

Влияние моделей ионосферы и дифференциальных кодовых задержек на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС

А.А. Аржанников, В.Д. Глогов, В.В. Митрикас

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

Целью данной работы является оценка улучшения точности местоопределения ГЛОНАСС при использовании различных моделей ионосферы, а также межсигнальных C1C-C1P [5] и межчастотных C1P-C2P [5] дифференциальных кодовых задержек (англ. DCB – differential code bias). При этом использовались измерения всех навигационных сигналов ГЛОНАСС на частотах L1 и L2, формируемые коммерческими навигационными приемниками. Задержки АФНС, передаваемые потребителям в навигационных сообщениях ГЛОНАСС, существенно отличаются от наблюдаемых значений, однако в обозримом будущем планируется периодический пересчет задержек по измерениям Российских сетей станций и передача в кадре уточненных значений. Актуальность работы обусловлена тем, что позволяет заранее спрогнозировать эффект от планируемого нововведения. Для данной цели было проведено исследование по обработке реальных данных 300 глобально распределенных беззапросных измерительных станций (БИС) на 8-суточном интервале в январе 2023 г.

По оценкам ИАЦ КВНО погрешность задержки АФНС в кадре ГЛОНАСС значительно выше в сравнении с другими ГНСС (СКП более 0.5м для ГЛОНАСС и менее 0.1м для остальных ГНСС) [3], поэтому существует потенциал улучшения точности местоопределения за счет уточнения данных задержек. Задержки DCB являются медленно меняющимися величинами (для примера, у КА GPS пересчет задержек в кадре происходит примерно раз в 3-4 месяца, у КА BeiDou - раз в месяц). В работе схематично представлена методика уточнения межсигнальных C1C-C1P и межчастотных C1P-C2P задержек АФНС ГЛОНАСС с помощью моделирования локальной ионосферы. Из-за литерной зависимости ГЛОНАСС необходимо наличие эталона, в качестве которого использовался калиброванный приемник SU0* ВНИИФТРИ [2]. С помощью описанной методики были получены значения задержек DCB за 24-31 января 2023г. для эксперимента.

Совместно с расчетом задержек DCB в ИАЦ КВНО ежедневно происходит расчет глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС, англ. TEC - Total Electron Content) в ионосфере [1, 3]. Глобальные карты ионосферы по расчетам ИАЦ КВНО публикуются в файлах формата IONEX [1], доступна статистика за последние 5 лет. На 24.01.2023 проведен расчет оценки точности глобальных ионосферных карт ИАЦ КВНО относительно карт трех центров анализа международной службы ГНСС IGS: СКО по всей территории Земли ~0.6 м, над материками ~0.5м. Для сравнения, карты центров IGS согласуются друг с другом с СКО 0.5 – 0.7м, СКО модели Клобучара из кадра GPS ~2.1м, среднесуточная вертикальная ионосферная задержка ~5.6м. Используя

глобальные карты ПЭС ионосферы, в ИАЦ КВНО ежедневно происходит оценка вклада ионосферы в псевдодальность КА, затем с учетом геометрического фактора (PDOP) пересчет в пространственные карты распределения вклада ионосферной ошибки в точность одночастотных потребителей всех ГНСС [4]. Представлены результаты расчета за последний год. В частности, за 24.01.2023 среднесуточный вклад ионосферы в точность GPS составил 2.6 м по территории России, 4.8 м глобально; для ГЛОНАСС 2.7 м по территории России, 5.7 м глобально. Среднесуточная глобальная ионосферная ошибка выше российской за счет высокой активности ионосферы на экваториальных широтах, а также за счет соотношения PDOP ГЛОНАСС (глобальный ~2.0, по России ~1.8).

В рамках данного исследования в ИАЦ КВНО была проведена экспериментальная оценка фактического влияния моделей ионосферы и задержек DCB на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС, в которой использовались данные 300 БИС (250 глобально распределенных станций сети IGS и 50 станций сети Госкорпорации «Роскосмос» преимущественно на территории России), расчет проводился на 8-суточном интервале 24-31 января 2023г. Использовались только кодовые измерения, калибровка приемников не проводилась, применялись расчетные значения задержек DCB КА ГЛОНАСС, полученные с помощью калиброванного приемника, а также глобальная карта ПЭС ионосферы ИАЦ КВНО и ионосферная модель Клобучара из кадра GPS. В качестве опорных координат БИС для оценок точности использовались высокоточные координаты станций с погрешностью не более нескольких сантиметров. Относительно них рассчитывались среднеквадратичные погрешности (СКП) координатных решений по каждой станции глобальной сети. Вклад каждого фактора рассчитывался в предположении, что суммарная погрешность – пространственная и вычисляется как корень суммы квадратов составляющих.

В базовом расчете (при полном неучете ионосферы и задержек DCB) точности местоопределения ГЛОНАСС для измерений C1C и C1P (в обозначениях RINEX-3 [5]) получились примерно одинаковыми (СКП по России ~7.2 м, глобально ~9.0 м).

Улучшение точности (базового расчета) одночастотного потребителя C1C ГЛОНАСС за счет учета межсигнальных задержек C1C-C1P составило 2.2% по России, 3.7% глобально (вклад ~1.9м). При расчете к штатным частотно-временным поправкам (ЧВП) КА ГЛОНАСС были прибавлены межсигнальные C1C-C1P задержки $DCB_{C1C-C1P, SU0}$

Улучшение точности (базового расчета) одночастотного потребителя ГЛОНАСС за счет корректных межчастотных C1P-C2P задержек АФНС составило 13.2% по России (вклад ~3.6м), глобально 6.8% (вклад 3.2м). В расчете предполагалось, что ЧВП в кадре ГЛОНАСС привязаны к C1P, но содержат ошибку паспортных значений АФНС, поэтому для одночастотного решения C1P к ЧВП была применена коррекция $1.53 \cdot (DCB_{C2P-C1P, SU0} - T_{АФНС})$.

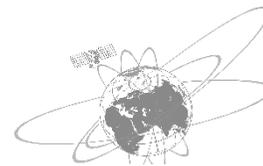
Улучшение точности (базового расчета) одночастотного потребителя за счет использования ионосферы составило для ГЛОНАСС с использованием карт ИАЦ КВНО: по России 16% (вклад 4м), глобально 34% (вклад 6.8 м); для

ГЛОНАСС с использованием модели Клобучара: по России 5% (вклад 2.3м), глобально 26% (вклад 6м). Аналогичный расчет для GPS с использованием карт ИАЦ КВНО: по России 56% (вклад 3.9м), глобально 62% (вклад 4.8м); для GPS с использованием модели Клобучара: по России 4% (вклад 1.9м), глобально 24% (вклад 3.3м).

Для оценки теоретически достижимой точности одночастотного приемника был проведен расчет за тот же период для калиброванного приемника SU0* (шумовые погрешности на каждой частоте ~0.2 м) и смоделированной штатной ЭВИ ГЛОНАСС на основе апостериорной ЭВИ ИАЦ КВНО, привязанной к измерениям С1Р калиброванного приемника, использовались только двухчастотные КА ГЛОНАСС (PDOP ~2.48). В одночастотном режиме С1Р с учетом модели ионосферы ИАЦ КВНО погрешность координат составила ~1.2м, в двухчастотном режиме С1Р-С2Р ~1.5м. При полной двухчастотной орбитальной группировке ГЛОНАСС (PDOP ~1.9) в январе 2023г. теоретически достижимая пространственная погрешность координат С1Р ГЛОНАСС идеального приемника с нулевыми шумовыми погрешностями составила бы ~0.8м за счет ошибок моделирования ионосферы.

Литература

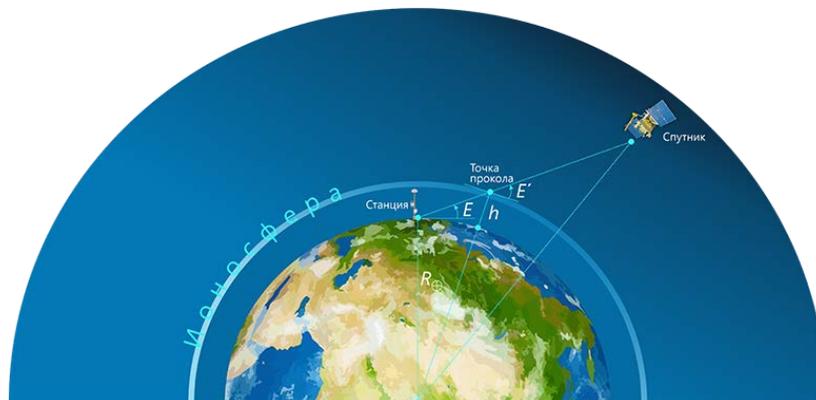
- 1) Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/iono/> (дата обращения: 01.02.2023).
- 2) *Митрикас В. В., Скакун И. О., Аржанников А. А., Федотов В. Н.* Применение калиброванного навигационного приемника для оценки погрешности измерения за счёт космического сегмента (SISRE) ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. - 2021. - № 2 (26). - С. 79–103.
- 3) *А. А. Аржанников, В. Д. Глозов, В. В. Митрикас* / Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 3–11 [<https://www.glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4023>]
- 4) *А. А. Аржанников, В. Д. Глозов, В. В. Митрикас, А.С. Свиридов* / Влияние ионосферы на точность координатного решения потребителя, построение глобальных карт ионосферы по беззапросным измерениям ГНСС // 26-я Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» 2022 г. [<https://www.glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4000>]
- 5) RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05. International GNSS Service. [<https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf>]



Влияние моделей ионосферы и дифференциальных кодовых задержек на точность координатного решения потребителей ГЛОНАСС

А.А. Аржанников, В.Д. Готов, В.В. Митрикас
ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш»

Десятая Всероссийская конференция с международным участием
«Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2023)
г. Санкт-Петербург, 17 – 21 апреля 2023 г.



* раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО <https://www.glonass-iac.ru/iono/>

План доклада

- **ЦЕЛЬ.** Оценить вклад в ошибку местоопределения ГЛОНАСС при использовании глобальных карт ионосферы (ИАЦ КВНО, модель Клобучара из кадра GPS), а также межсигнальных C1C-C1P [5] и межчастотных аппаратных задержек C1P-C2P [5] (АФНС), которые планируется периодически уточнять и передавать в навигационном кадре ГЛОНАСС
- **Методика расчета межчастотных задержек АФНС ГЛОНАСС (DCB):**
 - Локальные карты ионосферы и DCB по расчетам ИАЦ КВНО
 - Текущая точность задержки АФНС в кадре ГЛОНАСС, сравнение с другими ГНСС
 - Влияние литерной зависимости ГЛОНАСС . Калиброванный приемник ВНИИФТРИ
- **Глобальные карты ионосферы по расчетам ИАЦ КВНО:**
 - Метод расчета глобальных карт ИАЦ (2018-2023), сравнение с картами центров IGS
 - Пересчет глобальных карт ионосферы в пространственные карты распределения ионосферной ошибки для ГЛОНАСС и GPS. Динамика вклада ошибки за последний год
- **Эксперимент по фактической оценке при участии 300 станций на 8-суточном интервале:**
 - Всего 300 станций, из них 50 Российских, ГЛОНАСС\GPS, одночастотные\двухчастотные
 - Вклад ионосферы: глобальная карта ИАЦ КВНО \ модель Клобучара \ iono-free
 - Вклад межсигнальных задержек C1C-C1P (из кадра ГЛОНАСС) в точность
 - Вклад межчастотных задержек C1P-C2P в точность (задержка АФНС из кадра ГЛОНАСС)
 - *В расчетах калибровка НАП не проводилась (расчет для обычного кодового потребителя). Смоделированные задержки из кадра рассчитаны с помощью калиброванного приемника
- **Выводы**
 - 5. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05. International GNSS Service
[\[https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf\]](https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf)

Однослойная модель ионосферы

Модель измерений псевдодальностей:

$$P_{GS,C1C}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,1}^{SC} + b_{GS(SC),C1C} + b_{C1C}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1C}^{SC}$$

$$P_{GS,C2C}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,2}^{SC} + b_{GS(SC),C2C} + b_{C2C}^{SC} + \varepsilon_{GS,C2C}^{SC}$$

$\overline{P_{GS}^{SC}} = \overline{\rho_{GS}^{SC}} + T_{GS}^{SC} + c(dt_{GS} - dt^{SC})$ - расчетные значения псевдодальностей с учетом тропосферной погрешности и смещений показаний часов НАП и КА

$b_{GS(SC),C1C}, b_{GS(SC),C2C}$ - систематические задержки в НАП для C1C, C2C, в общем случае зависят и от КА

$b_{C1C}^{SC}, b_{C2C}^{SC}$ - систематические задержки в бортовой аппаратуре КА для C1C, C2C

Ионосферная задержка зависит от частоты и электронного содержания вдоль всего пути сигнала:

$$I = \frac{40.31}{f^2} \cdot \int N_e dl = \frac{40.31}{f^2} \cdot STEC$$

Безгеометрическая комбинация кодовых измерений:

$$P_{GS,C1C}^{SC} - P_{GS,C2C}^{SC} = 40.31 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot STEC + DCB_{GS,C1C-C2C}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1C-C2C}^{SC,GF}$$

где

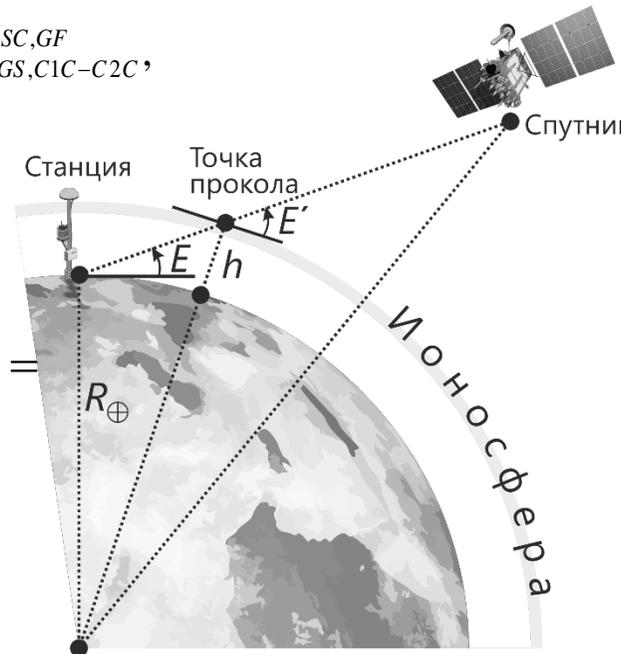
$$DCB_{GS,C1C-C2C}^{SC} = DCB_{GS(SC),C1C-C2C} + DCB_{C1C-C2C}^{SC} = (b_{GS(SC),C1C} - b_{GS(SC),C2C}) + (b_{C1C}^{SC} - b_{C2C}^{SC}),$$

DCB – differential code bias, дифференциальная кодовая задержка

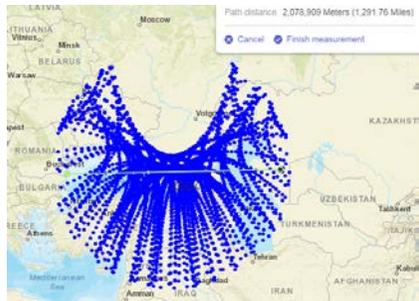
Однослойная модель ионосферы, высота слоя $h = 450$ км. $STEC$ и $VTEC$ – наклонная и вертикальная концентрация электронов в ионосфере, $m(E)$ - функция отображения.

$$STEC = VTEC \cdot m(E) = VTEC \cdot \frac{1}{\sin(E')}$$

$$\cos(E') = \frac{R_{\oplus}}{R_{\oplus} + h} \cos(E)$$



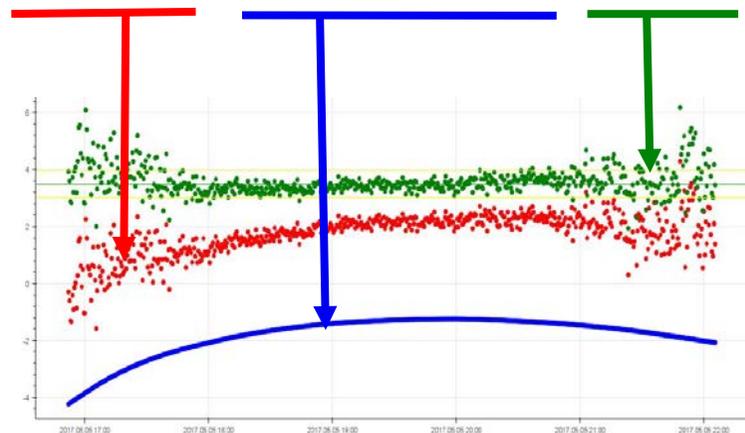
Алгоритм уточнения межчастотных дифференциальных кодовых задержек КА ГЛОНАСС (АФНС) с помощью моделирования локальной ионосферы



$$VTEC(\varphi, t) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{m_{max}} \{E_{nm}(\varphi - \varphi_0)^n \cdot t^m\} + \sum_{k=0}^{k_{max}} \{C_k \cos(kt) + S_k \sin(kt)\}$$

Для каждой станции моделируется локальная ионосфера в зависимости от широты φ и солнечно-фиксированной долготы $t = \lambda - \lambda_{SUN}$.

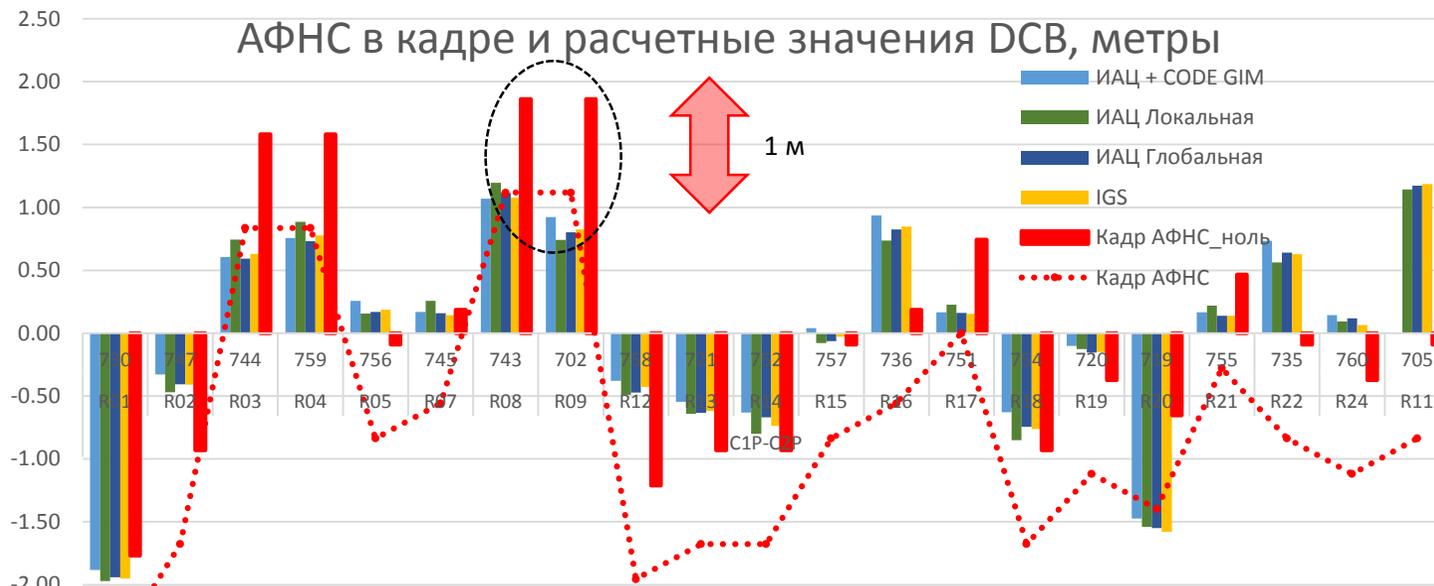
$$P_{GS,C1C}^{SC} - P_{GS,C2C}^{SC} = 40.31 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot STEC + DCB_{GS,C1C-C2C}^{SC} + \varepsilon$$



В ИАЦ КВНО расчет DCB ГЛОНАСС и других ГНСС происходит ежедневно с 2017г, результаты публикуются в формате SINEX_BIAS:

<ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/Y/YYYY/rapid/>

Точность задержки АФНС в кадре ГЛОНАСС и др. ГНСС, сравнение с DCB ИАЦ КВНО и IGS



$$T_{gd} = -DCB_{C1P-C2P}^{SC} = b_{C2P}^{SC} - b_{C1P}^{SC}$$

ГНСС	DCB и Tgd	Кадр vs ИАЦ КВНО	Кадр vs IGS	IGS vs ИАЦ КВНО
GPS	DCB(C1W-C2W) vs Tgd	0.06	0.08	0.04
GALILEO	DCB(C1X-C5X) vs Tgd(E1-E5a)	0.08	0.08	0.03
	DCB(C1X-C7X) vs Tgd(E1-E5b)	0.05	0.04	0.02
BeiDou	BDS-2 DCB(C2I-C6I) vs Tgd(B3-B1)	0.08	0.08	0.07
	BDS-3 DCB(C2I-C6I) vs Tgd(B3-B1)	0.21	0.2	0.05
ГЛОНАСС	DCB(C1P-C2P) vs Tgd (АФНС)	0.54	0.59	0.08

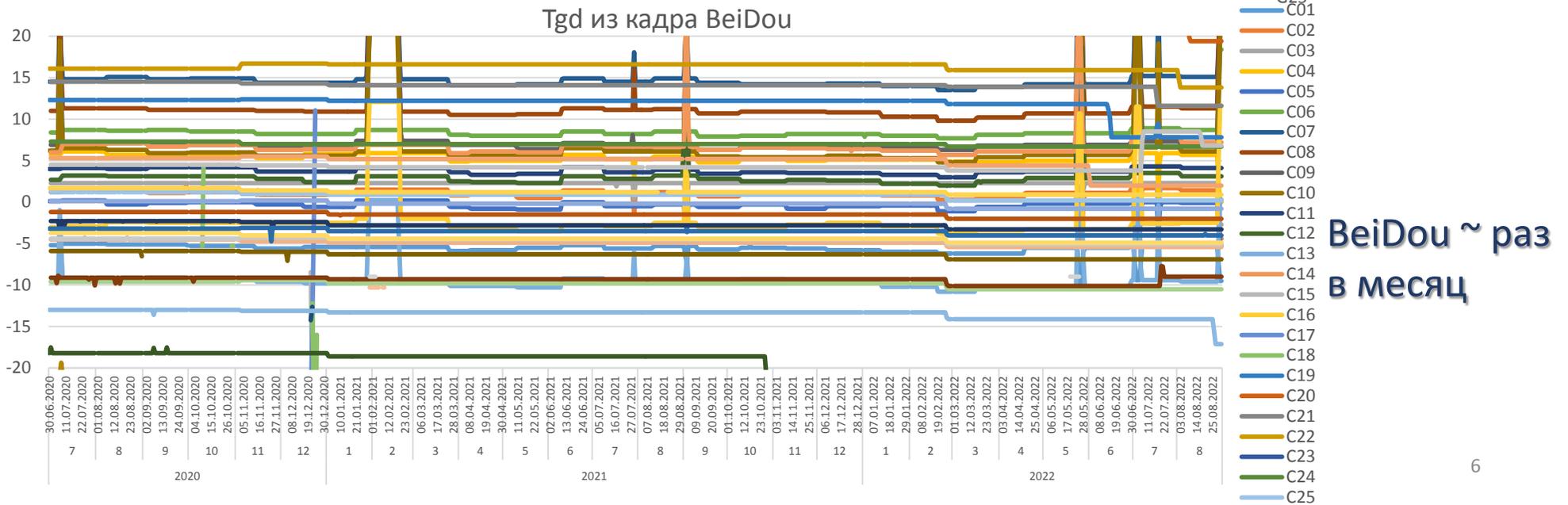
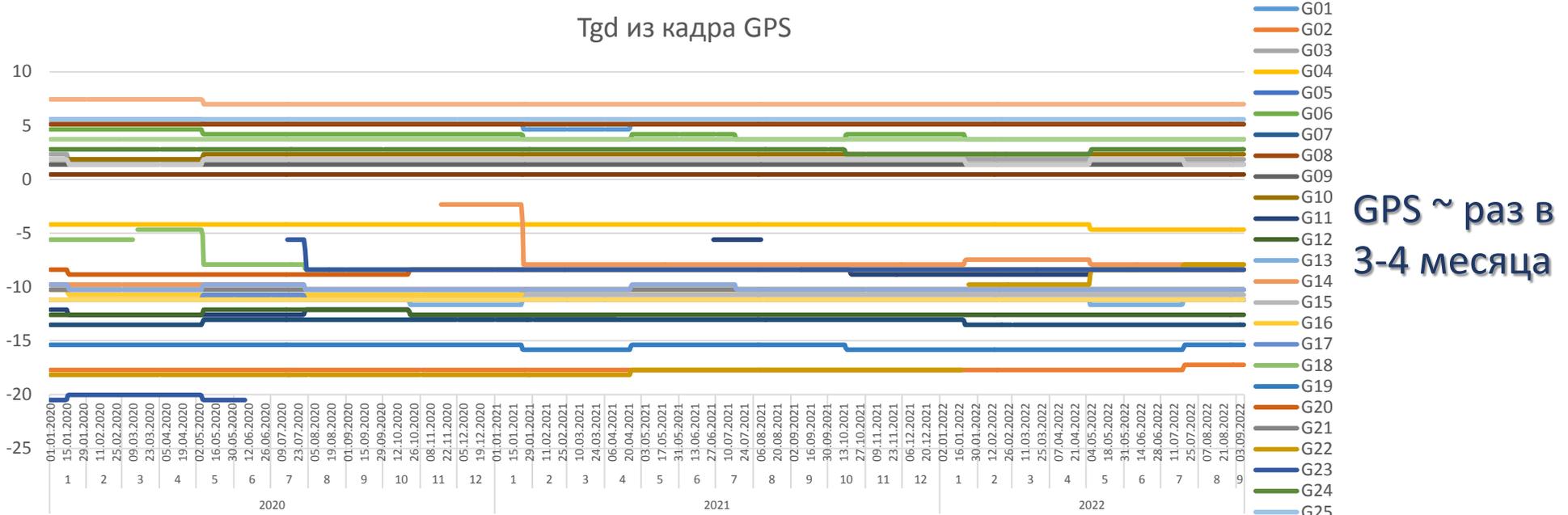
(-) Погрешность значений АФНС ГЛОНАСС в навигационных кадрах (> 0.5 м)

(для других ГНСС <=0.1 м)

(-) Для ГЛОНАСС задержка АФНС – паспортное значение КА

(+) Есть потенциал для улучшения точности потребителей ГЛОНАСС

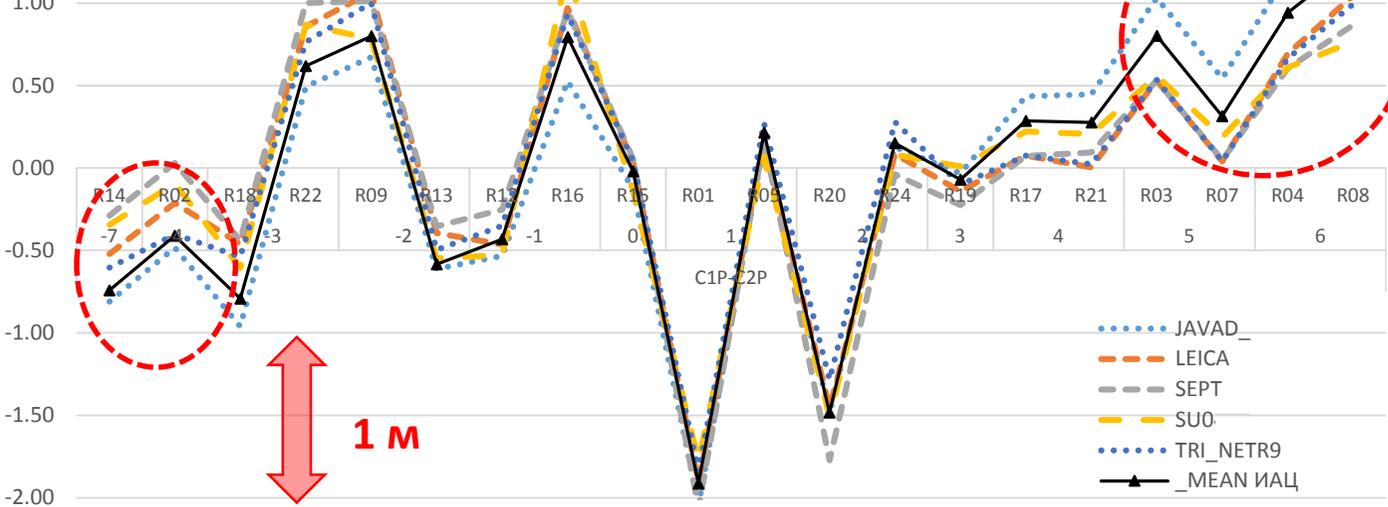
Как часто происходит пересчет межчастотных задержек КА (Tgd) в кадрах других ГНСС ?



Влияние литерной зависимости ГЛОНАСС на расчет DCB. Потребность в

калиброванном приемнике

ГЛОНАСС DCB C1P-C2P - для разных типов НАП, метры



СКО дифференциальных кодовых задержек ГЛОНАСС относительно усредненных значений, м

СКО ГЛОНАСС DCB C1P-C2P, метры				
JAVAD (54)	LEICA (10)	SEPT (41)	TRI_NETR9 (59)	SU0* (1)
0,15	0,20	0,30	0,18	0,23

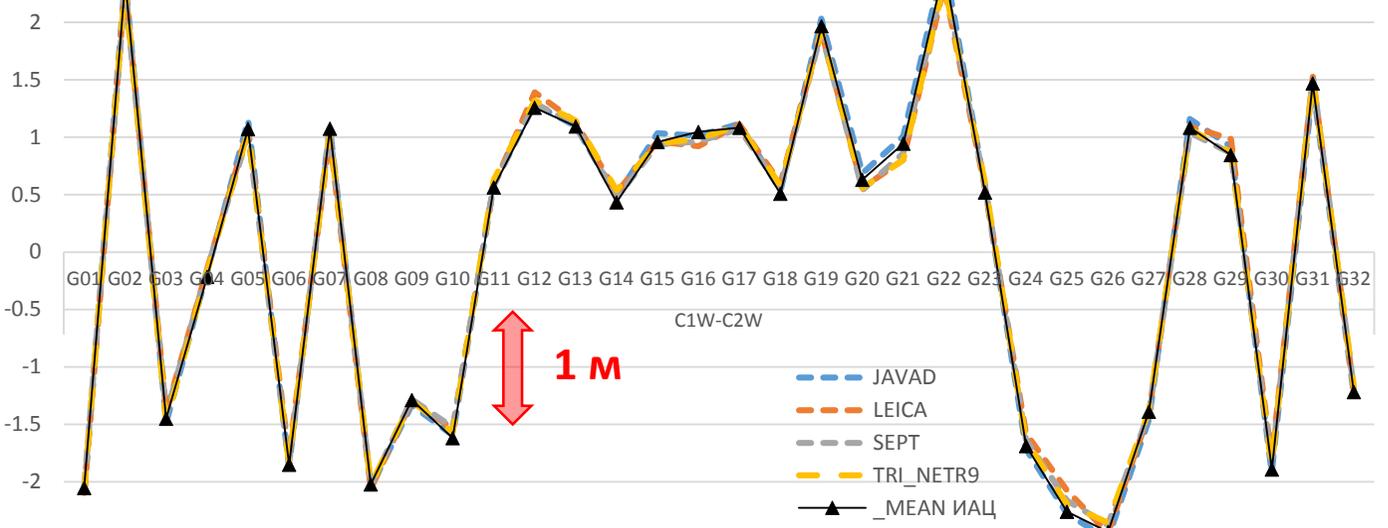
СКО ГЛОНАСС DCB C1C-C2C, метры				
JAVAD (57)	LEICA (31)	SEPT (43)	TRI_NETR9 (61)	SU0* (1)
0,13	0,18	0,28	0,25	0,41

СКП дифференциальных кодовых задержек GPS относительно усредненных значений, м

СКО GPS DCB C1W-C2W, метры				
JAVAD (59)	LEICA (6)	SEPT (44)	TRI_NETR9 (12)	SU0* (1)
0,05	0,08	0,05	0,06	0,01

*Митрикас В. В., Скакун И. О., Аржанников А. А., Федотов В. Н. Применение калиброванного навигационного приемника для оценки погрешности измерения за счёт космического сегмента (SISRE) ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. - 2021. - № 2 (26). - С. 79–103.

GPS DCB C1W-C2W - для разных типов НАП, метры



(-) В зависимости от типа и ПО НАП отличия для ГЛОНАСС достигают 0.7 м (крайние литеры)

(+) Калиброванный приемник может решить проблему

Построение глобальных ионосферных карт (GIM)

В ИАЦ КВНО для уточнения параметров глобальных карт ПЭС ионосферы используются открытые измерения около 300 станций IGS, результаты публикуются в формате IONEX *

В качестве модели используется разложение VTEC по сферическим гармоникам (порядок разложения $n_{max} = 15$; 12 наборов коэффициентов гармоник для суточного интервала):

$$VTEC(\varphi, t) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n P_{nm} \sin \varphi \{C_{nm} \cos mt + S_{nm} \sin mt\}$$

φ - широта

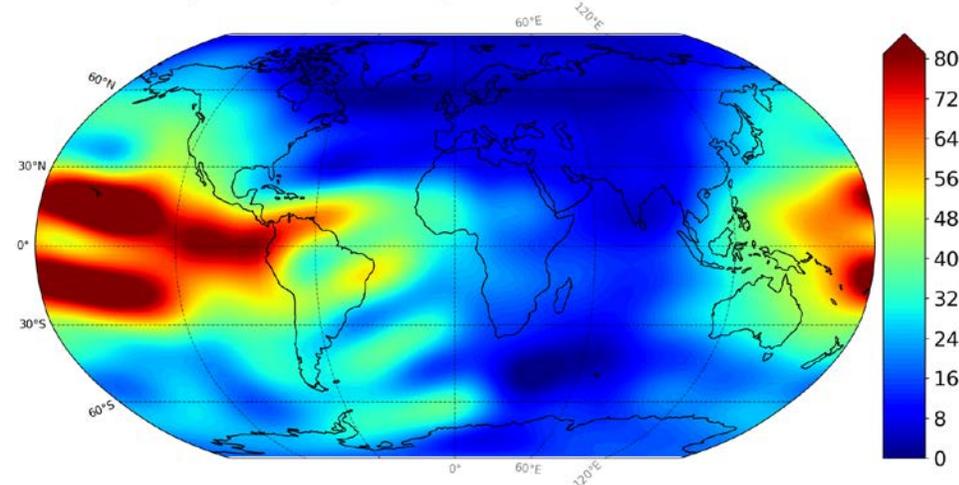
$t = \lambda - \lambda_{SUN}$ - солнечно-фиксированная долгота

Распределение ошибок определения ионосферы соответствует распределению станций (над океанами ошибка расчета выше).

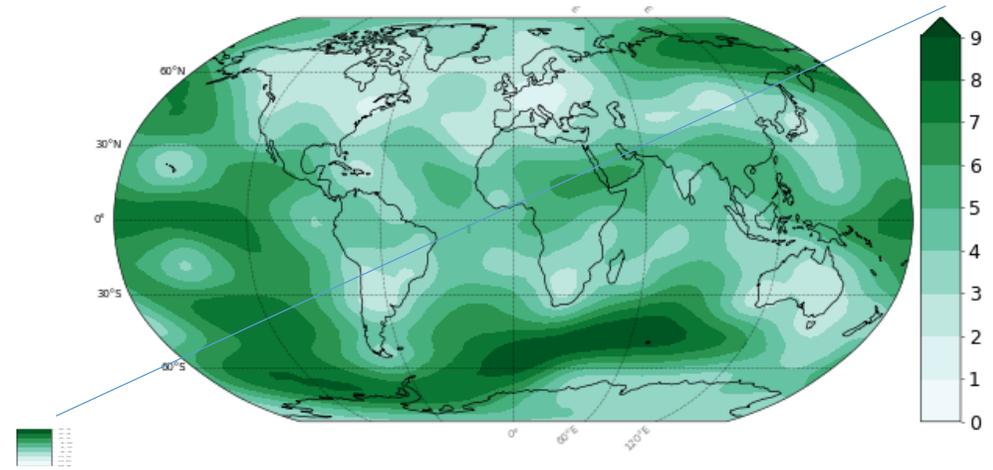
1 ед. TECu = 10^{16} электронов / кв. метр, что соответствует задержке в ~ 16 см для L1

Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО, 24 янв. 2023, TECu

ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш, IAC PNT 2023-01-24 00:00



Ошибка расчета, 24 янв. 2023, TECu



* Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО <https://www.glonass-iac.ru/iono/>

Файлы IONEX ИАЦ КВНО публикуются 2018-2023 гг.

Точность расчета глобальных карт ионосферы (GIM): ИАЦ КВНО vs IGS vs кадр GPS (24 янв. 2023)

Матрицы взаимных СКО, метры L1

По всей территории, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.55	0.63	0.67	2.04
WHU	0.55		0.57	0.65	2.25
JPL	0.63	0.57		0.64	2.22
ИАЦ КВНО	0.67	0.65	0.64		2.08
Кадр GPS	2.04	2.25	2.22	2.08	

Над материками, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.49	0.58	0.46	2.05
WHU	0.49		0.50	0.54	2.21
JPL	0.58	0.50		0.53	2.22
ИАЦ КВНО	0.46	0.54	0.53		2.11
Кадр GPS	2.05	2.21	2.22	2.11	

Точность расчета глобальной ионосферы ИАЦ КВНО ~0.6 м. Над материкам ~0.5 м

Глобальные карты IGS согласуются друг с другом на уровне 0.5 – 0.7 м

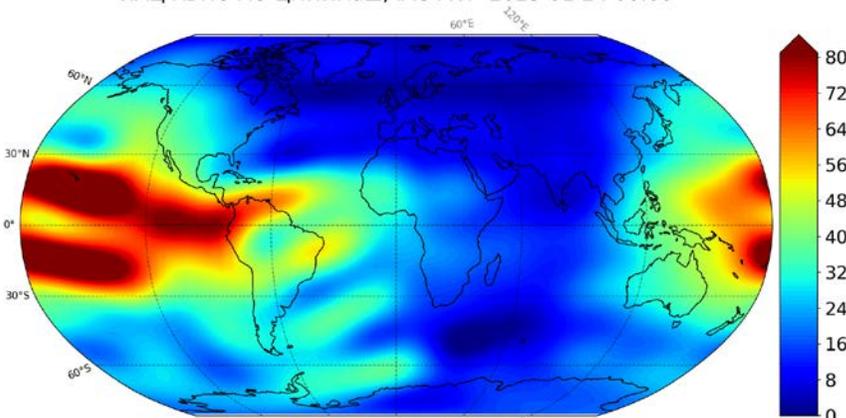
Средняя вертикальная ион. задержка: 5.6 м

Модель Клубучара в кадре GPS ~2.1 м

Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО, 24 янв. 2023, TECu

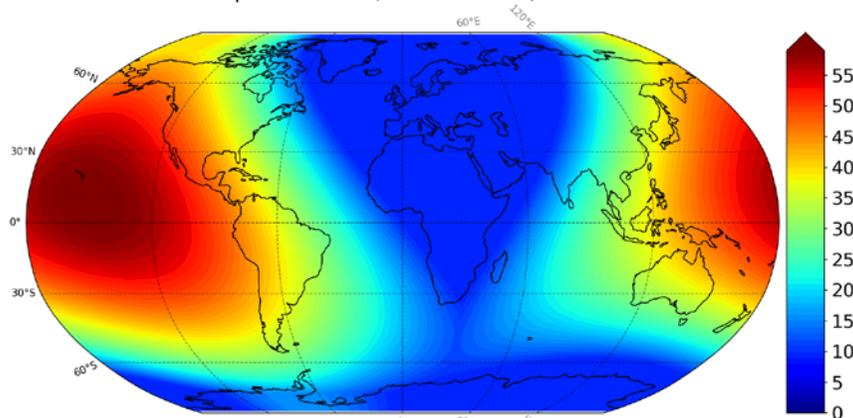
Модель ионосферы из кадра GPS, 24 янв. 2023, TECu

ИАЦ КВНО АО ЦНИИмаш, IAC PNT 2023-01-24 00:00



ЭТАЛОН (Э)

Klobuchar Ionospheric Model (GPS broadcast) 2023-01-24 00:00



МОДЕЛЬ (М)

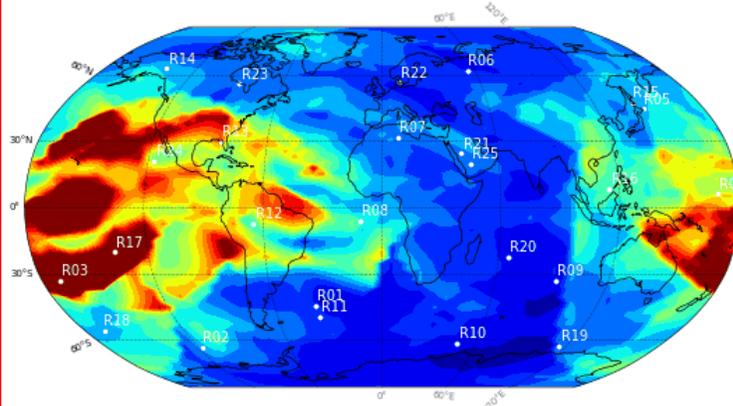
Точность расчета глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО сравнима с существующими аналогами

Пересчет GIM в пространственные карты ионосферной ошибки (3d) для ГЛОНАСС и GPS за 24 янв. 2023г, метры

Без учета модели ионосферы

PR(Э) * PDOP

PR(Э) * PDOP 2023-01-24 00:00



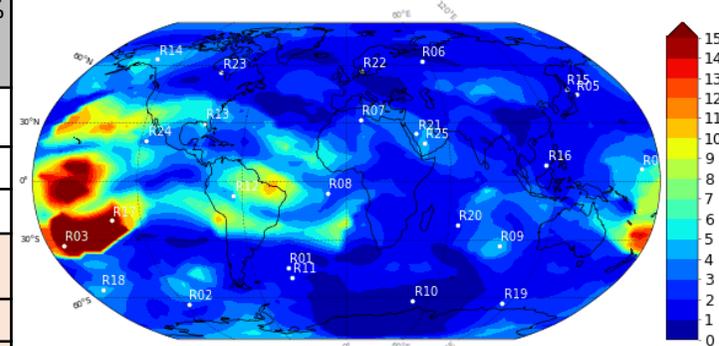
ГЛОНАСС, PDOP = 2.0 \ 1.8

ГЛОНАСС		Без модели, м	+ мод. Клубучар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	5.7	3.0	47%
	День	7.3	3.4	54%
	Ночь	4.1	2.7	34%
Россия	Сутки	2.7	2.4	10%
	День	3.3	2.8	12%
	Ночь	1.7	1.7	0%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

PR(Э-М) * PDOP

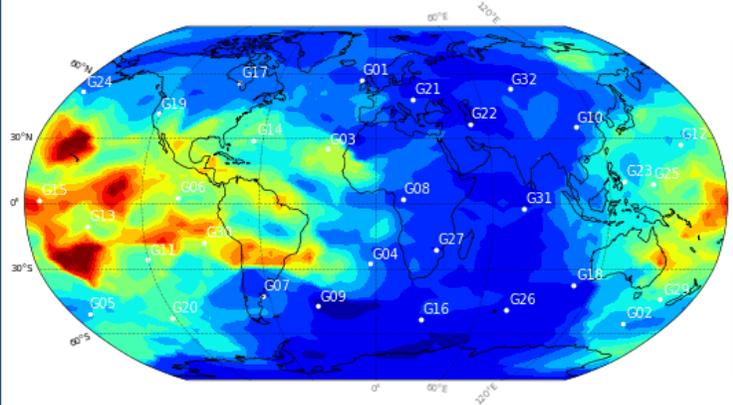
PR(Э - М) * PDOP 2023-01-24 00:00



Без учета модели ионосферы

PR(Э) * PDOP

PR(Э) * PDOP 2023-01-24 00:00



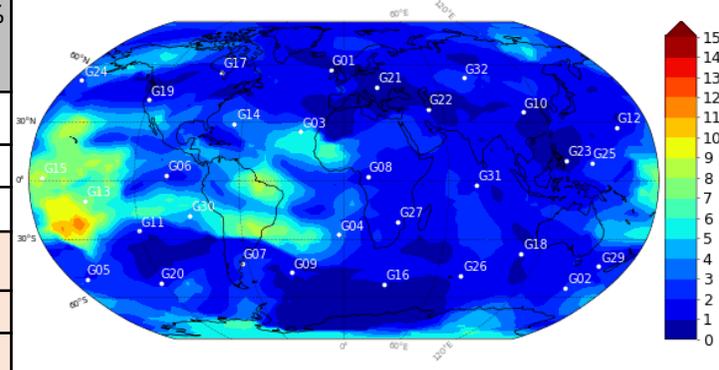
GPS, PDOP = 1.6 \ 1.6

GPS		Без модели, м	+ мод. Клубучар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	4.8	2.6	48%
	День	6.1	3.2	55%
	Ночь	3.3	1.6	34%
Россия	Сутки	2.6	2.4	4%
	День	3.2	2.9	8%
	Ночь	1.7	1.7	0%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

PR(Э-М) * PDOP

PR(Э - М) * PDOP 2023-01-24 00:00

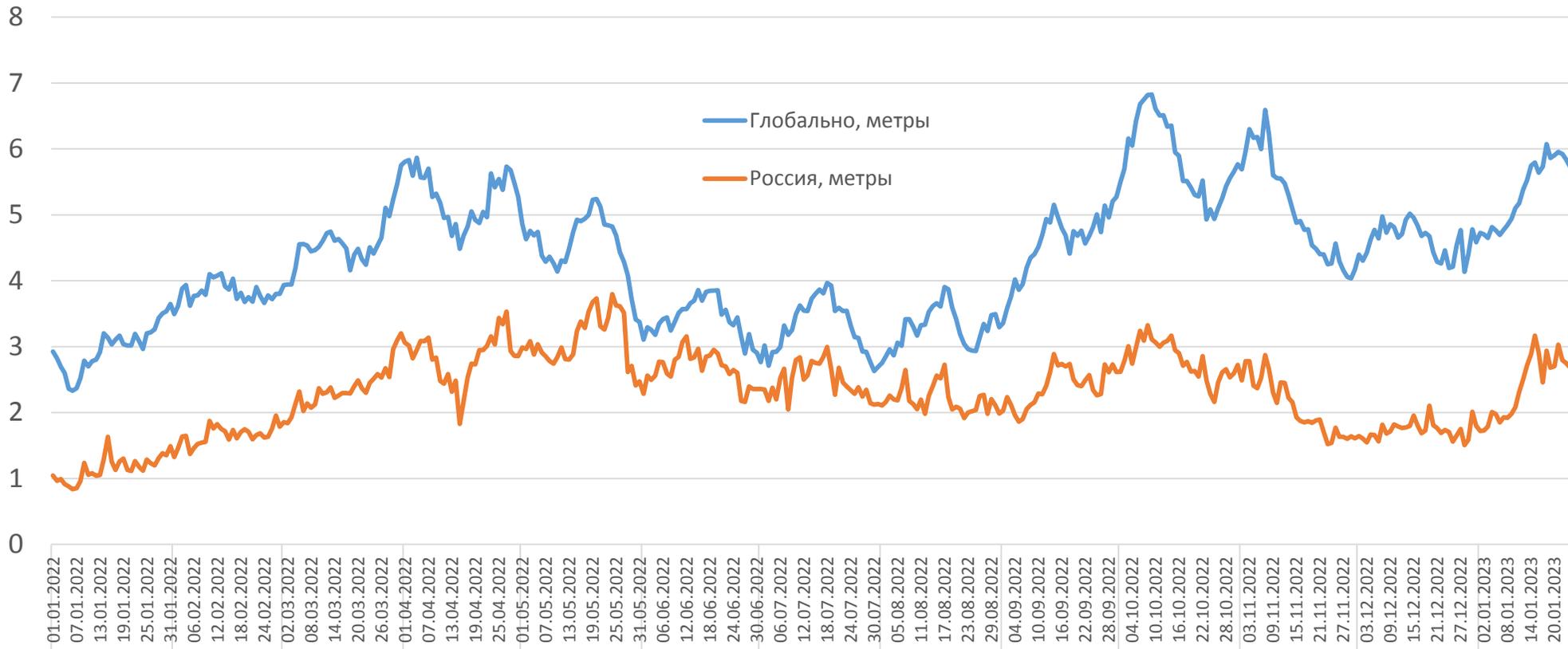


*PR - pseudorange

Средняя вертикальная ионосферная задержка L1 на 1 апр. 2022г: 5.6 м

Расчет вклада ионосферы в ошибку местоопределения ГЛОНАСС при пересчете из глобальных карт ионосферы янв.2022-янв.2023

Вклад ионосферы в точность местоопределения ГЛОНАСС по дням, янв.2022 - янв.2023, метры.

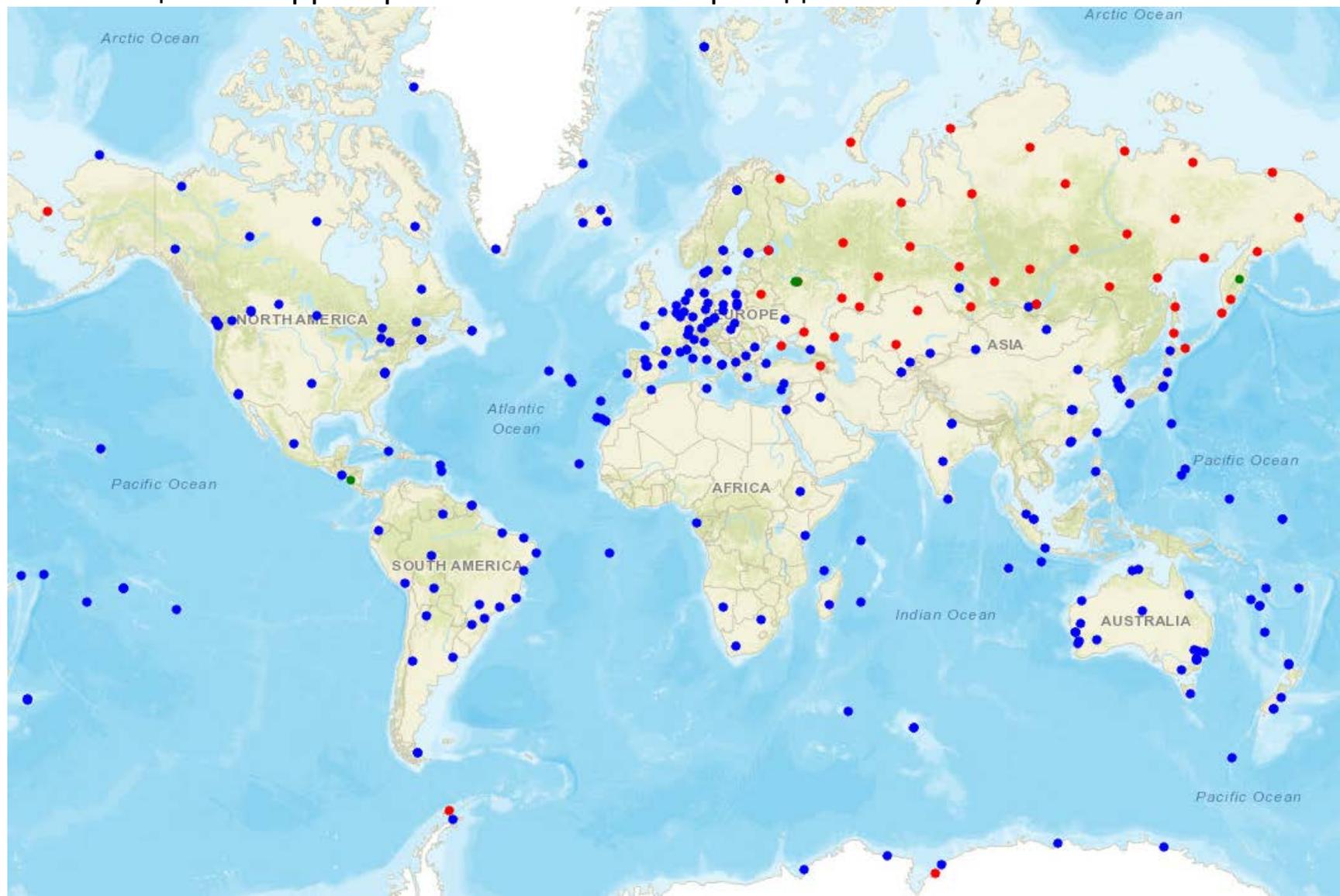


- **В ИАЦ КВНО расчет пространственных карт ионосферных ошибок и среднесуточного вклада ионосферы в ошибку местоопределения ГЛОНАСС происходит ежедневно из глобальных карт ионосферы, за 24 янв. 2023г. по России 2.7м, глобально 5.7м**
- **Средняя глобальная ионосферная ошибка выше Российской за счет высокой активности ионосферы на экваториальных широтах, а также за счет соотношения PDOP ГЛОНАСС ($\sim 2.0 / 1.8$)**

Эксперимент 2023: фактическая оценка учета аппаратных задержек КА и параметров ионосферы в точность местоопределения (300 станций)

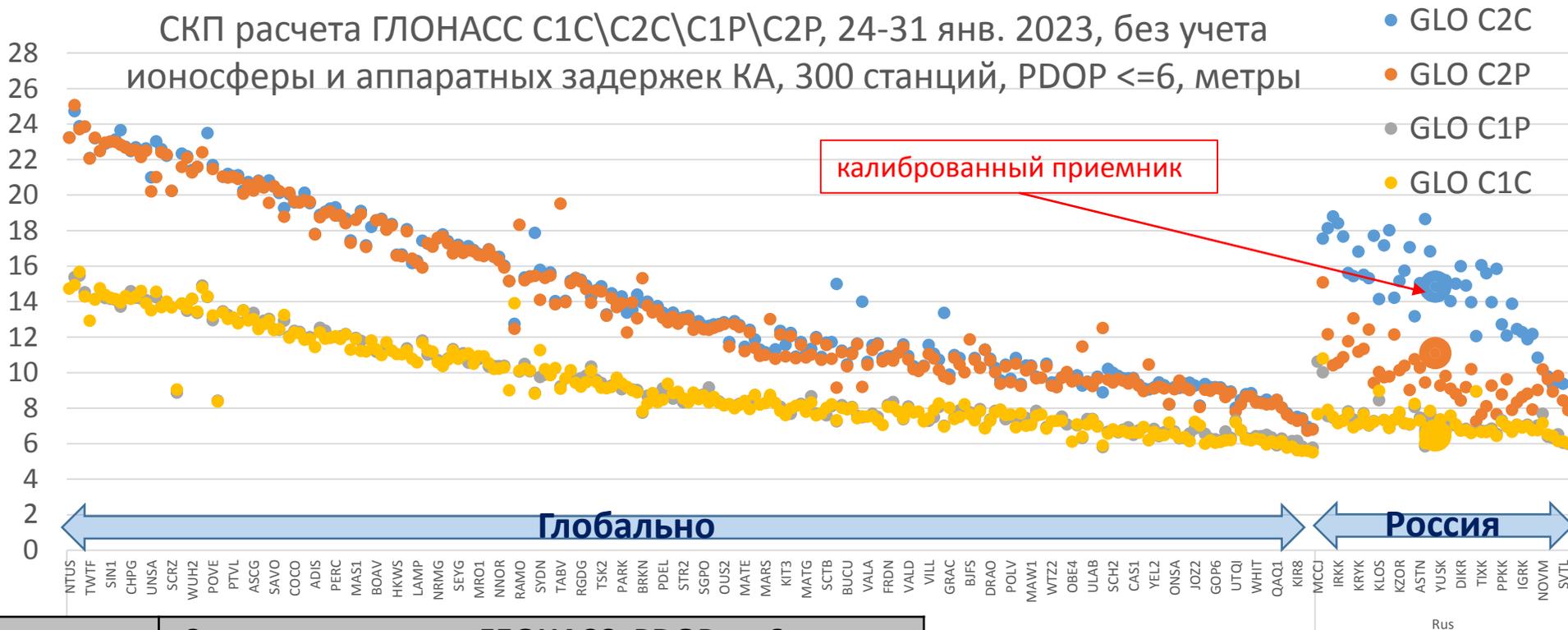
В расчете участвовало 300 станций: 250 IGS + 45 СДКМ (ПКС) + 5 Доверие (ИАЦ).

Из них 50 станций на территории России. Расчет проводился за 8 суток с 24.01.2023 по 31.01.2023



БАЗОВЫЙ РАСЧЕТ ГЛОНАСС без учета ионосферы и аппаратных задержек C1C, C2C, C1P, C2P

СКП расчета ГЛОНАСС C1C\C2C\C1P\C2P, 24-31 янв. 2023, без учета ионосферы и аппаратных задержек КА, 300 станций, PDOP <=6, метры



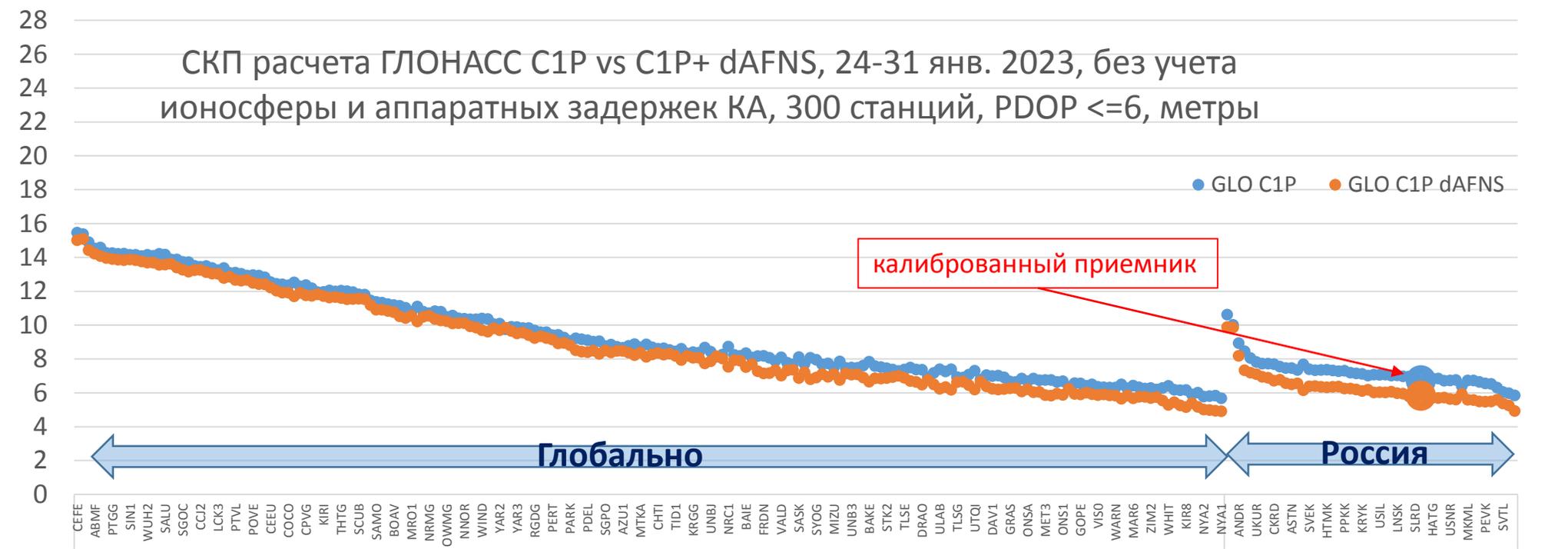
Тип расчета	Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры					
	Россия, 50 станций			Глобально, 300 станций		
	Медиана	СКП	Доступность	Медиана	СКП	Доступность
GLO C1C	5.50	7.19	99.0%	6.99	9.02	99.1%
GLO C1P	5.46	7.25	98.8%	6.97	9.00	99.0%
GLO C2C	6.88	14.67	98.9%	10.06	14.31	97.3%
GLO C2P	6.50	10.17	98.5%	9.81	13.52	96.8%

ЧВП в кадре ГЛОНАСС привязаны к C1P, поэтому точность по L2 без учета аппаратных задержек хуже L1.

C1C и C1P примерно сравнимы (СКП глобально 9 м, Россия 7.2 м)

C2C незначительно уступает C2P (глобально 14.3 м \ 13.5 м, по России 14.6 м \ 10.2 м)

Улучшение точности ГЛОНАСС С1Р за счет использования корректной межчастотной задержки АФНС



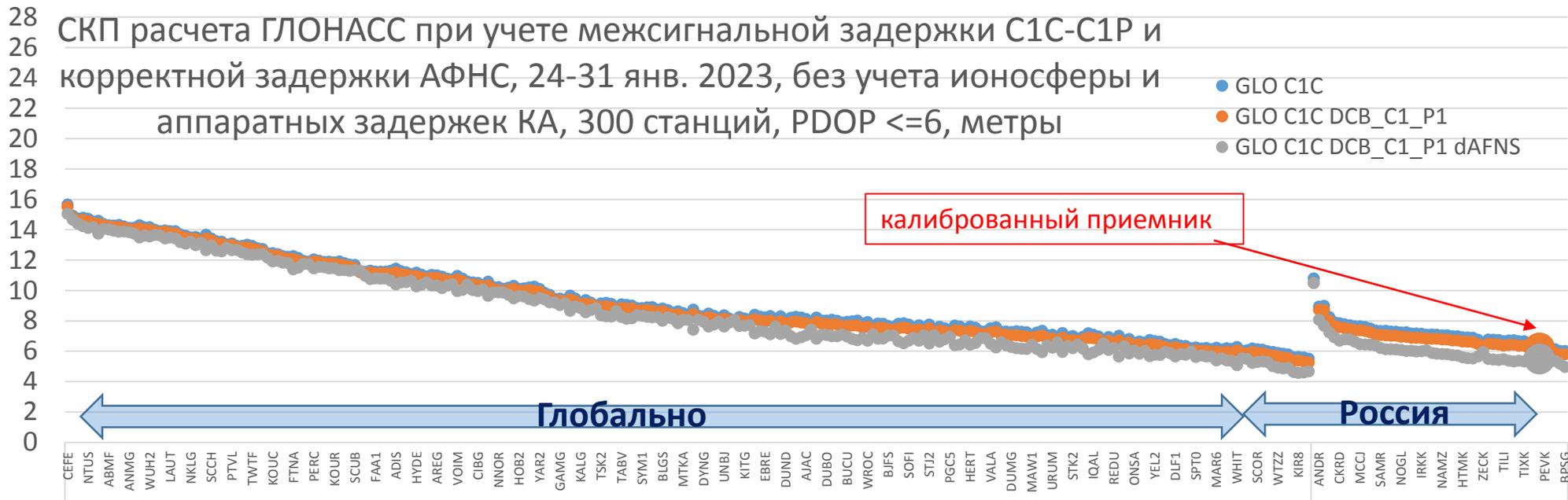
Тип расчета	Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры			
	Россия, 50 станций		Глобально, 300 станций	
	Медиана	СКП	Медиана	СКП
GLO C1P	5.46	7.25	6.97	9.00
GLO C1P dAFNS	4.45	6.29	6.33	8.39
Улучшение, %	18.5%	13.2%	9.1%	6.8%
Вклад dAFNS	3.17	3.60	2.90	3.26

ЧВП в кадре ГЛОНАСС привязаны к С1Р, но содержат ошибку паспортных задержек АФНС
Перерасчет (С1Р dAFNS) был проведен при учете значений DCB (С1Р-С2Р) калиброванного приемника ВНИИФТРИ SU0*

$$Err_{АФНС,С1Р} = k_2 \cdot (DCB_{SU0,C2P-C1P}^{SC} - T_{АФНС}) \approx 1.53 \cdot \Delta T_{АФНС}$$

При корректном значении межчастотной задержки АФНС улучшение точности С1Р составило 6.8 % глобально (вклад 3.2м) и 13% по территории России (вклад 3.6 м)

Улучшение точности ГЛОНАСС С1С за счет использования корректной межчастотной задержки АФНС и межсигнальной задержки С1С-С1Р



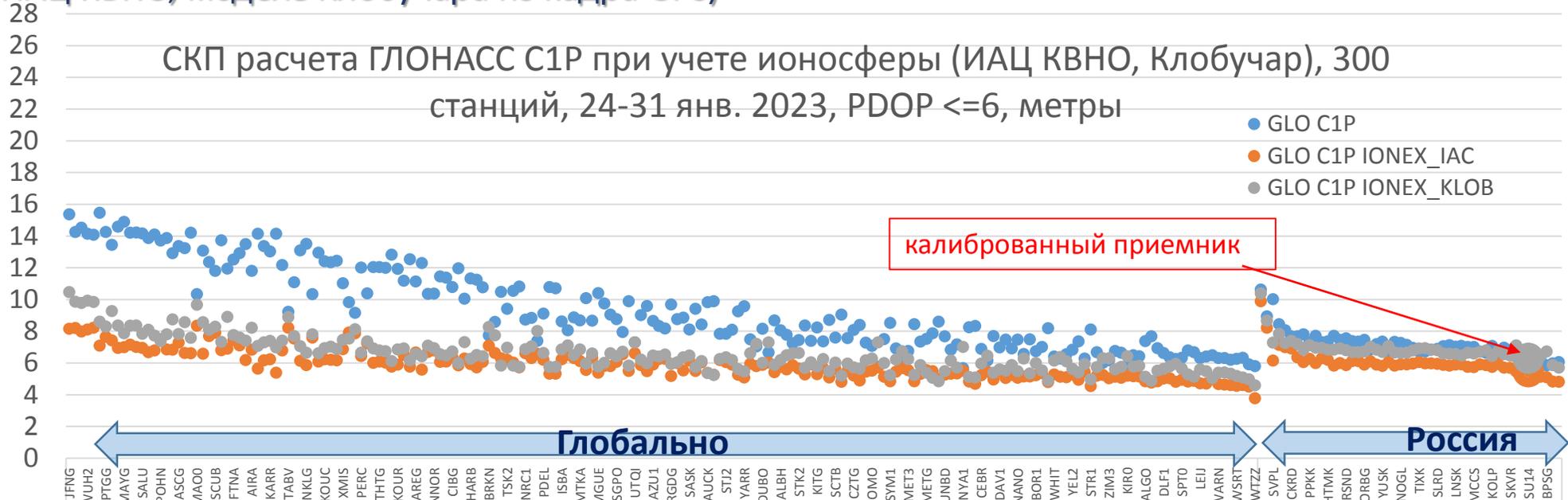
Тип расчета	Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры			
	Россия, 50 станций		Глобально, 300 станций	
	Медиана	СКП	Медиана	СКП
GLO C1C	5.50	7.19	6.99	9.02
GLO C1C DCB_C1_P1	5.24	6.92	6.80	8.82
GLO C1C DCB_C1_P1 dAFNS	4.35	6.07	6.22	8.27
DCB_C1_P1, улучшение %	4.7%	3.7%	2.8%	2.2%
DCB_C1_P1, вклад, м	1.7	1.9	1.6	1.9
DCB_C1_P1 dAFNS, улучшение %	20.9%	15.6%	10.9%	8.3%
DCB_C1_P1 dAFNS, вклад, м	3.4	3.9	3.2	3.6

Помимо учета корректной межчастотной задержки АФНС, для С1С необходимо учитывать межсигнальную задержку DCB (С1С-С1Р), которая была рассчитана по калиброванному приемнику.

Учет межсигнальной задержки С1С-С1Р незначительно улучшает точность решения (2-4%, вклад ошибки 1.9 м).

Корректная межчастотная задержка АФНС значительно улучшает точность С1С: 8.3% глобально (вклад 3.6м), 15.6% на территории России (вклад 3.9м)

Улучшение точности ГЛОНАСС С1Р за счет использования параметров ионосферы (глобальная карта ИАЦ КВНО, модель Клубучара из кадра GPS)



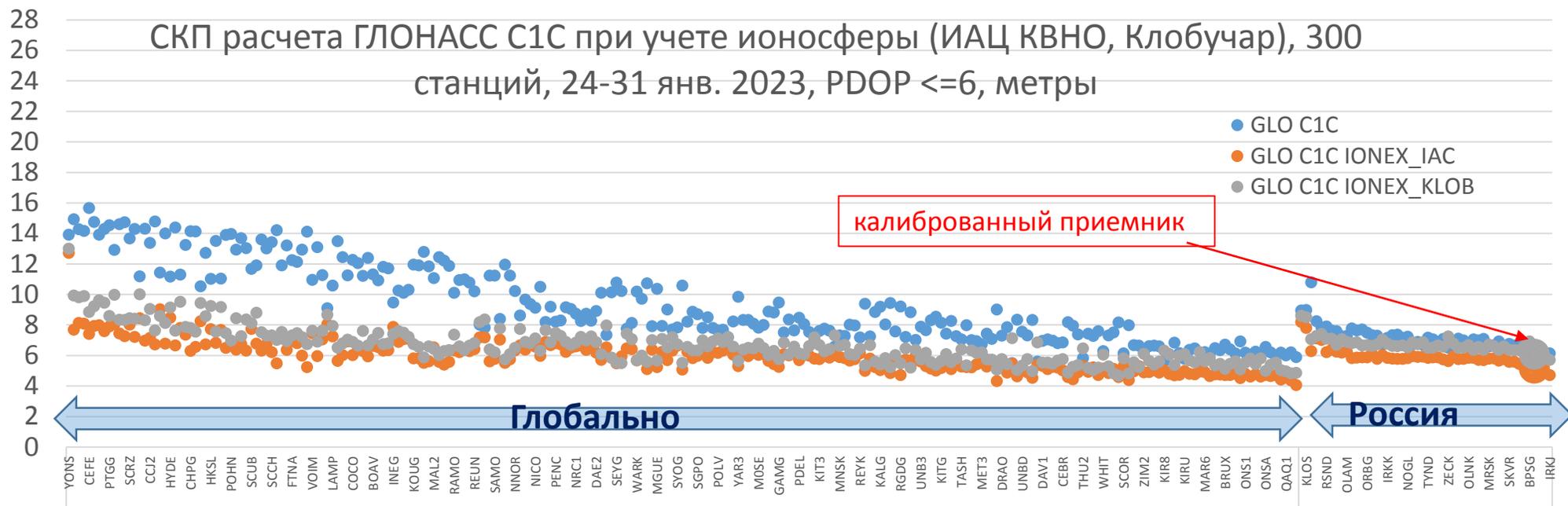
Тип расчета	Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры			
	Россия, 50 станций		Глобально, 300 станций	
	Медиана	СКП	Медиана	СКП
GLO C1P	5.46	7.25	6.97	9.00
GLO C1P IONEX_KLOB	5.36	6.89	5.13	6.63
GLO C1P IONEX_IAC	4.53	6.05	4.49	5.94
IONEX_KLOB, улучшение %	1.9%	5.0%	26.4%	26.3%
IONEX_KLOB, вклад, м	1.1	2.3	4.7	6.1
IONEX_IAC, улучшение %	17.0%	16.6%	35.5%	34.0%
IONEX_IAC, вклад, м	3.0	4.0	5.3	6.8

Модель ионосферы Клубучара из кадра GPS незначительно улучшает точность С1Р на территории России (5%) и значительно глобально (26%).

Глобальная карта ионосферы ИАЦ значительно улучшает точность С1Р как на территории России (16.6%), так и глобально (34%).

Вклад ионосферы в точность С1Р составляет 4.0 м на территории России и 6.8 м глобально (янв. 2023)

Улучшение точности ГЛОНАСС С1С за счет использования параметров ионосферы (глобальная карта ИАЦ КВНО, модель Клубучара из кадра GPS)



Модель ионосферы Клубуара ^{Rus} из кадра GPS незначительно улучшает точность С1С на территории России (6%) и значительно глобально (26%).

Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО значительно улучшает точность С1С как на территории России (17.5%), так и глобально (33.7%).

Тип расчета	Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры			
	Россия, 50 станций		Глобально, 300 станций	
	Медиана	СКП	Медиана	СКП
GLO C1C	5.50	7.19	6.99	9.02
GLO C1C IONEX_KLOB	5.33	6.75	5.23	6.69
GLO C1C IONEX_IAC	4.55	5.93	4.58	5.98
IONEX_KLOB, улучшение %	3.0%	6.1%	25.2%	25.9%
IONEX_KLOB, вклад, м	1.3	2.5	4.6	6.1
IONEX_IAC, улучшение %	17.3%	17.5%	34.5%	33.7%
IONEX_IAC, вклад, м	3.1	4.1	5.3	6.8

Вклад ионосферы в точность С1С составляет 4.1 м на территории России и 6.8 м глобально (янв. 2023)

При учете ионосферы ИАЦ точность С1С примерно одинакова как на территории России, так и глобально (5.9м)

2-ЧАСТОТНЫЙ ПОТРЕБИТЕЛЬ ГЛОНАСС: корректный учет задержки АФНС 2-частотного потребителя



Тип расчета	Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры		
	Глобально, 300 станций		
	Медиана	СКП	Доступность
GLO C1P-C2P	5.78	9.00	96.64%
GLO C1P-C2P AFNS	4.01	6.89	96.59%

ЧВП в кадре ГЛОНАСС привязаны к С1Р. Поэтому 2-частотный потребитель должен к поправкам часов прибавить $k_2 \cdot \text{АФНС}$:

$$t_{sv_{C1P-C2P}} = t_{sv_{C1P}} + k_2 \cdot T_{\text{АФНС}} \approx t_{sv_{C1P}} + 1.53 \cdot T_{\text{АФНС}}$$

$$\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2} = \frac{9^2}{7^2}; \quad k_2 = \frac{1}{\gamma - 1} = 1.53125$$

Учет АФНС улучшает базовое решение С1Р-С2Р на 23% (вклад ошибки 5.8м)

Уровень доступности для 2-частотных потребителей ГЛОНАСС (96.6%) хуже, чем для одночастотных (99%) из-за существования одночастотных КА ГЛОНАСС.

Сводная таблица. Точность местоопределения решения кодового ГЛОНАСС

Тип расчета					Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры							
					Россия, 50 станций				Глобально, 300 станций			
IONO	DCB		Изм	Название расчета	В плане		Пространственная		В плане		Пространственная	
	C1P-C2P	C1C-C1P			Медиа на	СКП	Медиа на	СКП	Медиа на	СКП	Медиа на	СКП
			C1C	GLO C1C	2.64	3.31	5.50	7.19	2.85	3.65	6.99	9.02
			C2C	GLO C2C	2.76	7.16	6.88	14.67	3.38	5.36	10.06	14.31
		+	C1C	GLO C1C DCB_C1_P1	2.50	3.16	5.24	6.92	2.72	3.51	6.80	8.82
	+	+	C1C	GLO C1C DCB_C1_P1 dAFNS	1.96	2.62	4.35	6.07	2.26	3.02	6.22	8.27
Klob			C1C	GLO C1C IONEX_KLOB	2.77	3.41	5.33	6.75	2.85	3.62	5.23	6.69
IAC			C1C	GLO C1C IONEX_IAC	2.61	3.26	4.55	5.93	2.56	3.25	4.58	5.98
Klob		+	C1C	GLO C1C DCB_C1_P1 IONEX_KLOB	2.61	3.24	5.16	6.53	2.71	3.46	5.05	6.47
IAC		+		GLO C1C DCB_C1_P1 IONEX_IAC	2.46	3.10	4.30	5.65	2.42	3.09	4.35	5.72
Klob	+	+	C1C	GLO C1C DCB_C1_P1 dAFNS IONEX_KLOB	2.03	2.64	4.50	5.81	2.22	2.94	4.43	5.84
IAC	+	+	C1C	GLO C1C DCB_C1_P1 dAFNS IONEX_IAC	1.87	2.49	3.36	4.68	1.91	2.55	3.61	4.95
			C1P	GLO C1P	2.64	3.45	5.46	7.25	2.79	3.62	6.97	9.00
			C2P	GLO C2P	2.64	4.55	6.50	10.17	3.30	4.93	9.81	13.52
	+		C1P	GLO C1P dAFNS	2.01	2.83	4.45	6.29	2.29	3.09	6.33	8.39
Klob			C1P	GLO C1P IONEX_KLOB	2.78	3.53	5.36	6.89	2.80	3.59	5.13	6.63
IAC			C1P	GLO C1P IONEX_IAC	2.63	3.39	4.53	6.05	2.52	3.24	4.49	5.94
Klob	+		C1P	GLO C1P dAFNS IONEX_KLOB	2.13	2.86	4.60	6.06	2.26	3.03	4.45	5.92
IAC	+		C1P	GLO C1P dAFNS IONEX_IAC	1.95	2.72	3.47	4.97	1.94	2.65	3.66	5.09
Free			C1P-C2P	GLO C1P-C2P					3.18	4.89	5.78	9.00
Free	+		C1P-C2P	GLO C1P-C2P AFNS					2.16	3.73	4.01	6.89

- Во всех расчетах калибровка НАП не проводилась, использовались кодовые измерения, дифференциальные кодовые задержки (расчет по калиброванному приемнику), карты ионосферы ИАЦ КВНО и модель Клубучара
- Потенциальное улучшение точности одночастотного потребителя ГЛОНАСС за счет задержек, которые планируется передавать в кадре ГЛОНАСС:
 - за счет межсигнальных задержек C1C-C1P составит 2.2% по России и 3.7% глобально (вклад ~1.9м)
 - за счет межчастотных задержек C1P-C2P составит 6.8% по России и 13.2% глобально (вклад ~3.5м)
- Улучшение точности L1 за счет карт ионосферы ИАЦ: по России 16% (вклад 4м), глобально 34% (вклад 6.8м)

Сводная таблица. Точность местоопределения кодового решения GPS

Тип расчета				Средние значения, ГЛОНАСС, PDOP <= 6, метры							
				Россия				Глобально			
IONO	Tgd	Изм	Название расчета	В плане		Пространственная		В плане		Пространственная	
	L1-L2			Медиа на	СКП	Медиа на	СКП	Медиа на	СКП	Медиа на	СКП
	+	C1C	GPS C1C	1.20	1.61	2.84	4.48	1.45	2.19	5.13	7.40
		C2C	GPS C2C	2.26	2.74	5.25	8.48	2.60	3.64	9.11	12.27
	+	C1W	GPS C1W	1.12	1.55	2.65	4.36	1.31	1.82	4.48	6.30
		C2W	GPS C2W	2.11	2.79	5.10	7.89	2.55	3.50	8.67	11.71
Klob	+	C1W	GPS C1W IONEX_KLOB	1.01	1.35	3.26	4.19	1.13	1.58	2.85	3.74
IAC	+	C1W	GPS C1W IONEX_IAC	0.66	1.01	1.25	1.90	0.72	1.06	1.42	2.12
Free		C1C-C2C	GPS C1C-C2C	1.18	1.57	2.41	3.24	1.16	1.56	2.26	3.11
Free		C1C-C2W	GPS C1C-C2W	1.33	1.85	2.47	3.52	1.17	1.53	2.27	3.11
Free		C1W-C2W	GPS C1W-C2W	0.94	1.34	1.79	2.56	0.83	1.17	1.68	2.43

- Во всех расчетах калибровка НАП не проводилась, использовались кодовые измерения, карты ионосферы ИАЦ КВНО и модель Клубучара
- Базовая точность C1W: СКП по России 4.4 м, глобально 6.3м
- Улучшение точности GPS L1:
 - за счет карт ионосферы ИАЦ: по России 56% (вклад 3.9м), глобально 62% (вклад 4.8м)
 - за счет оперативной модели Клубучара: по России 4% (вклад 1.9м), глобально 24% (вклад 3.3м)
 - точность 2-частотного потребителя GPS (iono-free, СКП по России 2.5м, глобально 2.4м)
 - точность одночастотного потребителя GPS с использованием глобальной карты ионосферы ИАЦ по России 1.9м, глобально 2.1м

Выводы

- Представлена схема расчета межчастотных задержек ГЛОНАСС (АФНС) при использовании калиброванного приемника ВНИИФТРИ. Погрешность значений АФНС в кадре ГЛОНАСС составляет более 0.5м, т.к. это паспортные значения. Для других ГНСС точность Tgd в кадре ≤ 0.1 м, пересчет значений раз в 1-3 месяца.
- За 24.01.2023 точность глобальных карт ионосферы ИАЦ (GIM) сопоставима с картами 3 центров IGS: СКП 0.5-0.7м (модель Клобучара ~ 2.1 м). При пересчете GIM в карты пространственного распределения ошибки среднесуточный вклад ионосферы составил для ГЛОНАСС по России 2.7м, глобально 5.7м
- Для ФАКТИЧЕСКОЙ оценки вклада в точность ГЛОНАСС моделей ионосферы и межсигнальных C1C-C1P и межчастотных задержек (АФНС) был проведен эксперимент с участием 300 станций за 24-31 янв. 2023:
 - Базовый расчет: C1C и C1P примерно сравнимы (СКП Россия 7.2 м, глобально 9 м)
 - Iono-free: СКП глобально 9.0 м
 - Iono-free + корректный учет паспортного АФНС: СКП глобально 6.9 м
- Потенциальное улучшение точности (базового расчета) одночастотного потребителя ГЛОНАСС за счет задержек, которые планируется передавать в кадре ГЛОНАСС (без калибровки НАП):
 - за счет межсигнальных задержек C1C-C1P: 2.2% по России; 3.7% глобально (вклад 1.9м)
 - за счет задержек АФНС C1P-C2P: 13.2% по России (вклад 3.6м); глобально 6.8% (вклад 3.2м)
- Улучшение точности (базовый расчет) одночастотного потребителя за счет использования ионосферы:
 - ГЛОНАСС + карта ИАЦ: по России 16% (вклад 4м), глобально 34% (вклад 6.8м)
 - ГЛОНАСС + модель Клобучара: по России 5% (вклад 2.3м), глобально 26% (вклад 6м)
- Погрешность калиброванного приемника SU0* в умеренных широтах с использованием смоделированной ЭВИ (PDOP ~ 2.5 только 2-частотные КА) составила: C1P с моделью ионосферы 1.2 м, C1P-C2P 1.5 м. Даже при полной 2-частотной ОГ ГЛОНАСС (PDOP ~ 1.9) погрешность координат C1P идеального приемника с нулевыми шумовыми погрешностями составила бы ~ 0.8 м (за счет ошибок моделирования ионосферы)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш» [<https://www.glonass-iac.ru/iono/>]
2. Митрикас В. В., Скакун И. О., Аржанников А. А., Федотов В. Н. Применение калиброванного навигационного приемника для оценки погрешности измерения за счёт космического сегмента (SISRE) ГЛОНАСС // Альманах современной метрологии. - 2021. - № 2 (26). - С. 79–103.
3. А. А. Аржанников, В. Д. Готов, В. В. Митрикас / Вычисление дифференциальных кодовых задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 60. С. 3–11
[<https://www.glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4023>]
4. А. А. Аржанников, В. Д. Готов, В. В. Митрикас, А.С. Свиридов / Влияние ионосферы на точность координатного решения потребителя, построение глобальных карт ионосферы по беззапросным измерениям ГНСС // 26-я Международная научная конференция «Системный анализ, управление и навигация» 2022 г.
[<https://www.glonass-iac.ru/about/publications/detail.php?ID=4000>]
5. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 3.05. International GNSS Service.
[<https://files.igs.org/pub/data/format/rinex305.pdf>]
6. Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System // Ph. D. dissertation, Astronomical Institute of the University of Bern, Switzerland, 1999. - 208 p.
7. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps O. Montenbruck, A. Hauschild, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR/GSOC) P. Steigenberger, Technische Universität München (TUM/IAPG).
8. Li Z., Yuan Y., Li H., Ou J., Huo X. (2012) Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites, Journal of Geodesy, 86(11):1059-1076
9. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. (2016) Determination of differential code biases with multi-GNSS observations, Journal of Geodesy, 90(3): 209-228.
10. <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/YYDDD/rapid/>
11. <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>