

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

ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС

Рассматривается вопрос о функциональном дополнении системы ГЛОНАСС. Приводятся первоначальные оценки некоторых характеристик системы дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), полученные в Информационно-аналитическом центре координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО). Отмечается, что разработанное в ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш» программное обеспечение (ПО) на регулярной основе преобразует поступающий поток корректирующей информации (КИ) СДКМ в файлы стандартных форматов SP3 (уточнённая эфемеридно-временная информация (ЭВИ) СДКМ) и IONEX (ионосферные карты СДКМ). Дается краткое описание способов оценки точностных характеристик СДКМ и представляются предварительные результаты исследований.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС), функциональное дополнение ГНСС, комплекс функциональных дополнений (КФД), СДКМ, SBAS (Satellite Based Augmentation System), ионосфера, карты ионосферы, полное электронное содержание (ПЭС), эфемеридно-временная информация, частотно-временные поправки, расчёт орбит космических аппаратов (КА).

A.A. Arzhannikov, V.D. Glotov, I.V. Kotov. Characteristics Estimation of the GLONASS Augmentation System. The paper is about the GLONASS augmentation system, it presents the initial estimation of the Systems for Differential Corrections and Monitoring (SDCM) characteristics, obtained in the Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing (IAC PNT). The software developed by the IAC PNT regularly converts the incoming SDCM correction messages stream into standard formatted SP3 (corrected SDCM ephemeris and clock offsets) and IONEX (SDCM ionospheric maps) files. Based on the data received on November 17, 2022 an estimation of the SDCM characteristics (dilution of precision, visible satellites number) was conducted in various modes, along with an accuracy estimation of the SDCM ionosphere maps relative to global ionospheric maps from IAC KVNO and other foreign analysis centers, as well as relative to the broadcast GPS ionosphere model. Methods for estimating the accuracy characteristics of the SDCM are briefly described and preliminary results are presented.

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

Оценка характеристик системы дифференциальной коррекции и мониторинга в Информационно-аналитическом центре координатно-временного и навигационного обеспечения проводится в соответствии с техническими заданиями Государственной корпорации «Роскосмос» в рамках работ по созданию и эксплуатации системы контроля и подтверждения

характеристик радионавигационных полей ГНСС в интересах гражданских потребителей¹⁾. Работы по оценке характеристик СДКМ проводятся в ИАЦ КВНО, в том числе, в целях независимого от разработчиков системы подтверждения заданных технических характеристик в интересах расширения состава пользователей системы, а также выдачи возможных рекомендаций разработчикам системы по её совершенствованию.

Для повышения точности и надёжности использования технологий на основе ГНСС применяются различные функциональные дополнения ГНСС, одним из которых применительно к системам ГЛОНАСС (Российская Федерация) и *GPS* (США) является СДКМ, разрабатываемая специалистами АО «Российские космические системы». Система предназначена для повышения точности и обеспечения целостности (повышения надёжности и достоверности) определения местоположения воздушных, морских, сухопутных и космических потребителей. При этом главной целевой функцией системы является обеспечение воздушных судов гражданской авиации высокоточным навигационным сервисом *SBAS*, позволяющим судам выполнять операции взлёта, полёта в зоне аэродрома, полёта по маршруту, захода и посадки в соответствии с регламентами Международной организации гражданской авиации ИКАО (*ICAO – International Civil Aviation Organization*).

Зона покрытия СДКМ – территория Российской Федерации (РФ) и часть прилегающих территорий^{2), 3)}. На данный момент действует сеть унифицированных станций сбора измерений комплекса функциональных дополнений (СДКМ-КФД), заменившая сеть СДКМ предыдущего этапа (рис. 1). В состав сети СДКМ-КФД входит 46 станций в Российской Федерации, 4 за рубежом вдоль границ РФ и 3 станции в Антарктиде. При этом доставка



Рис. 1. Сети станций СДКМ предыдущего этапа (а) и текущая сеть СДКМ-КФД (б)

корректирующей информации, информации о целостности (ИЦ) навигационных сигналов ГНСС и цифровой карты ионосферных задержек пользователям, находящимся в зоне действия СДКМ, осуществляется через космический сегмент с использованием геостационарных КА многофункциональной космической системы ретрансляции «Луч», а также через наземные средства по сети Интернет с использованием технологии *SiSNet* (*Signal-in-*

¹⁾ Система контроля и подтверждения характеристик (СКПХ) радионавигационных полей ГНСС URL: <https://www.glonass-iac.ru/skph/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

²⁾ Интерфейсный контрольный документ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС системы дифференциальной коррекции и мониторинга. Редакция 2.0, 2020.

³⁾ URL: <https://www.sdcm.ru/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

Space through Internet). В ИАЦ КВНО принимается поток корректирующей информации СДКМ с помощью технологии *SiSNet*, а также поток измерений сети станций СДКМ в формате *RTCM* [1].

У СДКМ имеется ряд аналогов, относящихся к *SBAS*-системам: *WAAS* (США), *EGNOS* (Евросоюз), *BDSBAS* (Китай), *GAGAN* (Индия), *MSAS* (Япония), *SouthPan* (Австралия), *ANGA* (Африка), *KAAS* (Южная Корея), *UKSBAS* (Великобритания). Зоны покрытия, обеспечиваемые *SBAS*-системами, схематично представлены на рис. 2.

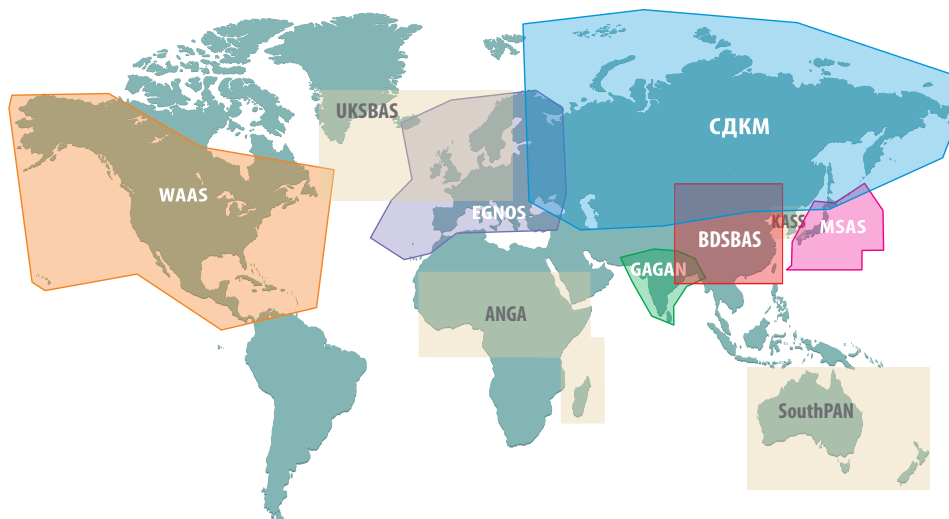


Рис. 2. Представление *SBAS*-систем на карте мира

Исследуемая СДКМ имеет собственный формат информационных сообщений, передаваемых в особом порядке. Каждое сообщение выполняет заданную роль и содержит набор предоставляемой информации. Формат сообщений, время и порядок передачи, а также иная информация описаны в интерфейсном контрольном документе (ИКД) СДКМ¹⁾.

В отношении большинства *SBAS*-систем основной обслуживаемой ГНСС является *GPS*, при этом корректирующая информация и информация о целостности в оперативных сообщениях этих систем передаются потребителям для всех КА орбитальной группировки *GPS*. Описываемая СДКМ – отечественная разработка, её существенным отличием от других *SBAS*-систем является выбор в качестве основной ГНСС системы ГЛОНАСС. При этом ввиду ограничений на общее количество КА, для которых может передаваться корректирующая информация *SBAS*^{1), 2)} [2], системой СДКМ передаются поправки для 24 КА системы ГЛОНАСС и только для 27 КА системы *GPS*.

Ключевыми параметрами, которые обеспечивают повышение точности одночастотных потребителей СДКМ, являются передаваемые в сообщениях СДКМ значения вертикальных ионосферных задержек и поправки к бортовой ЭВИ КА ГЛОНАСС и *GPS*.

¹⁾ Интерфейсный контрольный документ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС системы дифференциальной коррекции и мониторинга. Редакция 2.0, 2020.

²⁾ URL: <https://www.sdcm.ru/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПО ОЦЕНКЕ ХАРАКТЕРИСТИК СДКМ

Целью начального этапа работы по оценке характеристик СДКМ было определение некоторых базовых характеристик системы, которое позволяет получить более точное представление о системе в целом, выявить возможные проблемные места и обозначить основной вектор исследования для полноценной оценки точности СДКМ.

В результате были выполнены следующие задачи:

- создание программного обеспечения для первоначальной обработки «сырых» данных СДКМ. Формирование на основании потока сообщений системы файлов уточнённой ЭВИ СДКМ в стандартном формате *SP3* [3] и карт вертикальных ионосферных задержек СДКМ в стандартном формате *IONEX* [4];

- расчёт пространственных карт распределения количества видимых КА и геометрического фактора (*DOP – dilution of precision*) по всей зоне действия СДКМ. Указанные характеристики рассчитывались применительно только к тем КА, для которых КИ СДКМ была корректной. Данный расчёт позволяет оценить уровень доступности СДКМ для потребителей, работающих в различных режимах (ГЛОНАСС, *GPS*, ГЛОНАСС+*GPS*). Помимо этого был проведён расчёт количества видимых КА и геометрического фактора СДКМ, усреднённых по времени и по всей зоне действия СДКМ в суточном интервале;

- произведена оценка точности карты ионосферных задержек СДКМ путём её сравнения с существующими аналогами.

Под «сырыми» данными при создании ПО подразумеваются кадры сообщений, передаваемые СДКМ в потоке *SiSNet*. В частности, одной из выполненных задач была обработка и преобразование КИ из кадра СДКМ в международный формат *SP3*, хранящий в себе информацию об эфемеридах и поправках к бортовой шкале времени КА для дальнейшей оценки. Затем с использованием полученных файлов уточнённой ЭВИ СДКМ в формате *SP3* проводился расчёт пространственных карт распределения количества видимых КА и геометрического фактора (пространственный, в горизонтальной плоскости) в суточном интервале по всей зоне действия СДКМ.

С помощью созданного ПО происходит также обработка карт ионосферных задержек из кадра СДКМ и преобразование в файлы стандартного формата *IONEX*. С использованием полученных файлов *IONEX* была выполнена оценка точности представления ионосферы из кадра СДКМ. Для этого проводилось сравнение относительно глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО¹⁾ [5], четырёх глобальных ионосферных карт центров Международной службы анализа (*IGS – International GNSS Service*), а также относительно оперативной модели Клубучара из кадра *GPS*.

Следует отметить, что в ИАЦ КВНО с помощью созданного ПО преобразование сообщений СДКМ из потока *SiSNet* в файлы стандартных форматов *SP3* и *IONEX* происходит автоматически ежедневно, накоплена статистика за несколько лет.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Результаты проведённых расчётов впервые были представлены ИАЦ КВНО на Десятой Всероссийской конференции «Фундаментальное и при-

¹⁾ Ионосфера URL: <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

кладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО – 2023, г. Санкт-Петербург, 17 – 21 апреля 2023 г.) [6]. В результате выполнения первой из перечисленных задач (создание ПО для первоначальной обработки данных) в ИАЦ КВНО было получено подтверждение корректности технологии потокового формирования и передачи сообщений в режиме реального времени СДКМ. Разработанное ПО принимает на вход информационные сообщения СДКМ, состоящие из даты сообщения, его типа и битовой последовательности самого сообщения. В процессе обработки исходных данных

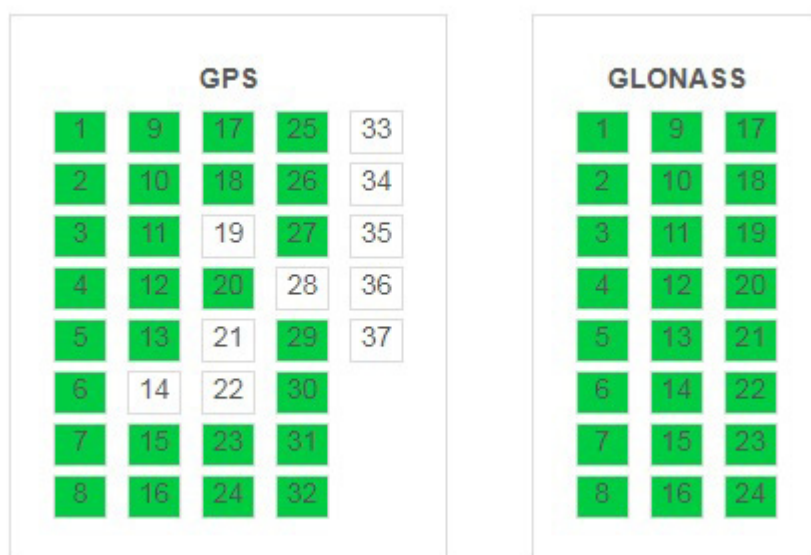


Рис. 3. Маска спутников

происходит перекодирование сообщений из битовых последовательностей в набор параметров согласно ИКД СДКМ¹). В связи с ограничениями возможности передачи информации максимум по 51 КА в сообщениях СДКМ отсутствует информация о 5 КА GPS (14, 19, 21, 22, 28), что соответствует маске спутников на сайте СДКМ²) (рис. 3).

Данное ограничение обозначено в п.7.2.1 ИКД СДКМ: «В каждом потоке ЦИ возможно передать информацию максимум по 51 спутнику (из 210 спутников, указанных в таблице)». Хотя сообщение типа 1 с перечнем спутников вмещает 210 КА, структура сообщения типа 6 с информацией о целостности вмещает лишь 51 КА (п. 7.7.1). В стандарте *SBAS DO-229* [2] в пункте А.4.4.2 указано: «The mask will have up to 51 bits set in the 210 slots. Note that the satellites for which corrections are provided must be ordered from 1 to a maximum of 51».

Оценка характеристик СДКМ в ходе представляемых исследований была проведена с использованием суточного массива данных СДКМ. Для анализа была выбрана дата 17 ноября 2022 г., в этом суточном интервале были рассчитаны карты пространственных распределений характеристик

¹) Интерфейсный контрольный документ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС системы дифференциальной коррекции и мониторинга. Редакция 2.0, 2020.

²) URL: <https://www.sdcn.ru/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

СДКМ. К бортовой ЭВИ ГЛОНАСС и *GPS* была применена КИ СДКМ согласно ИКД¹⁾, затем сформированы файлы уточнённой ЭВИ СДКМ в формате *SP3*. При этом одновременно в кадре СДКМ содержится КИ только для тех КА, которые находятся в зоне видимости сети станций СДКМ (рис. 4). Таким образом, данные в полученных файлах *SP3* имеют разрывы в те временные промежутки, когда КА находятся вне зоны действия СДКМ.

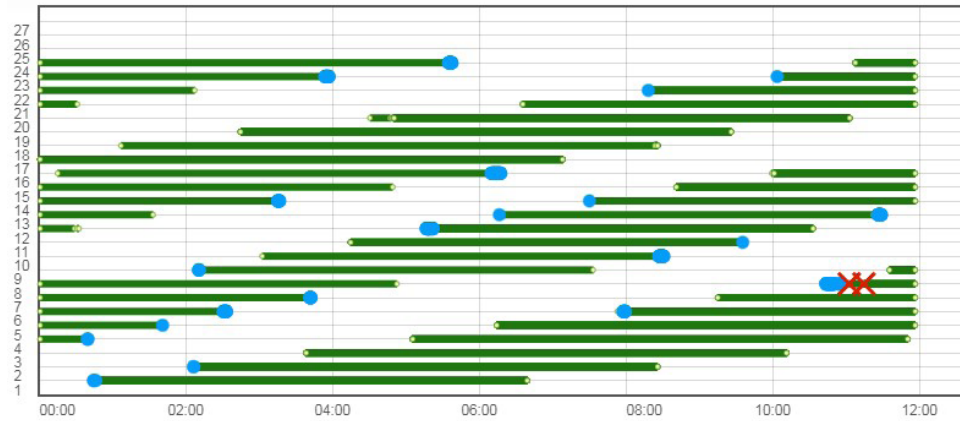


Рис. 4. Наличие КИ для КА ГЛОНАСС в кадре СДКМ²⁾

Всего в кадре СДКМ присутствует КИ для 24 дополняемых КА ГЛОНАСС, из них в среднем в выбранном суточном интервале одновременно в кадре СДКМ содержалась КИ для 13 КА в зоне видимости СДКМ. При использовании *GPS* – всего 27 дополняемых КА в кадре СДКМ, из них в среднем одновременно присутствовала КИ для 15 КА в кадре системы.

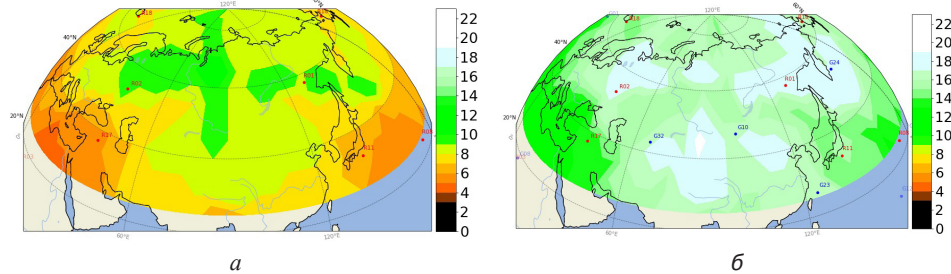


Рис. 5. Распределение количества видимых дополняемых СДКМ КА ГЛОНАСС (а) и ГЛОНАСС+*GPS* (б), 04:00 UTC 17.11.2022 г.

На основании полученных файлов *SP3* был проведён расчёт по всей зоне действия СДКМ количества видимых КА, дополняемых системой СДКМ. Расчёт выполнялся с шагом 1 град по долготе и широте, 1 ч по времени. Примеры полученных пространственных карт распределения количества видимых КА СДКМ при односистемном режиме ГЛОНАСС и двухсистемном режиме ГЛОНАСС+*GPS* представлены на рис. 5 в одном масштабе на 04:00 UTC 17 ноября 2022 г. При расчёте отбрасывались КА с углом места менее 5 град и КА с флагом «не использовать» (показатель *UDRE* более 13¹⁾).

¹⁾ Интерфейсный контрольный документ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС системы дифференциальной коррекции и мониторинга. Редакция 2.0, 2020.

²⁾ URL: <https://www.sdcм.ru/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

Усреднённое значение по времени и всей зоне действия количества видимых КА с КИ СДКМ составило 8,3 КА при использовании ГЛОНАСС, 8,5 КА – при *GPS* и соответственно 16,9 КА в случае двухсистемного режима ГЛОНАСС+*GPS*.

По аналогии в выбранном суточном интервале были построены пространственные карты распределения геометрического фактора КА с КИ СДКМ при трёх режимах: ГЛОНАСС, *GPS*, ГЛОНАСС+*GPS*. Отдельно рассчитывались значения пространственного геометрического фактора (*PDOP* – *position DOP*) и геометрического фактора в горизонтальной плоскости (*HDOP* – *horizontal DOP*). Примеры расчётов карт распределения приведены на рис. 6 и 7 в одном масштабе на один момент.

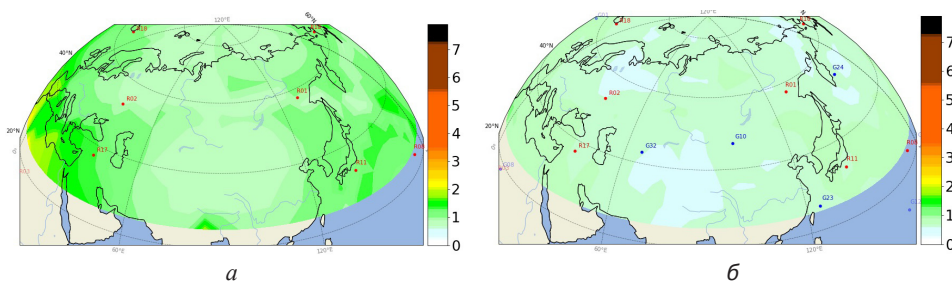


Рис. 6. Распределение геометрического фактора *HDOP* при дополняемых СДКМ КА ГЛОНАСС (а) и ГЛОНАСС+*GPS* (б), 04:00 UTC 17.11.2022 г.

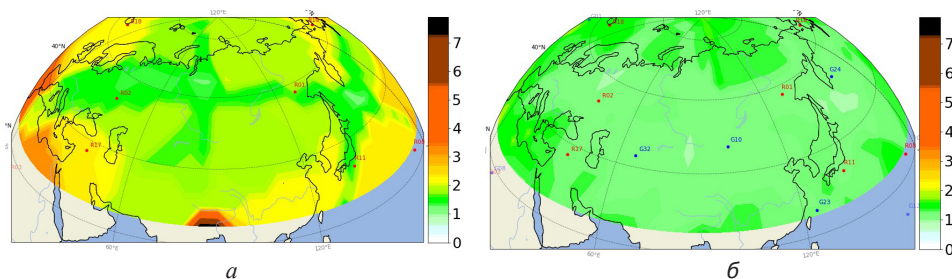


Рис. 7. Распределение *PDOP* при дополняемых СДКМ КА ГЛОНАСС (а) и ГЛОНАСС+*GPS* (б), 04:00 UTC 17.11.2022 г.

Усреднённое значение по времени и всей зоне действия *HDOP* составило 1,0 при использовании ГЛОНАСС, 1,1 – при *GPS* и 0,6 в случае двухсистемного режима ГЛОНАСС+*GPS* в выбранном суточном интервале.

Усреднённое значение по времени и всей зоне действия пространственного геометрического фактора (см. рис. 7) составило 1,9 при дополняемых СДКМ КА ГЛОНАСС, 2,1 – при *GPS* и 1,2 в случае двухсистемного режима ГЛОНАСС+*GPS* в выбранном суточном интервале.

Результаты расчётов подтвердили высокий уровень доступности навигации с использованием СДКМ (поток *SiSNet*) в режимах ГЛОНАСС и ГЛОНАСС+*GPS*. При этом, как уже было отмечено, ввиду ограничений стандарта *SBAS* (27 КА *GPS*) в односистемном режиме *GPS* уровень доступности уступает стандартному. Полученные значения характеристик на выбранную дату представлены в таблице.

Усреднённые значения некоторых характеристик СДКМ, 17.11.2022 г.

Система	<i>PDOP</i>	<i>HDOP</i>	Всего КА в кадре СДКМ	Среднее количество КА в кадре СДКМ	Среднее количество видимых КА СДКМ
ГЛОНАСС	1,9	1,0	24	13	8,3
<i>GPS</i>	2,1	1,1	27	15	8,5
ГЛОНАСС+ <i>GPS</i>	1,2	0,6	51	28	16,9

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ СДКМ

В ИАЦ КВНО на регулярной основе при обработке КИ СДКМ происходит формирование суточных файлов региональных карт ионосферы СДКМ в стандартном формате *IONEX* с фиксированным шагом *5 grad* по долготе и по широте, *1 ч* по времени в суточном интервале. Значения вертикальных ионосферных задержек пересчитываются в единицы полного электронного содержания (*TECu Total Electron Content unit*). 1 ед. *TECu* – это единица плотности электронного содержания в ионосфере, равная 10^{16} свободных электронов на один квадратный метр, что соответствует вертикальной ионосферной задержке примерно *16 см* применительно к *L1* и примерно *26 см* – применительно к *L2*. Значения вертикальной ионосферной задержки при разных частотах ГНСС различаются, поскольку задержка сигнала в ионосфере прямо пропорционально зависит от электронного содержания вдоль всего пути сигнала и обратно пропорционально зависит от квадрата частоты сигнала в первом приближении¹⁾ [5].

Для улучшения точности местопределения одночастотных потребителей оперативные модели ионосферы передаются в режиме реального времени в кадрах ГНСС и функциональных дополнений. Региональные сеточные ионосферные модели содержатся в сообщениях СДКМ и других *SBAS*-систем. В кадрах ГНСС передаются упрощённые модели: модель Клобучара (*GPS*, 8 параметров в сутки), модель *NeQuick (Galileo)*, 3 параметра в сутки), региональная модифицированная модель Клобучара (*BeiDou-2*, 8 параметров каждые два часа), модель *BDGIM (BeiDou-3)*, разложение по сферическим гармоникам, 9 параметров каждые два часа). Планируется передавать параметры адаптивной модели ионосферы в новых сигналах ГЛОНАСС с кодовым разделением (3 параметра в сутки)²⁾.

На рис. 8 представлен пример полученной карты ионосферы из кадра СДКМ на 07:00 UTC 17 ноября 2022 г.

Для оценки точности модели ионосферы в кадре СДКМ в выбранную дату было проведено попарное сравнение относительно глобальных карт ионосферы по расчётам ИАЦ КВНО¹⁾ [5] и четырёх других зарубежных центров анализа (*CODE* – Европейский центр определения орбит; *ESOC* – Европейский центр управления космическими полётами; *JPL* – Лаборатория реактивного движения Национального управления по аэронавтике и исследованию космического простран-

¹⁾ Ионосфера URL: <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения 01.07.2023 г.).

²⁾ Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал открытого доступа с кодовым разделением в диапазоне *L3*. Редакция 1.0, 2016.

ства (НАСА); *WHU* – Уханьский университет), а также относительно оперативной модели Клобучара из кадра *GPS*. При сравнении карт используется среднеквадратическая ошибка (СКО) соответствующих

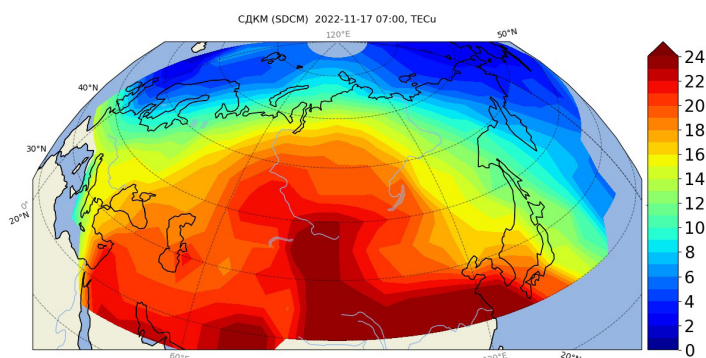


Рис. 8. Карта ионосферы СДКМ за 07:00 UTC 17.11.2022 г. в единицах *TECU*

значений из файлов *IONEX* в суточном интервале с исключением разницы средних значений карт ПЭС ионосферы [5]:

$$\begin{cases} bias_{IAC-SDCM} = \langle VTEC_{IAC} \rangle - \langle VTEC_{SDCM} \rangle; \\ STD_{IAC-SDCM} = \sqrt{\langle (VTEC_{IAC} - VTEC_{SDCM} - bias_{IAC-SDCM})^2 \rangle}, \end{cases}$$

где $VTEC_{IAC}$, $VTEC_{SDCM}$ – значения вертикальных ионосферных задержек из файлов *IONEX*; $\langle \rangle$ – оператор усреднения.

Для наглядности на рис. 9, 10 представлены соответственно распределения попарных СКО по отношению к картам ионосферы ИАЦ КВНО по долготе и по широте. Сравнение проводилось в рамках зоны действия СДКМ. Как видно из графиков, точность ионосферы СДКМ по всей зоне обслуживания в выбранном суточном интервале сравнима с точностью глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО и других центров анализа *IGS* и существенно лучше оперативной модели Клобучара из кадра *GPS*.

Установлено, что СКО ионосферной карты СДКМ относительно карты ИАЦ КВНО составила 0,37 м применительно к $L1$ (2,3 ед. *TECU*). Взаимные СКО карт ИАЦ КВНО и четырёх центров анализа *IGS* – от 0,35 до 0,5 м при $L1$ (от 2,2 до 3,1 ед. *TECU*) по всей зоне обслуживания СДКМ. Для сравнения, СКО ионосферной модели Клобучара из кадра *GPS* составила ~1,44 м при $L1$ (9 ед. *TECU*).

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СДКМ

В целом для итоговой системной оценки точностных характеристик СДКМ необходимы масштабные натурные испытания с многомесячным временным интервалом в разные времена года и расширенной территорией по всей зоне действия системы. Испытания следует проводить с использованием различных типов навигационной аппаратуры потребителей (НАП) и различных режимов (односистемные, мультисистемные) для воздушных, морских и сухопутных потребителей. При этом помимо точностных характеристик (в горизонтальной плоскости, по высоте, пространственные оценки точности) необходимо фиксировать уровень доступности навигации с использованием СДКМ, а также процент отбракованных измерений.

Но помимо масштабных испытаний существуют и другие способы оценки точностных характеристик системы косвенным образом в некоторых режимах. Также есть возможность рассчитать ошибку потребителей СДКМ за счёт космического сегмента без проведения испытаний. Для этого можно провести сравнение уточненной ЭВИ СДКМ и ионосферных задержек

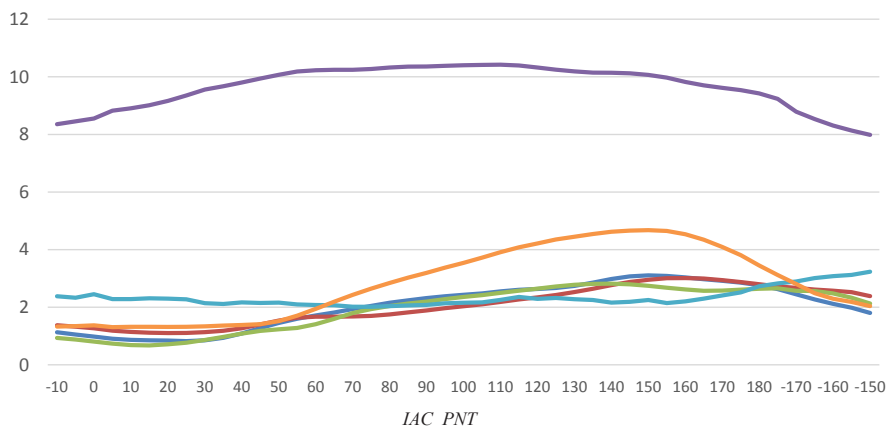


Рис. 9. Среднеквадратическая ошибка карт ионосферы СДКМ, 4 зарубежных центров анализа и модели из кадра *GPS* относительно карты ионосферы ИАЦ КВНО по долготе, 17.11.2022 г., в единицах *TECu*:

— *CODE*; — *ESOC*; — *JPL*; — *KLOB*; — *SDCM*; — *WHU*

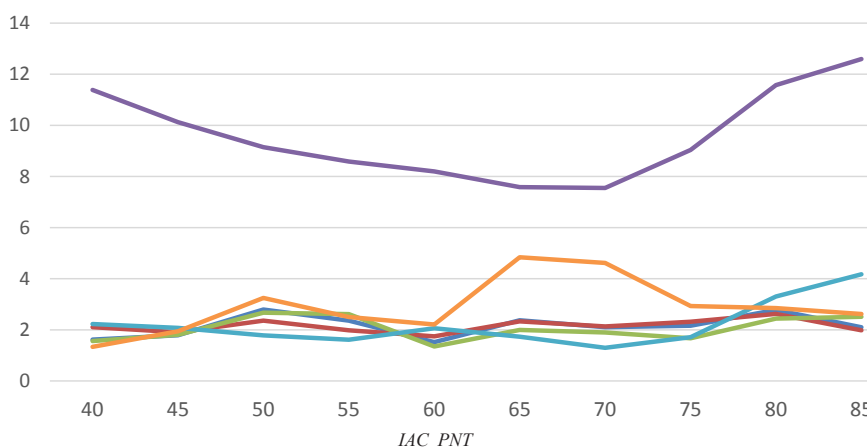


Рис. 10. Среднеквадратическая ошибка карт ионосферы СДКМ, 4 зарубежных центров анализа и модели из кадра *GPS* относительно карты ионосферы ИАЦ КВНО по широте, 17.11.2022 г., в единицах *TECu* (обозначения те же, что на рис. 9)

с эталонной высокоточной ЭВИ и апостериорно рассчитанными картами ионосферы, а результат сравнения пересчитать из ошибок псевдодальности в ошибки местоопределения.

В опубликованном докладе¹⁾ [7] рассмотрены некоторые способы оценки точности СДКМ косвенным образом. В ИАЦ КВНО был проведён эксперимент при участии 300 станций *IGS* в 8-суточном интервале в январе

¹⁾ URL: <https://glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4046> (дата обращения 01.07.2023 г.).

2023 г. В рамках данного исследования было оценено фактическое влияние моделей ионосферы и калибровки на точность кодовых одночастотных потребителей. В частности, улучшение базового расчёта за счёт использования глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО на территории России составило 16% при задействовании ГЛОНАСС (ошибка за счёт ионосферы 4 м) и 56% – при *GPS* (ошибка за счёт ионосферы 3,9 м). При этом, как уже было сказано, точность ионосферы в кадре СДКМ сравнима с глобальными картами ионосферы по расчётам ИАЦ КВНО и других зарубежных центров анализа службы *IGS*. Таким образом, полученные результаты расчётов указывают на улучшение точности местоопределения одночастотных потребителей только за счёт использования ионосферных карт из кадра СДКМ при использовании бортовой ЭВИ ГЛОНАСС и *GPS*. Также в ходе эксперимента в целях оценки теоретически достижимой точности кодового одночастотного потребителя был проведён расчёт применительно к калиброванному приёмнику, измерения которого предоставлены ВНИИФТРИ [8], при использовании смоделированной бортовой ЭВИ ГЛОНАСС на основе апостериорной ЭВИ ИАЦ КВНО и модели ионосферы ИАЦ КВНО. В одночастотном режиме экспериментальная пространственная погрешность координат составила около 1,2 м, теоретически достижимая – 0,8 м в односистемном режиме ГЛОНАСС (при нулевых шумовых ошибках и полной двухчастотной группировке ГЛОНАСС с *PDOP*, равным 1,9) в январе 2023 г. Данные результаты косвенным образом указывают и на примерный уровень точности, достижимый потребителями СДКМ, поскольку повторяют принцип функционального дополнения: передача в кадре уточнённой ЭВИ и параметров ионосферы, использование калиброванного приёмника.

Также существует возможность вычислять ошибку СДКМ за счёт космического сегмента. Предварительные приблизительные результаты подобного расчёта были опубликованы в докладе¹⁾ [6], в котором представлена карта распределения точности СДКМ за счёт космического сегмента на 17 ноября 2022 г. Данный подход аналогичен расчёту эквивалентной погрешности псевдодальности ГНСС и пересчёту этого показателя в ошибку местоопределения, когда бортовая ЭВИ ГНСС сравнивается с эталонной ЭВИ. Но в случае СДКМ при оценке космического сегмента помимо сравнения уточнённой ЭВИ СДКМ с эталонной производится также сравнение карт ионосферы СДКМ с некоторым эталоном ионосферы. Хотя представленные в докладе [6] результаты являются предварительными, показана в принципе применимость данного подхода, когда для оценки вклада в точность местоопределения ошибки за счёт космического сегмента СДКМ не предполагается проведение экспериментов с различными НАП, а используется сравнение уточнённой ЭВИ и модели ионосферы СДКМ с эталонными значениями. В качестве эталона ЭВИ может выступать апостериорная финальная ЭВИ по расчётам ИАЦ КВНО или других зарубежных центров анализа. А в качестве эталона ионосферы могут использоваться глобальные однослойные карты ионосферы, которые открыто публикуются в формате *IONEX* согласно расчётам ИАЦ КВНО и других зарубежных центров анализа.

¹⁾ URL: <https://glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4045> (дата обращения 01.07.2023 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки характеристик в ИАЦ КВНО передаётся поток измерений сети СДКМ-КФД, а также поток сообщений СДКМ в формате *SiSNet*. В ИАЦ КВНО создано ПО, с помощью которого на регулярной основе формируются суточные файлы уточнённой ЭВИ СДКМ и ионосферные карты СДКМ в стандартных ГНСС-форматах *SP3* и *IONEX*. В работе представлена оценка некоторых характеристик СДКМ с использованием полученных файлов на 17 ноября 2022 г. Результаты расчётов показали высокий уровень доступности навигации СДКМ в двухсистемном режиме ГЛОНАСС+*GPS* ($PDOP = 1,2$; $HDOP = 0,6$; среднее число видимых КА 16,9), а также в односистемном режиме ГЛОНАСС ($PDOP = 1,9$; $HDOP = 1,0$; среднее число видимых КА 8,3). Ввиду ограничений стандарта *SBAS* на максимальное число КА односистемный режим *GPS* уступает стандартному ($PDOP = 2,1$; $HDOP = 1,1$; среднее число видимых КА 8,5).

Также приведены результаты сравнения ионосферных карт. По итогам расчётов установлено, что точность ионосферы СДКМ сравнима с точностью глобальных карт ионосферы, составленных в ИАЦ КВНО и других центрах анализа *IGS*, и, соответственно, что она выше точности оперативной модели Клобучара из кадра *GPS*.

В работе кратко представлены возможные способы оценки точностных характеристик СДКМ. Приведены предварительные результаты оценок улучшения точности местоопределения кодовых одночастотных потребителей при использовании СДКМ. Отмечено, что помимо проведения масштабных испытаний с использованием НАП возможна оценка ошибки СДКМ за счёт космического сегмента, когда происходит сравнение уточнённой ЭВИ СДКМ и ионосферных карт СДКМ относительно эталонных значений (ЭВИ и однослойные карты ионосферы), открыто публикуемых ИАЦ КВНО и другими центрами анализа *IGS*.

В целом использование СДКМ позволяет повышать надёжность и точность навигации. В дальнейшем в ИАЦ КВНО планируется продолжение исследований СДКМ и других *SBAS*-систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. RTCM standard 10403.1 for differential GNSS services. Version 3. RTCM special committee no. 104. October 27, 2006.
2. Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System. Wide Area Augmentation System airborne equipment. RTCA/DO-229C. November 28, 2001.
3. 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.
4. *Schaer Stefan, Gurtner Werner*. IONEX. The IONosphere Map EXchange Format. Version 1.1. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland, 2015.
5. *Аржанников А.А., Готов В.Д., Митрикас В.В.* Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС. – Труды ИПА РАН, 2022, вып. 60, с. 3 – 11.
6. *Котов И.В., Аржанников А.А., Готов В.Д.* Принципы работы и оценка некоторых характеристик функционального дополнения ГЛОНАСС. – В тез. докл. Десятой Всероссийской конференции: Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО – 2023). Спб.: Институт прикладной астрономии РАН, 2023.

7. *Аржанников А.А., Готов В.Д., Митрикас В.В.* Влияние моделей ионосферы и дифференциальных кодовых задержек на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС. – В тез. докл. Десятой Всероссийской конференции: Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение (КВНО – 2023). СПб.: Институт прикладной астрономии РАН, 2023.

8. *Митрикас В.В., Скакун И.О., Аржанников А.А.* и др. Применение калиброванного навигационного приёмника для оценки погрешности измерения за счёт космического сегмента (*SISRE*) ГЛОНАСС. – Альманах современной метрологии, 2021, вып. 2 (26), с 79 – 103.