

Принципы работы и оценка некоторых характеристик функционального дополнения системы ГЛОНАСС

Котов И.В., Аржанников А.А., Глотов В.Д.

ИАЦ КВНО, АО «ЦНИИмаш», г. Королёв, Московская область

В целях контроля целостности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и повышения точности местоопределения используются широкозонные дифференциальные системы (англ. SBAS - Satellite Based Augmentation System). Основным потребителем SBAS систем являются воздушные суда гражданской авиации. В число SBAS систем входят: Система Дифференциальной Коррекции и Мониторинга (СДКМ, Россия), WAAS (США), EGNOS (Евросоюз), BDSBAS (Китай), GAGAN (Индия), MSAS (Япония), SouthPan (Австралия), ANGA (Африка), KAAS (Южная Корея). Для большинства SBAS систем основной обслуживаемой ГНСС является GPS (31 КА). СДКМ является отечественной разработкой, её отличием от других систем подобного типа является выбор дополняемой ГНСС. Для СДКМ основной дополняемой системой является ГЛОНАСС (24 КА), а сопутствующей – GPS (27 КА) [1, 2].

В ИАЦ КВНО в режиме реального времени передается поток измерений сети СДКМ (54 станции), а также поток целевой информации СДКМ в формате SISNeT, на основе которого в ИАЦ КВНО формируются на ежесуточной основе файлы ЭВИ с учетом поправок СДКМ и ионосферные карты СДКМ в файлах стандартных ГНСС-форматов (SP3 и IONEX). При использовании сформированных файлов SP3 и IONEX был проведен расчет оценки некоторых характеристик СДКМ (PDOP, HDOP, число видимых КА), а также оценка точности ионосферы СДКМ относительно глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО [3, 4], четырех глобальных карт ионосферы центров международной службы анализа IGS (CODE, ESOC, JPL, WHU), а также относительно оперативной модели Клобучара из кадра GPS. Расчет проводился за 17.11.2022 по всей зоне действия СДКМ.

Результаты расчетов показали высокий уровень доступности навигации СДКМ в основном двухсистемном режиме ГЛОНАСС+GPS (PDOP=1.2, HDOP=0.6, всего 51 КА в кадре СДКМ, в среднем 28 КА в кадре СДКМ, среднее число видимых КА 16.9), а также в односистемном режиме ГЛОНАСС (PDOP=1.9, HDOP=1.0, всего 24 КА в кадре СДКМ, в среднем 13 КА в кадре СДКМ, среднее число видимых КА 8.3). При этом из-за ограничений стандарта SBAS (27 из 31 КА) [1, 2] в односистемном режиме GPS уровень

доступности СДКМ уступает стандартному (PDOP=2.1, HDOP=1.1, всего 27 КА в кадре СДКМ, среднее число видимых КА 8.5).

Результаты оценки характеристик ионосферы СДКМ показали, что точность ионосферы СДКМ по всей зоне обслуживания на суточном интервале 17.11.2022 сравнима с точностью глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО и других центров анализа IGS и существенно лучше оперативной модели Клобучара из кадра GPS. СКО ионосферной карты СДКМ относительно карты ИАЦ КВНО составила 2.3 TECu (0.37 м) (1 ед. TECu = 10^{16} электронов/кв.м, что соответствует задержке в ~16 см для L1). Взаимные СКО карт ИАЦ КВНО и четырех центров анализа IGS составили от 2.2 до 3.1 TECu (от 0.35 м до 0.5 м) по всей зоне обслуживания СДКМ. Для сравнения, СКО ионосферной модели Клобучара из кадра GPS составило ~9 TECu (1.44м)

Работы по оценке характеристик СДКМ и других SBAS проводятся в рамках плановых работ ИАЦ КВНО, Заказчиком которых является Госкорпорация «Роскосмос». В дальнейшие планы ИАЦ КВНО входит оценка точностных характеристик СДКМ и других SBAS систем по всей зоне обслуживания.

Литература

- 1) ИНТЕРФЕЙСНЫЙ КОНТРОЛЬНЫЙ ДОКУМЕНТ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС Системы Дифференциальной Коррекции и Мониторинга. Редакция 2.0, 2020г.
- 2) Сайт "СДКМ" [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sdcm.ru/> (дата обращения: 01.02.2023).
- 3) А. А. Аржанников, В. Д. Глотов, В. В. Митрикас. Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. — 2022. — Вып. 60. — С. 3–11.
- 4) Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения: 01.02.2023).



Принципы работы и оценка некоторых характеристик функционального дополнения системы ГЛОНАСС

Котов И.В., Аржанников А.А., Глотов В.Д.
ИАЦ КВНО, АО «ЦНИИмаш», Королев, Московская область



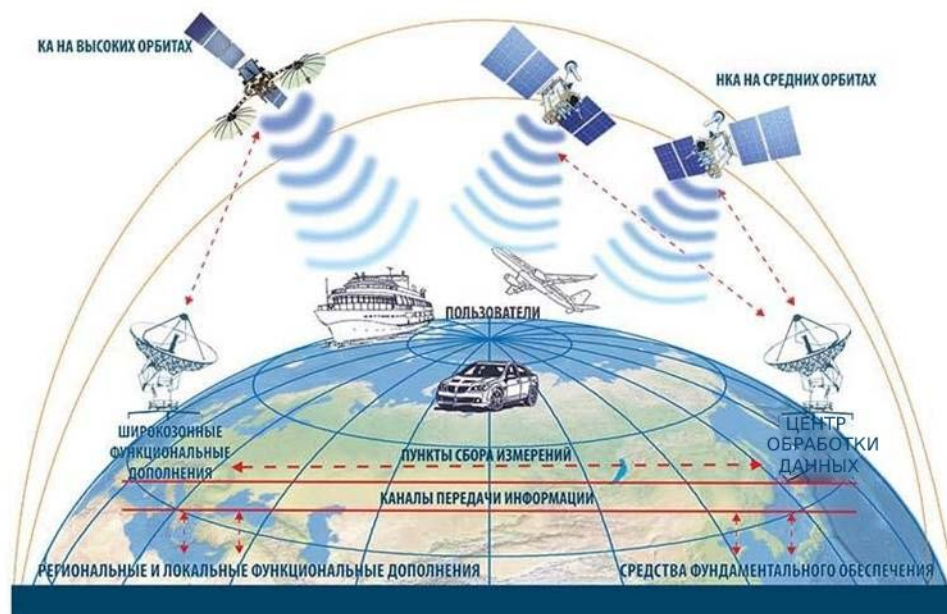
План

- **Цель:** Исследование характеристик СДКМ и сопутствующей информации (ионосферной карты СДКМ);
- Обзор и принципы работы существующих систем SBAS;
- Расчет характеристик СДКМ (HDOP, PDOP, к-во КА)
 - ГЛОНАСС
 - ГЛОНАСС + GPS
 - GPS
- Оценка точности ионосферы СДКМ (по сравнению с картами ИАЦ КВНО, IGS, моделью Клобучара из кадра GPS);
- Выводы

Примечание: Работы по оценке характеристик СДКМ и других SBAS проводятся в рамках плановых работ ИАЦ КВНО, Заказчиком которых является Госкорпорация «Роскосмос».

Принципы работы SBAS систем

- Станции сбора измерений принимают навигационную информацию от КА;
- Собранная информация передаётся в распределённый центр обработки данных (ЦОД) СДКМ, осуществляющий обработку и прогнозирование КИ;
- Полученные поправки передаются через КА-ретрансляторы («Лучи») пользователям.

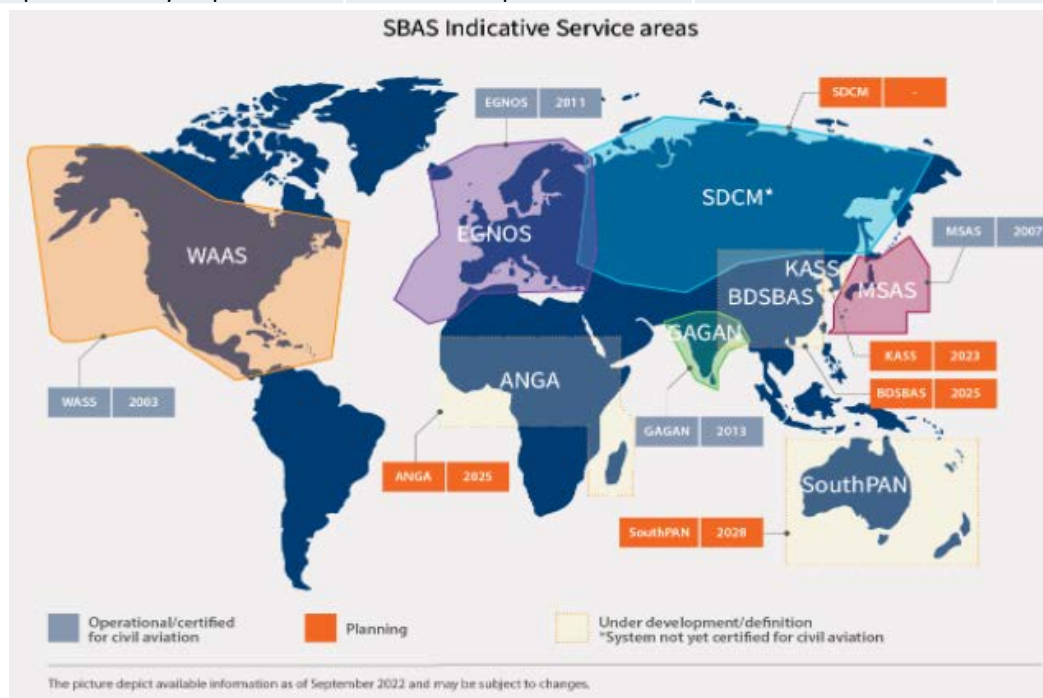


Передаваемая информация SBAS:

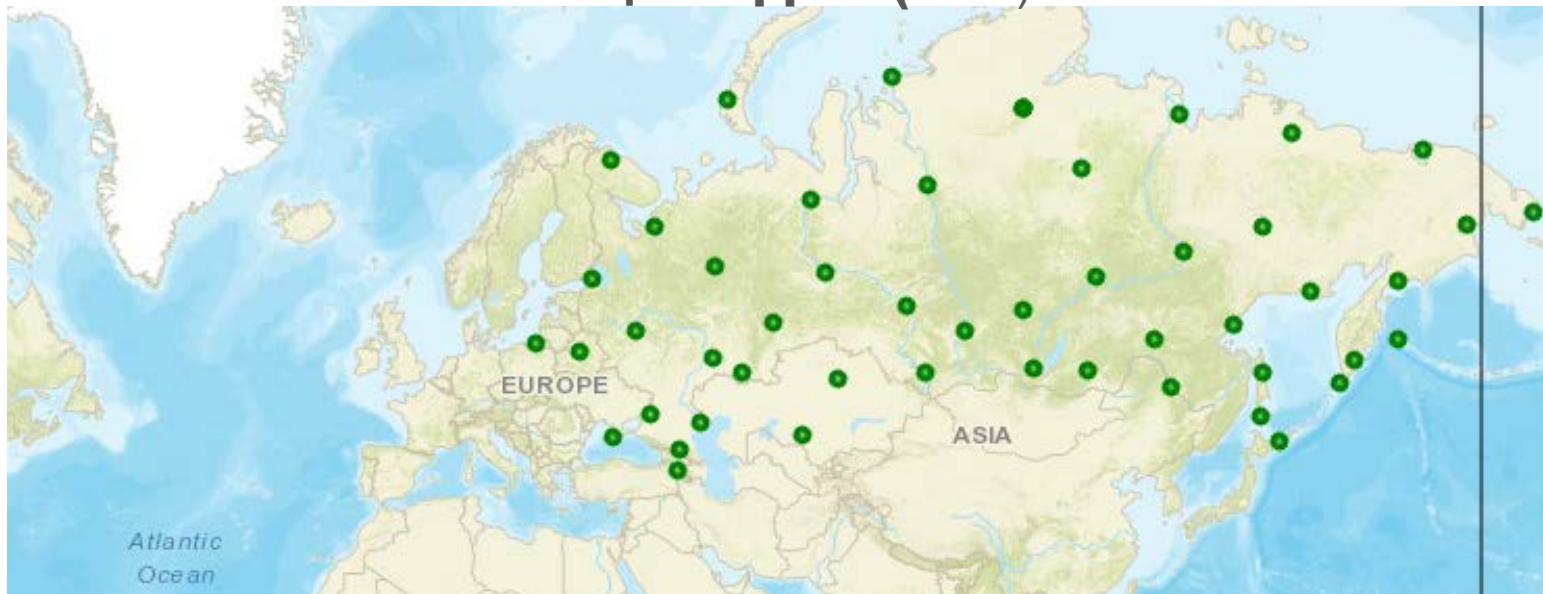
- Точность: поправки к ЭВИ + ионосфера
- Целостность навигационного поля ГНСС

Существующие SBAS-системы

Название	Территория	Статус	К-во сертифицированных взлетно-посадочных полос	Год запуска	КА ГНСС (корр. поправки)
WAAS	Северная Америка	Работает	~3 600	2003	31 GPS
СДКМ	РФ	На этапе сертификации		-	24 ГЛОНАСС + 27 GPS
EGNOS	Европа и Северная Африка	Работает	~400	2011	31 GPS, *без GALILEO
BDSBAS	Китай	Тестирование		2025	31 GPS, *без BeiDou
GAGAN	Полуостров Индостан	Работает		2013	~31 GPS
MSAS	Японские острова	Работает		2007	
SouthPAN	Австралия и Новая Зеландия	Тестирование		2028	
ANGA	Центральная Африка	Тестирование		2025	
KAAS	Корейский полуостров	Тестирование		2023	



Сеть станций СДКМ (РКС)



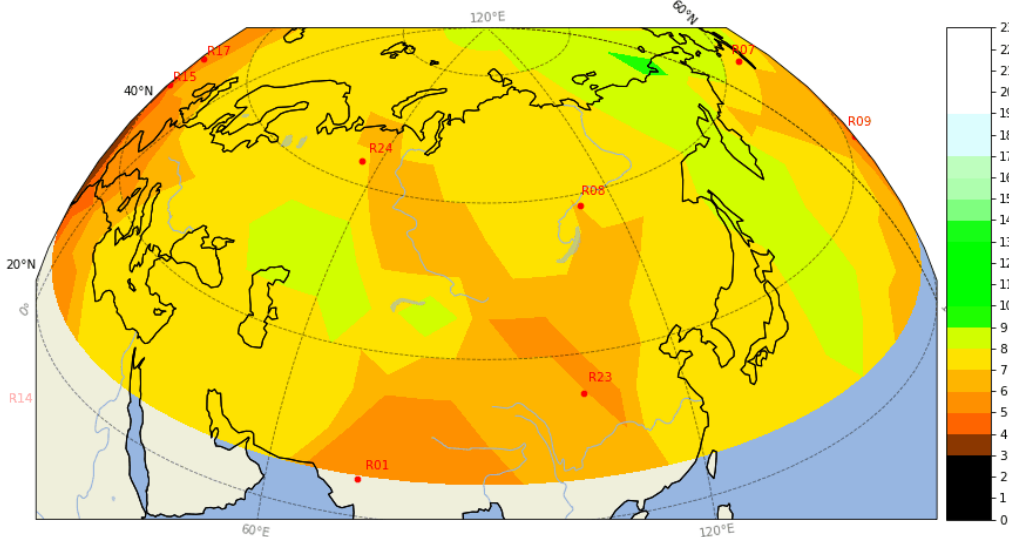
В ИАЦ КВНО:

- ❑ в режиме реального времени принимается поток измерений сети РКС (54 станции), а также поток СДКМ в формате SISNeT;
- ❑ поправки СДКМ ежедневно пересчитываются в ЭВИ (штатные ЭВИ + КИ СДКМ), результаты хранятся в стандартном формате SP3
- ❑ Ионосферные поправки СДКМ ежедневно пересчитываются в стандартный формат IONEX



Количество видимых КА с поправками СДКМ

Visible satellites SDKM GLONASS elevation > 5 at 17-11-2022 00:00:00

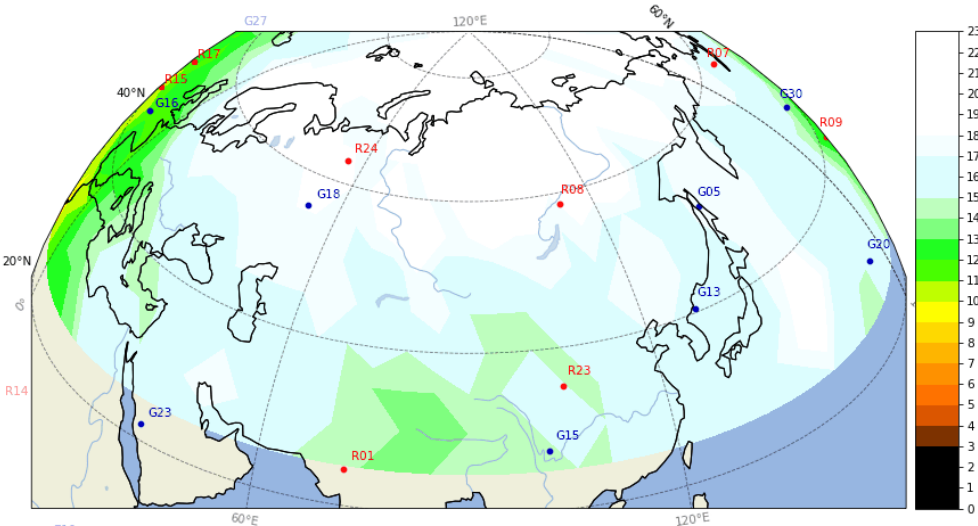


Total SDKM SV: 13 Average SDKM hour visible SV: 7.9 Average SDKM day visible SV: 8.3

	Количество видимых КА с поправками СДКМ	
	Среднее к-во КА в кадре СДКМ	Среднее кол-во видимых КА СДКМ
ГЛОНАСС	13	8.3
ГЛОНАСС + GPS	28	16.9

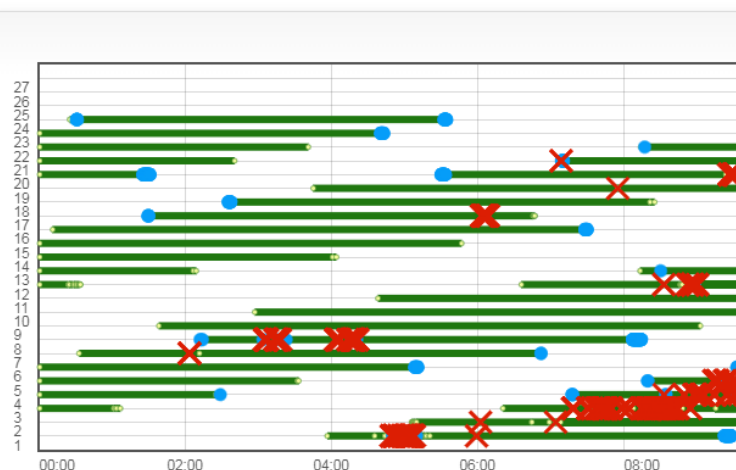
Расчет проводился на суточном интервале 17.11.2022 по всей зоне действия СДКМ с использованием ЭВИ СДКМ в формате SP3

Visible satellites SDKM GLONASS+GPS elevation > 5 at 17-11-2022 00:00:00



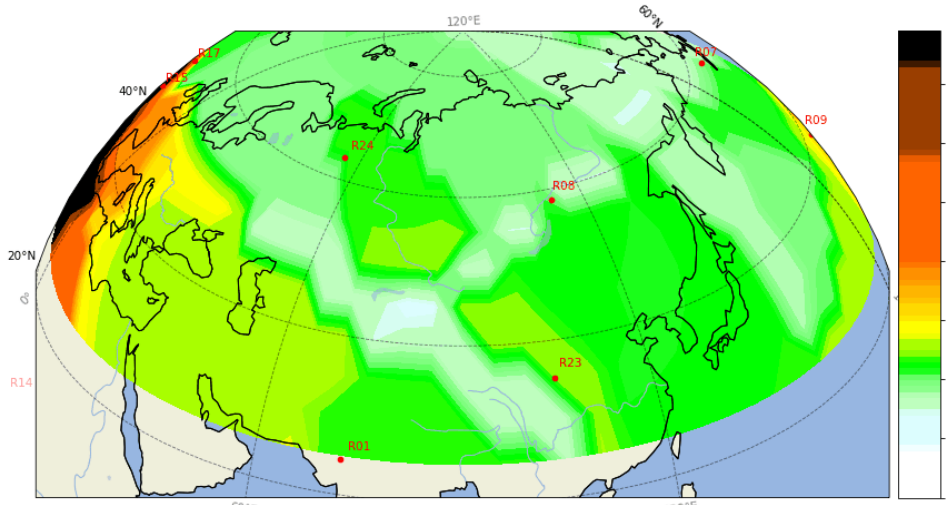
Total SDKM SV: 32 Average SDKM hour visible SV: 17.9 Average SDKM day visible SV: 16.9

Данные об UDRE спутников, переданные в SBAS



PDOP СДКМ

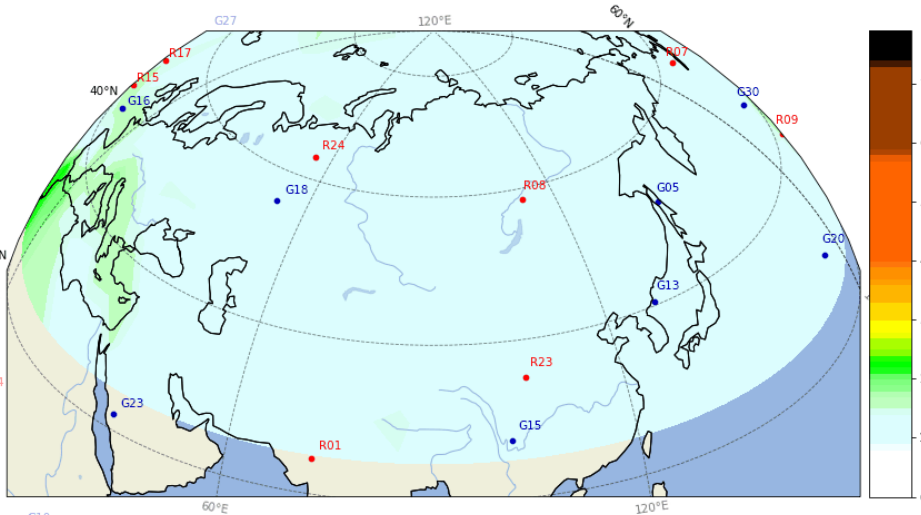
PDOP SDKM GLONASS elevation > 5 at 17-11-2022 00:00:00



Total SDKM SV: 13 Average SDKM hour PDOP SV: 2.0 Average SDKM day PDOP SV: 1.9

	Пространственный геометрический фактор СДКМ (PDOP)
ГЛОНАСС	1.9
ГЛОНАСС + GPS	1.2

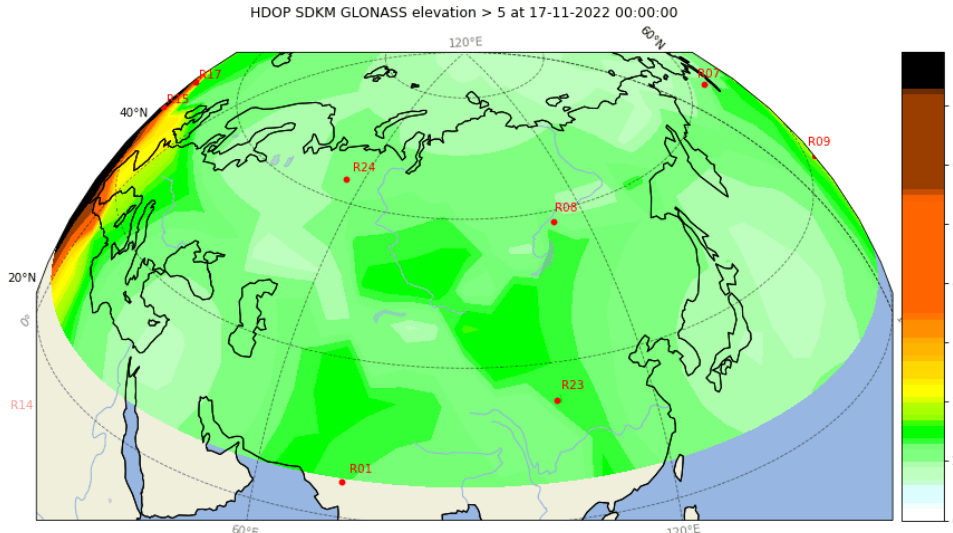
PDOP SDKM GLONASS+GPS elevation > 5 at 17-11-2022 00:00:00



Total SDKM SV: 32 Average SDKM hour PDOP SV: 1.2 Average SDKM day PDOP SV: 1.2

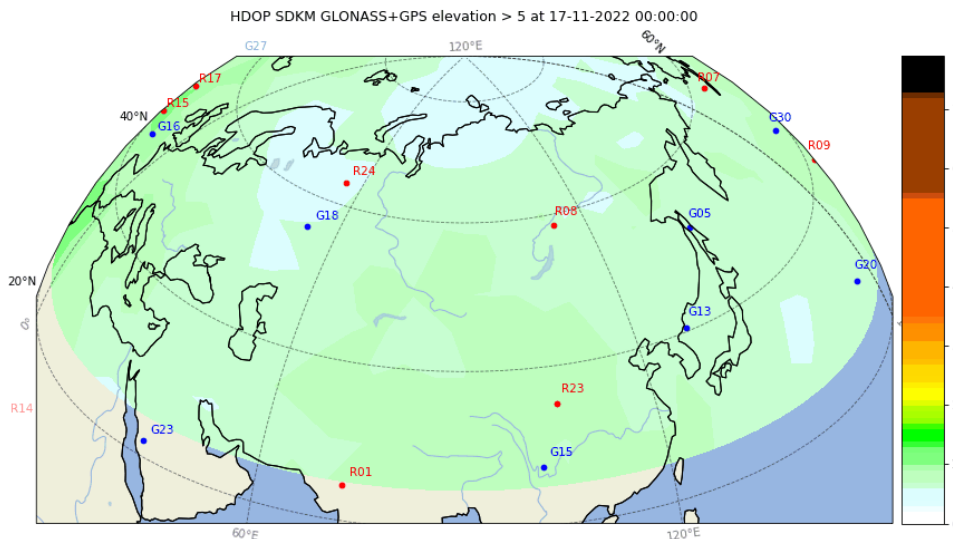
Расчет проводился на суточном интервале 17.11.2022 по всей зоне действия СДКМ с использованием ЭВИ СДКМ в формате SP3

HDOP СДКМ



Total SDKM SV: 13 Average SDKM hour HDOP SV: 1.1 Average SDKM day HDOP SV: 1.0

	Геометрический фактор в плане СДКМ (HDOP)
ГЛОНАСС	1.0
ГЛОНАСС + GPS	0.6



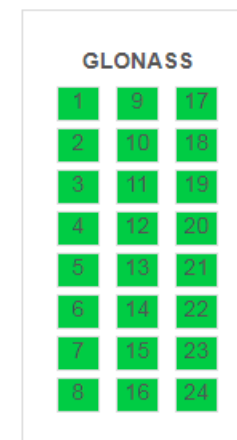
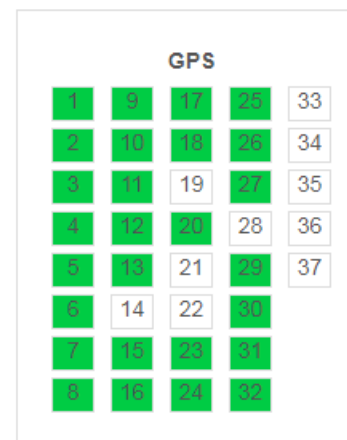
Total SDKM SV: 32 Average SDKM hour HDOP SV: 0.6 Average SDKM day HDOP SV: 0.6

Расчет проводился на суточном интервале 17.11.2022 по всей зоне действия СДКМ с использованием ЭВИ СДКМ в формате SP3

PDOP, HDOP, к-во КА СДКМ

Система	PDOP	HDOP	Всего КА в кадре СДКМ	Среднее к-во КА в кадре СДКМ	Среднее кол-во видимых КА СДКМ
GLONASS	1.9	1.0	24	13	8.3
GPS*	2.1*	1.1*	27*	15*	8.5*
GLONASS+GPS	1.2	0.6	51	28	16.9

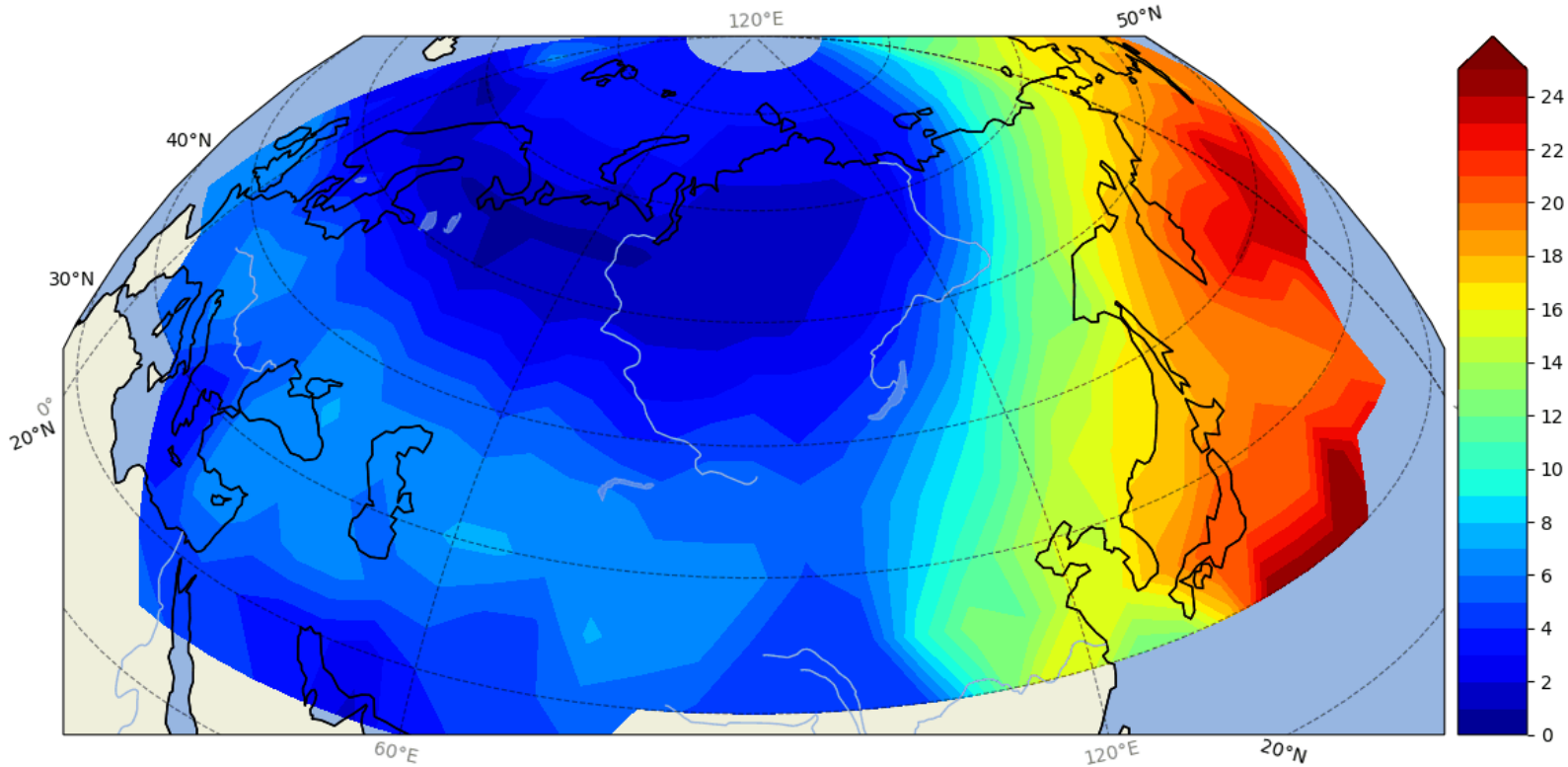
Маска спутников



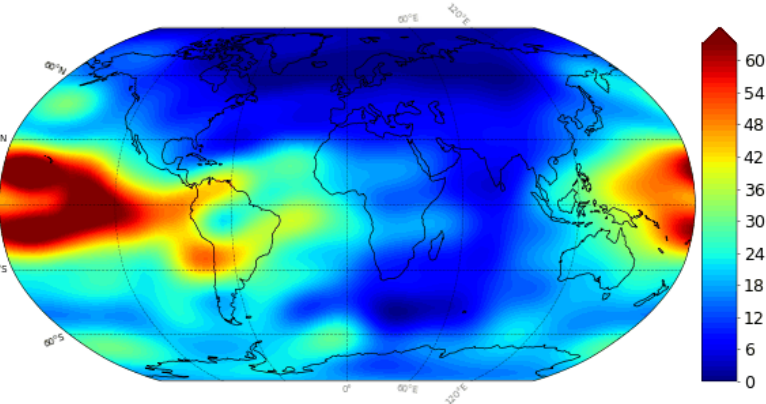
* В односистемном режиме GPS показатели СДКМ (DOP, к-во КА) ниже из-за ограничений стандарта SBAS по общему количеству КА (только 27 КА GPS)

Ионосфера СДКМ

СДКМ (SDCM) 2022-11-17 00:00, TECu



ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш, IAC PNT 2022-11-17 00:00

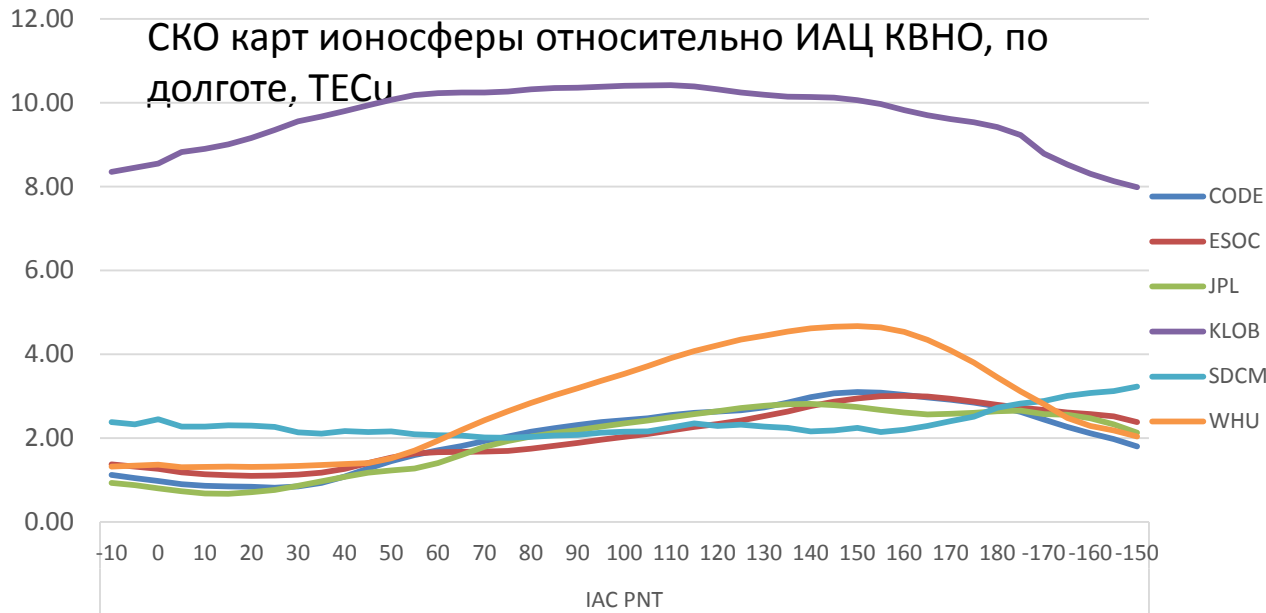


В ИАЦ КВНО ионосфера СДКМ ежедневно пересчитывается в стандартный формат IONEX

Для оценки точности карты ионосферы СДКМ в формате IONEX сравнивались с глобальными картами ионосферы по расчетам ИАЦ КВНО* и других центров анализа IGS, а также с моделью ионосферы из кадра GPS

* <https://www.glonass-iac.ru/iono/>

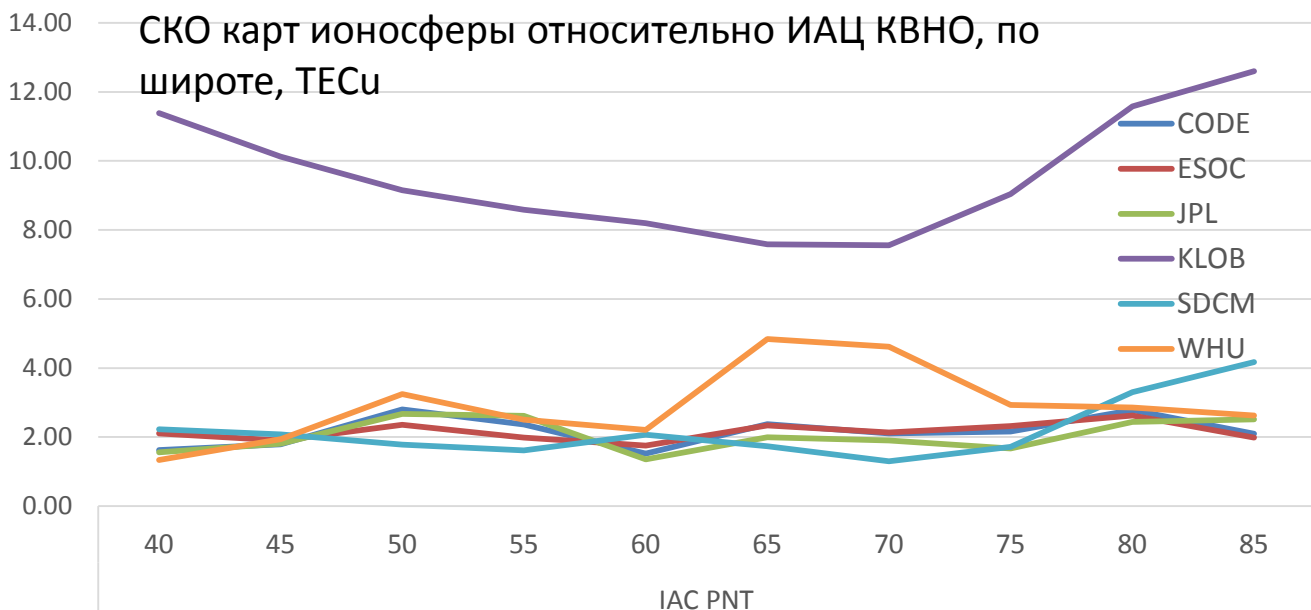
Оценка точности ионосферы СДКМ



1 TECu = 16 см L1 (10^{16} электронов / м²)

Точность карты СДКМ сравнима с точностью глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО* и 4 других центров анализа IGS.

За 17.11.2022 СКО карты ионосферы СДКМ составила ~2.3 TECu (0.37м) по всей зоне действия.



СКО карт IGS относительно друг друга составила от 2.2 TECu до 3.1 TECu (от 0.35м до 0.5м)

СКО модели Клобучара из кадра GPS за 17.11.2022 составило ~9 TECu (1.44 м)

Выводы

- Основные задачи СДКМ (как и других систем SBAS) – обеспечение целостности ГНСС и увеличение точности (за счет передаваемых поправок к штатной ЭВИ и карты ионосферы) по всей зоне обслуживания
- В ИАЦ КВНО формируются на ежесуточной основе в стандартные ГНСС файлы SP3 (ЭВИ с поправками СДКМ) и IONEX (ионосферная карта СДКМ)
- На основе рассчитанных ЭВИ СДКМ в формате SP3 была проведена оценка среднесуточных характеристик СДКМ (за 17.11.2022) по всей зоне действия:
 - В режиме ГЛОНАСС: всего $KA=24$, $PDOP=1.9$, $HDOP=1.0$, видимые $KA=8.3$
 - В режиме GPS: всего $KA=27$, $PDOP=2.1$, $HDOP=1.1$, видимые $KA=8.5$
 - В режиме ГЛОНАСС+GPS: $PDOP=1.2$, $HDOP=0.6$, видимые $KA=16.9$
- На основе рассчитанных файлов IONEX была проведена оценка точности ионосферы СДКМ за 17.11.2022:
 - СКО карты ионосферы СДКМ ~ 2.3 TECu (0.37м) (относительно ИАЦ КВНО)
 - СКО карт IGS относительно друг друга составила от 2.2 до 3.1 TECu (от 0.35м до 0.5м)
 - СКО модели Клобучара из кадра GPS за 17.11.2022 составило ~ 9 TECu (1.44 м)
 - Точность ионосферы СДКМ сравнима с точностью глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО и других центров анализа IGS и лучше оперативных моделей ионосферы из кадра ГНСС.
- В дальнейшие планы ИАЦ КВНО входит сравнительная оценка точностных характеристик СДКМ и других SBAS систем по всей зоне обслуживания.



Спасибо за внимание!

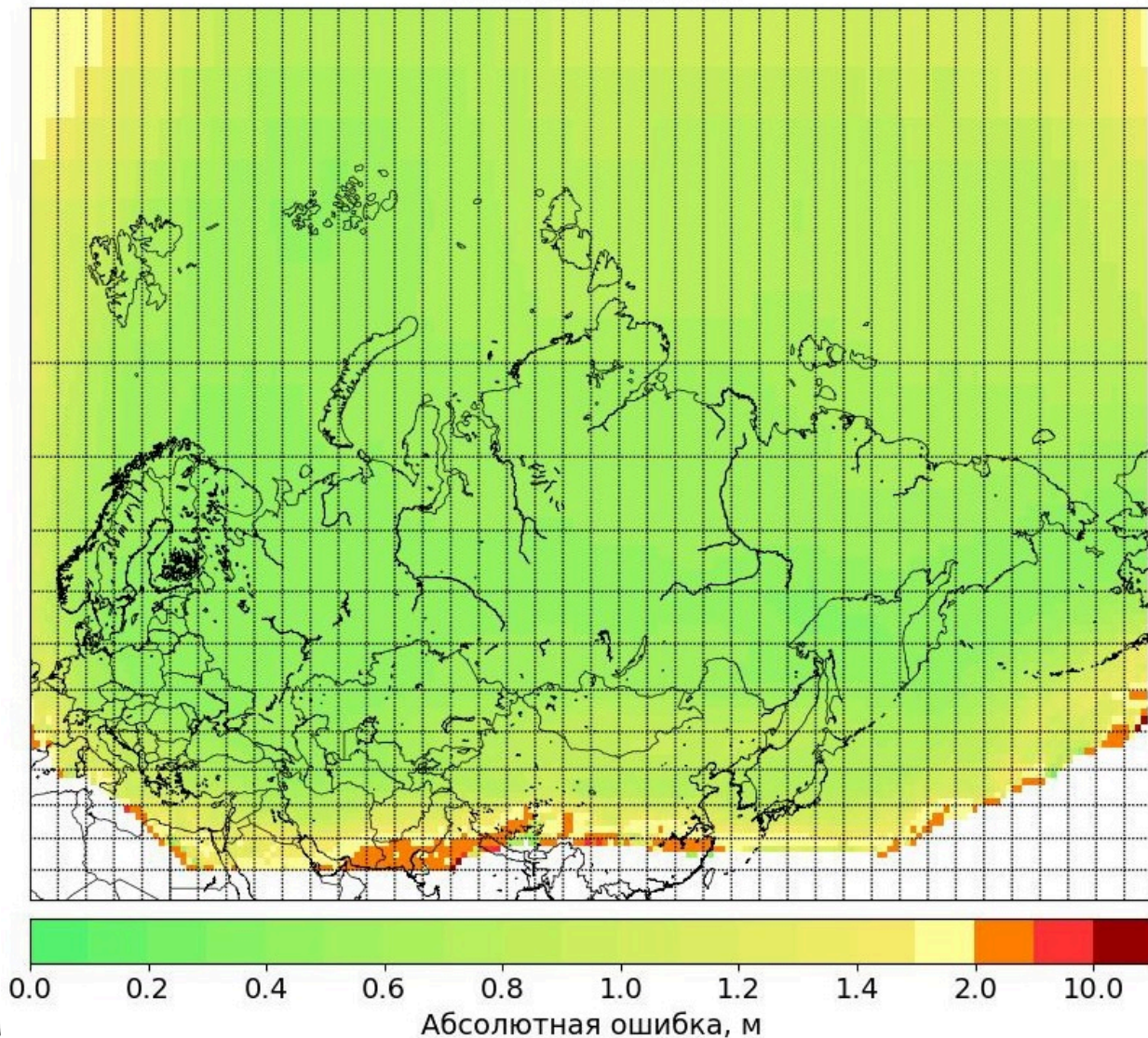
**АО ЦНИИмаш, 141070, Российская Федерация,
Московская область, г. Королев, ул. Пионерская, д. 4
Телефон/Факс: +7 (495) 513 41 39
Эл. адрес: ianc@glonass-iac.ru
Веб-сайт: www.glonass-iac.ru, www.tsniimash.ru**

Дополнительно. Предварительная приближительная оценка точности СДКМ (L1)

Абсолютная(3D) ошибка потребителя SBAS-СДКМ,

Дата отчета: 17-11-2022

Решение по GPS



Список источников

- ИНТЕРФЕЙСНЫЙ КОНТРОЛЬНЫЙ ДОКУМЕНТ. Радиосигналы и состав цифровой информации функционального дополнения системы ГЛОНАСС Системы Дифференциальной Коррекции и Мониторинга. Редакция 2.0, 2020 г
- Сайт СДКМ [<https://www.sdcm.ru>]
- Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш» [<https://www.glonass-iac.ru/iono/>]
- А. А. Аржанников, В. Д. Глотов, В. В. Митрикас. Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. — 2022. — Вып. 60. — С. 3–11.
- <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>
- <ftp://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>