	<i>CORG</i>	–	0,32	0,57	0,46	0,36	0,64	0,86
	<i>EHRG</i>	0,32	–	0,58	0,53	0,44	0,61	0,89
	ИАЦ КВНО	0,57	0,58	–	0,59	0,59	0,71	1,05
	<i>JPRG</i>	0,46	0,53	0,59	–	0,46	0,56	0,99
	<i>WHRG</i>	0,36	0,44	0,59	0,46	–	0,70	0,99
<i>SBAS</i>	<i>SouthPAN</i>	0,64	0,61	0,71	0,56	0,70	–	0,81
<i>GPS</i>	<i>KLOB</i>	0,86	0,89	1,05	0,99	0,99	0,81	0,00

Как уже отмечалось *SBAS*-системы имеют разные зоны покрытия. На рассматриваемых широтах СКО глобальных карт ионосферы составило в среднем 0,3 м в Северном полушарии и 0,49 м в Южном; СКО семи *SBAS*-систем в среднем 0,45 м (от 0,24 м до 0,8 м), *SouthPAN* – около 0,6 м в Южном полушарии. Для сравнения: СКО ионосферной модели Клубучара из кадра *GPS* составило в среднем чуть более 1 м. Стоит отметить, что цена младшего разряда вертикальной ионосферной задержки в кадре *SBAS* – 0,125 м.

Уже было отмечено, что фактическая среднесуточная вертикальная задержка составила 4,3 м в выбранную дату. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что абсолютная точность глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО и других центров *IGS*, а также региональных карт *SBAS*-систем находится на дециметровом уровне, а относительная погрешность, как правило, не превышает 10%. Но при этом стоит учитывать, что влияние ионосферной ошибки на точность координатного решения нелинейно, зависит от местоположения, времени и других факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ИАЦ КВНО разработано ПО, позволяющее обрабатывать поток измерений отечественной системы СДКМ. После модернизации область применения была расширена на зарубежные *SBAS*-системы. С использованием общедоступного архива сообщений в формате *SISNET* в ИАЦ КВНО формируются скорректированные файлы ЭВИ *SBAS* в формате *SP3* и региональные ионосферные карты в формате *IONEX* применительно к восьми действующим зарубежным системам *SBAS*.

В выбранном суточном интервале 15.12.2023 была проведена оценка базовых характеристик 8 из 10 существующих SBAS-систем, а также оценка точности ионосферы методом попарного сравнения с глобальными картами ионосферы ИАЦ КВНО и других центров анализа IGS.

В ходе представляемого исследования установлено, что помимо локальных натурных испытаний SBAS-систем с использованием приёмников, принимающих их сигналы, существует альтернативный подход, когда оценка характеристик SBAS-систем производится по всей зоне покрытия с применением данных архива сообщений в формате SISNET и эталонных карт ионосферы, а также эталонной ЭВИ при необходимости.

Проведённая работа позволяет утверждать, что параметры исследуемых SBAS-систем находятся в пределах допустимых значений (количество дополняемых КА, геометрический фактор, уровень доступности). Точность ионосферы, оцениваемой SBAS-системами, сопоставима с точностью глобальных карт ионосферы, составленными ИАЦ КВНО и другими центрами анализа IGS, и превосходит оперативную модель Клобучара из навигационного кадра GPS. В дальнейшем в ИАЦ КВНО планируется расширение исследования SBAS-систем и других существующих функциональных дополнений ГНСС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаев Ю.В., Бабурин А.А., Сербин Д.А. и др. Повышение целостности ГНСС за счёт совместного использования СДКМ с другими системами SBAS. – Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2023, т. 10, № 4, с. 56 – 66.
2. Аржанников А.А., Глотов В.Д., Котов И.В. Принципы работы и оценка некоторых характеристик функционального дополнения ГЛОНАСС. – Космонавтика и ракетостроение, 2023, вып. 4(133), с. 67 – 79.
3. Котов И.В., Аржанников А.А., Глотов В.Д. Оценка некоторых характеристик различных систем функциональных дополнений ГНСС. – В тез. докл. XXXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб : АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2024.
4. Toran F., Ventura-Traveset J. SISNET User Interface Document. ESA document, Ref. E-RD-SYS-E31-010.
5. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System. Wide Area Augmentation System Airborne Equipment. – RTCA/DO-229C, Nov. 28, 2001.
6. The Extended Standard Product 3 Orbit Format (SP3-c). Steve Hilla, National Geodetic Survey, National Ocean Service, NOAA, Silver Spring, 2010, MD 20910-6233, USA.
7. Schaer Stefan, Gurtner Werner. IONEX. The IONosphere Map EXchange Format. Version 1.1. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 2015.
8. Аржанников А.А., Глотов В.Д., Мутрикас В.В. Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС. – Труды ИПА РАН, 2022, вып. 60, с. 3 – 11.
9. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС системы дифференциальной коррекции и мониторинга. Интерфейсный контрольный документ, ред. 2.0, 2020.

Статья поступила в редакцию 05.12. 2024 г.
Статья принята к публикации 02.07. 2025 г.