

**2.5. Аржанников А.А., Глотов В.Д., Митрикас В.В., Свиридов А.С.**

**Влияние ионосферы на точность координатного решения потребителя, построение глобальных карт ионосферы по беззапросным измерениям ГНСС**  
*(ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш», Королев, Россия)*

Доклад посвящен проблеме расчета глобальных карт полного электронного содержания (ПЭС, англ. TEC – Total Electron Content) в ионосфере и оценке влияния ионосферных задержек сигнала на точность местоопределения одночастотного потребителя ГЛОНАСС и других ГНСС в различных условиях: при полном неучете ионосферы и с учетом по упрощенной модели Клобучара из кадра GPS, а также в зависимости от времени суток, территории, географической широты и уровня активности ионосферы на длительном 11-летнем цикле.

Представлен метод построения однослойных глобальных карт ПЭС ионосферы [1, 2]. Основой для моделирования ионосферы служат измерения глобально распределенной сети беззапросных измерительных станций, развернутой международной службой анализа IGS. В ИАЦ КВНО для уточнения параметров глобальных карт ПЭС ионосферы используются открытые измерения около 300 станций данной сети. Глобальные карты ионосферы по расчетам ИАЦ КВНО публикуются в файлах формата IONEX [4] на ежедневной основе [1, 3] с пространственным разрешением  $2,5^\circ$  по широте,  $5^\circ$  по долготе, шаг по времени 2 ч. Проведен расчет оценки точности глобальных ионосферных карт ИАЦ КВНО относительно карт трех центров IGS: среднеквадратичная погрешность по всей территории Земли  $\sim 0.5$  м во время высокой активности ионосферы и  $\sim 0.2$  м во время низкой активности ионосферы. Размерность ПЭС в данной работе переведена в метры ионосферной задержки сигнала для частоты L1 из единиц TECu (англ. TEC unit, 1 ед. TECu =  $10^{16}$  электронов/кв.м, что соответствует задержке в  $\sim 16$  см для частоты L1  $\sim 1600$  МГц).

Глобальные карты ПЭС ионосферы ИАЦ КВНО и других центров IGS выступают в дальнейших расчетах в качестве эталона, а в качестве оперативной модели ионосферы используется модель Клобучара из навигационного кадра GPS.

Для каждой точки в соответствии с шагом формата IONEX (по долготе, широте и времени) на суточном интервале с учетом положения КА производился перерасчет вклада ионосферы в псевдодальность, затем в точность трехмерного местоопределения отдельно для всех ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, GALILEO, BeiDou). Таким образом рассчитывались карты пространственного распределения ошибки одночастотного потребителя за счет ионосферы для двух случаев: при неучете ионосферы потребителем, а также при учете модели Клобучара из кадра GPS. Для полноты оценки были выбраны три суточных интервала: минимум (01.07.2020), максимум (01.04.2014) ионосферной активности и текущий период (01.04.2022) со среднесуточными вертикальными ПЭС (VTEC, англ. vertical TEC) 1.2 м, 6.8 м и 4.9 м соответственно (вертикальные ионосферные задержки для L1).

Результаты расчетов показали, что использование модели Клобучара из кадра GPS устраняет в среднем 45% ионосферной погрешности для всех ГНСС (от 30 до 60% в различных условиях). В редких особых случаях эта величина составляет менее 10%: ночное время в период минимальной ионосферной активности (среднесуточное вертикальное ПЭС 1.2 м для L1).

Вклад в псевдодальность за счет ионосферы зависит от активности ионосферы и при этом примерно одинаков для всех КА ГНСС на средневысоких орбитах (высота ~20 тыс. км). Таким образом, вклад ионосферы в точность навигационного местоопределения зависит в первую очередь от геометрического фактора ГНСС (PDOP).

Активность ионосферы непосредственно зависит от активности Солнца в течение 11-летнего цикла «Швабе-Вольфа», среднесуточное вертикальное ПЭС составляет в периоды максимума активности ~10м (2001г.) и ~7 м (2014г.), а в периоды минимума ~1 м (1996г., 2008г., 2020г.).

По результатам расчетов среднесуточный вклад ионосферы в трехмерную ошибку местоопределения одночастотного потребителя при полном неучете ионосферы для ГЛОНАСС составил (минимум и максимум активности ионосферы за 2011-2022гг.):

- по всей территории Земли: от 1.4 м до 7.8 м
- по территории России: от 1.2 м до 4.5 м
- Среднесуточный вклад в ночное время для ГЛОНАСС:
  - по всей территории Земли: от 1.0 м до 6.0 м
  - по территории России: от 1.0 м до 3.8 м
- Среднесуточный вклад в дневное время для ГЛОНАСС:
  - по всей территории Земли: от 1.8 м до 9.5 м
  - по территории России: от 1.3 м до 5.1 м

Среднесуточное значение вклада ионосферы в ошибку местоопределения для других ГНСС рассчитывается умножением полученных величин на соответствующее отношение средних значений PDOP (в зависимости от времени суток и территории).

#### Литература

1. Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО АО«ЦНИИмаш» [<https://www.glonass-iac.ru/iono/>]
2. А. А. Аржанников, В. Д. Глотов, В. В. Митрикас / Вычисление аппаратных дифференциальных задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), Санкт-Петербург, 13 сентября 2021 [<https://iaaras.ru/meetings/kvno2021/abstracts/arjannikov/>]
3. <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>
4. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1. Stefan Schaer, Werner Gurtner. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland

## **Ionosphere influence on the positioning accuracy, global ionospheric maps estimation based on GNSS measurements**

*Arzhannikov A.A., Glotov V.D., Mitrikas V.V., Sviridov A.S. (IAC PNT JSC «TsNIImash», Korolev, Moscow region)*

The report is devoted to the problem of global ionospheric maps (GIM) estimation of Total Electron Content (TEC) and determination of the ionospheric signal delays impact on the positioning accuracy for a single-frequency receiver using GLONASS and other GNSS in various conditions: without an ionosphere model and using simplified broadcasted GPS Klobuchar model, as well as depending on the daytime, territory, geographical latitude and the ionospheric activity level on a long 11-year cycle.

The method to estimate single-layer global ionospheric maps of TEC is presented [1, 2]. The basis for global ionospheric TEC maps estimation is a worldwide publicly accessible GNSS stations network deployed by the International GNSS Service (IGS). IAC PNT uses open measurements of about 300 IGS stations to estimate the global ionospheric TEC maps parameters daily. IAC PNT global ionospheric maps are published in the IONEX [4] format on a daily basis [1, 3], which is a grid of VTEC (vertical TEC) values in TECu (TEC units) with usual spatial resolution of 2.5 degrees in latitude, 5 degrees in longitude and 2 hours time resolution. The accuracy estimation of IAC PNT global ionospheric maps relative to the maps of other three IGS centers is calculated: an average RMS over the Earth's surface is ~0.5 m during high ionospheric activity and ~0.2 m during low ionospheric activity. The TEC units in this report are converted into meters of ionospheric signal delay for the frequency L1 from TECu (1 TECu =  $10^{16}$  electrons/m<sup>2</sup>, which corresponds to ~16 cm delay for the frequency L1 ~1600 MHz)

Global ionospheric maps of the IAC PNT and other IGS centers act as a reference standard in further calculations, and the broadcasted GPS Klobuchar model is used as an ionospheric model. For each point, in accordance with the step of the IONEX format (longitude, latitude and time steps), the ionosphere contribution to pseudorange was calculated on the daily interval. After that, taking into account positions of satellites, the ionosphere contribution to the receiver's three-dimensional positioning accuracy was estimated for all GNSS (GLONASS, GPS, GALILEO, BeiDou). Thus, spatial distribution maps of

the error for a single-frequency receiver due to the ionosphere were calculated for two cases: when the ionosphere was not considered by the receiver, as well as when using broadcasted GPS Klobuchar model. To complete the assessment, three daily intervals were selected: minimum (01.07.2020), maximum (01.04.2014) of ionospheric activity and the current period (01.04.2022) with average daily VTEC 1.2 m, 6.8 m and 4.9 m respectively (vertical ionospheric delays for L1).

The calculation results showed that the use of the GPS broadcasted Klobuchar model eliminates an average of 45% of the ionospheric error for all GNSS (from 30 to 60% in various conditions). In rare special cases, this value is less than 10%: at night during the period of minimal ionospheric activity (average daily VTEC equals 1.2 m for L1).

The contribution to pseudorange due to the ionosphere depends on the ionosphere activity and, at the same time, is approximately the same for all GNSS satellites at medium Earth orbits (altitude ~20,000 km). Thus, the ionosphere contribution to the positioning accuracy depends primarily on the geometric dilution of precision (PDOP).

The ionosphere activity directly depends on the Sun activity during the 11-year «Schwabe-Wolf cycle», the average daily VTEC equals ~10 m (2001) and ~7 m (2014) during the periods of maximum activity, and ~1 m during the periods of minimum (1996, 2008, 2020).

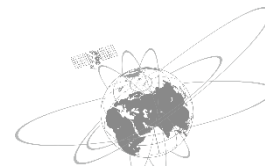
According to the results of calculations, the average daily ionosphere contribution to the three-dimensional positioning error of a single-frequency receiver without ionosphere model for GLONASS was (minimum and maximum ionospheric activity for 2011-2022):

- average over the Earth's surface: from 1.4 to 7.8 m
- average over the Russia territory: from 1.2 m to 4.5 m
- Average contribution at nighttime for GLONASS:
  - average over the Earth's surface: from 1.0 m to 6.0 m
  - average over the Russia territory: from 1.0 m to 3.8 m
- Average contribution at daytime for GLONASS:
  - average over the Earth's surface: from 1.8 m to 9.5 m
  - average over the Russia territory: from 1.3 m to 5.1 m

The average value of the daily ionosphere contribution to the three-dimensional positioning error for other GNSS is calculated by multiplying the obtained values by the corresponding ratio of the average PDOP values (depending on the time of day and territory).

Bibliography:

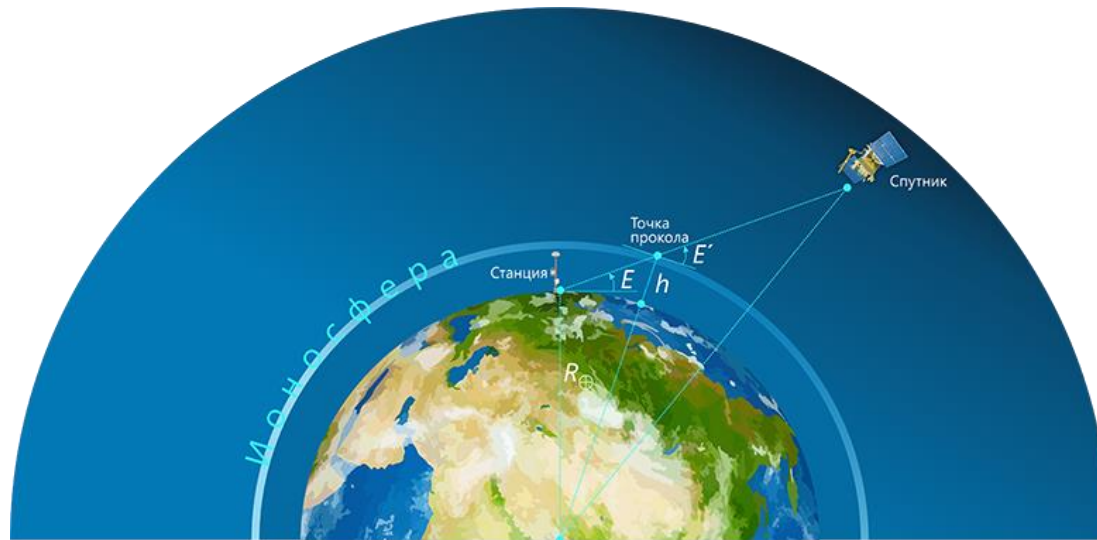
1. Section "Ionosphere" on the website of the IAC PNT JSC «TsNIImash» [<https://www.glonass-iac.ru/en/iono/>]
2. A.A.Arzhannikov, V. D. Glotov, V.V.Mitrikas / Determination of differential code biases and ionosphere maps using GNSS // The IX All-Russian Conference "Fundamental and applied scientific research in positioning, navigation and timing" PNT-2021. September 13-17, 2021 [<https://iaaras.ru/meetings/kvno2021/abstracts/arjannikov/>]
3. <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>
4. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1.1. Stefan Schaer, Werner Gurtner. Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland



# Влияние ионосферы на точность координатного решения потребителя, построение глобальных карт ионосферы по беззапросным измерениям ГНСС

А.А. Аржанников, В.Д. Готов, В.В. Митрикас, А.С. Свиридов

ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш»



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

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И НАВИГАЦИЯ, г. ЕВПАТОРИЯ, ИЮЛЬ 2022

# План доклада

- **ЦЕЛЬ.** Описание способа расчета глобальных карт ионосферы в ИАЦ КВНО с помощью ГНСС, оценка точности. Оценка вклада ионосферы в точность местоопределения (3d) потребителя для всех ГНСС (в зависимости от времени, местоположения и учета модели из кадра GPS)
- **Способ расчета глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО**
- **Годовой и 11-летний циклы ионосферы**
- **Оценка точности глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО: Кадр GPS vs ИАЦ КВНО vs IGS**
- **Расчет вклада ионосферы в точность местоопределения (3d) потребителя для всех ГНСС:**
  - Три временных интервала: MIN, MAX активности ионосферы, «сегодня»
  - День \ Ночь
  - Россия \ Вся территория Земли
  - % улучшения за счет учета упрощенной модели ионосферы из кадра GPS
- **Раздел «Ионосфера» на сайте ИАЦ КВНО**
- **Выводы**



# Однослойная модель ионосферы

Модель измерений псевдодальностей:

$$P_{GS,C1}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,1}^{SC} + b_{GS(SC),C1} + b_{C1}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1}^{SC}$$

$$P_{GS,C2}^{SC} = \overline{P_{GS}^{SC}} + I_{GS,2}^{SC} + b_{GS(SC),C2} + b_{C2}^{SC} + \varepsilon_{GS,C2}^{SC}$$

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

$b_{GS(SC),C1}, b_{GS(SC),C2}$  - систематические задержки в НАП для C1, C2, в общем случае зависят и от КА

$b_{C1}^{SC}, b_{C2}^{SC}$  - систематические задержки в бортовой аппаратуре КА для P1, P2

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:

$$P_{GS,C1}^{SC} - P_{GS,C2}^{SC} = 40.31 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot STEC + DCB_{GS,C1-C2}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1-C2}^{SC,GF}$$

где

$$DCB_{GS,C1-C2}^{SC} = DCB_{GS(SC),C1-C2} + DCB_{C1-C2}^{SC} =$$

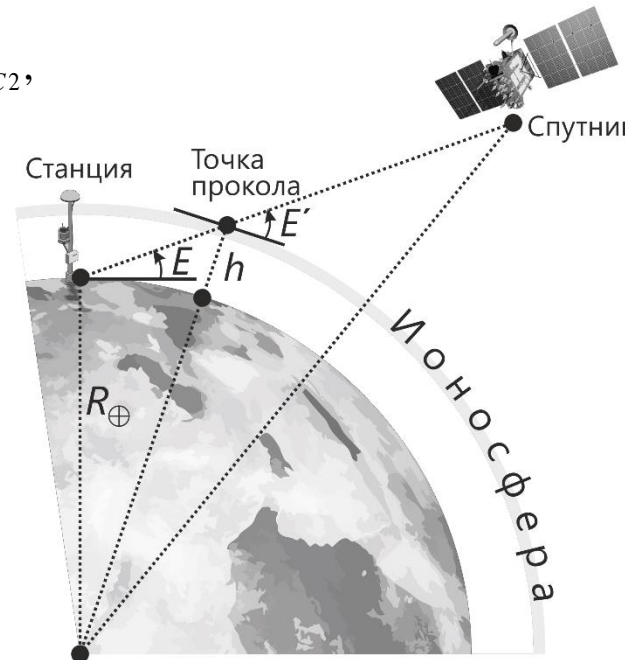
$$(b_{GS(SC),C1} - b_{GS(SC),C2}) + (b_{C1}^{SC} - b_{C2}^{SC}),$$

**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.

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

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



# Построение глобальных ионосферных карт

Уточнение параметров глобальной карты ионосферы и наборов дифференциальных кодовых задержек происходит для всего набора станций и КА по всей поверхности Земли. В качестве модели используется разложение VTEC по сферическим гармоникам (порядок разложения  $n_{max} = 15$ , 12 наборов коэффициентов гармоник для суточного интервала):

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

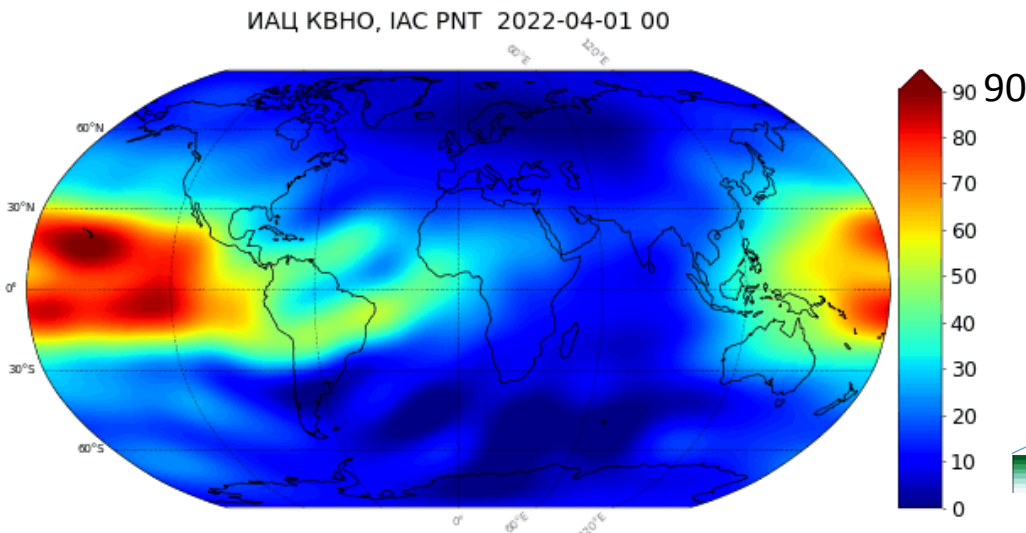
$\varphi$  - широта

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

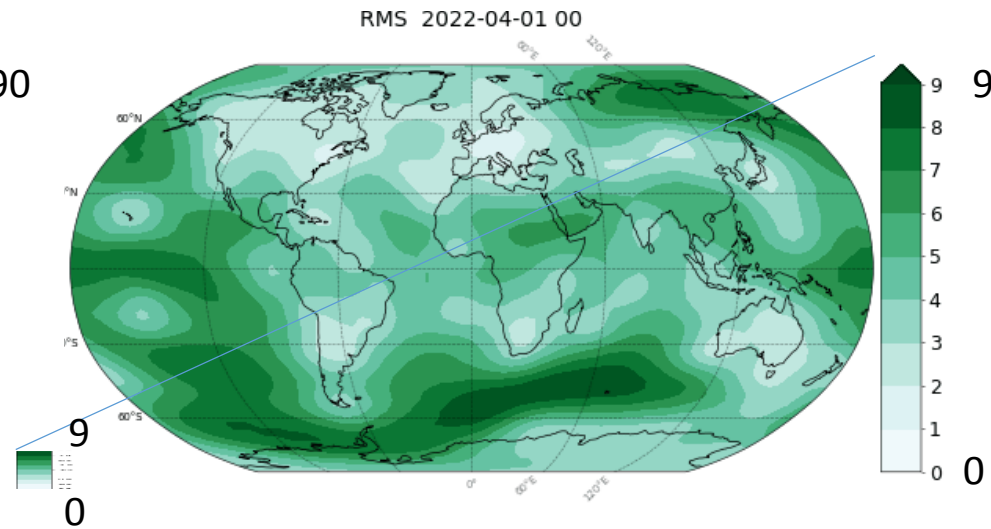
СКО глобальных ионосферных составляет до 3 TECu над материками и до 9 TECu над океанами (на 1 апр. 2022)

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

Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО, 1 апр. 2022, TECu



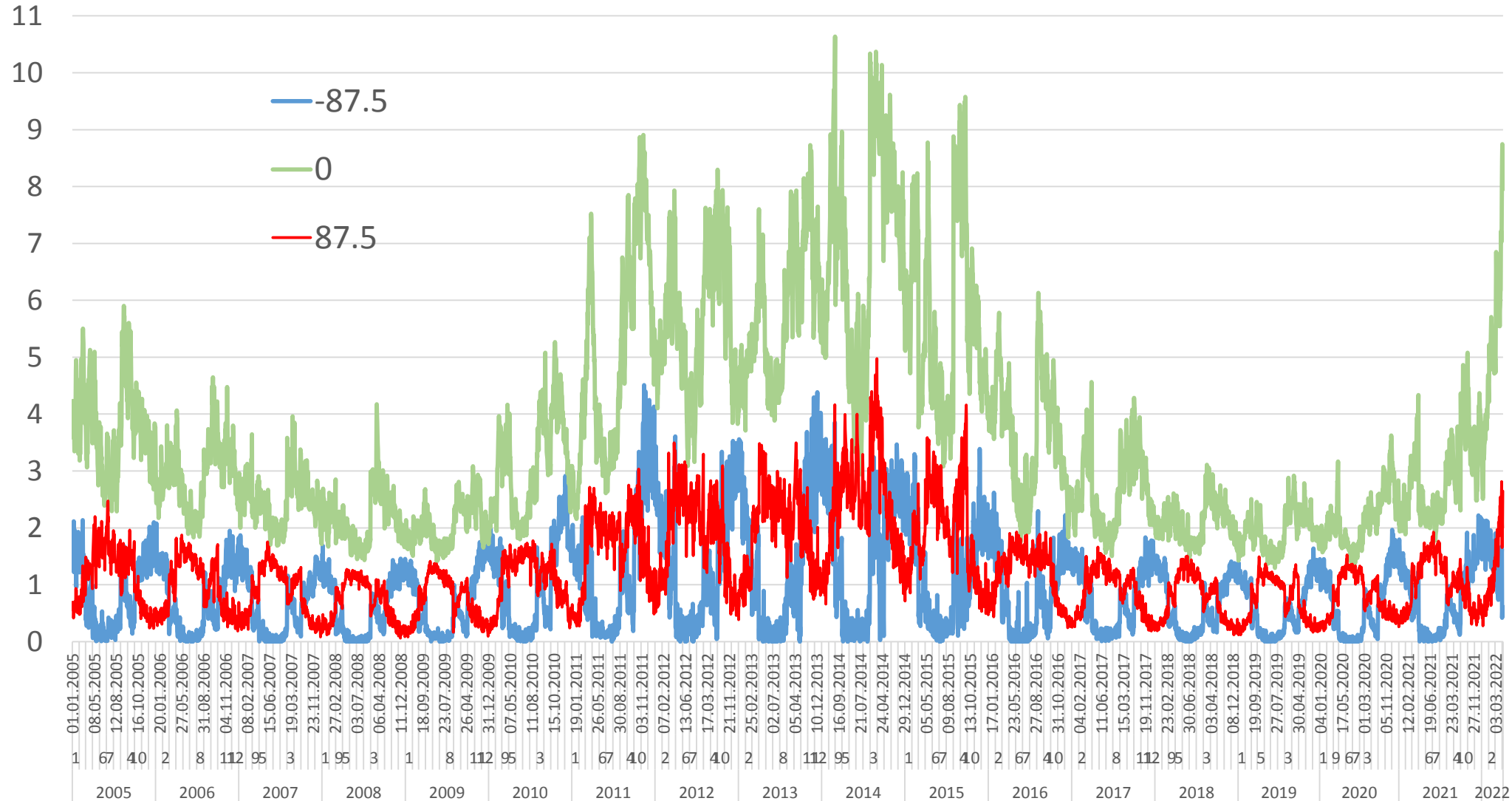
СКО расчета, 1 апр. 2022, TECu



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

# Годовой цикл ионосферы

Вертикальная среднесуточная ионосферная задержка в зависимости от широты, L1=1600МГц, метры



Цикл «лето-зима». Ионосфера имеет годовой цикл, существует зависимость от широты.

# 11-летний цикл Солнца и ионосферы



На длинном интервале измерений виден солнечный цикл с длительностью 11 лет («цикл Швабе»).

Построение карт ионосферы с помощью ГНСС происходит с 1990-ых.

# Точность расчета глобальных карт ионосферы: ИАЦ КВНО vs IGS vs кадр GPS (1 апр. 2022)

Матрицы взаимных СКП, метры L1

По всей территории, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.48	0.55	0.53	1.76
WHU	0.48		0.56	0.54	1.88
JPL	0.55	0.56		0.51	1.79
ИАЦ КВНО	0.53	0.54	0.51		1.72
Кадр GPS	1.76	1.88	1.79	1.72	

Над океанами, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.50	0.57	0.57	1.79
WHU	0.50		0.60	0.60	1.92
JPL	0.57	0.60		0.58	1.83
ИАЦ КВНО	0.57	0.60	0.58		1.75
Кадр GPS	1.79	1.92	1.83	1.75	

Точность расчета глобальной ионосферы ИАЦ КВНО ~0.5 м. Над материкам ~0.48 м

Глобальные карты IGS согласуются друг с другом на уровне 0.4 – 0.6 м

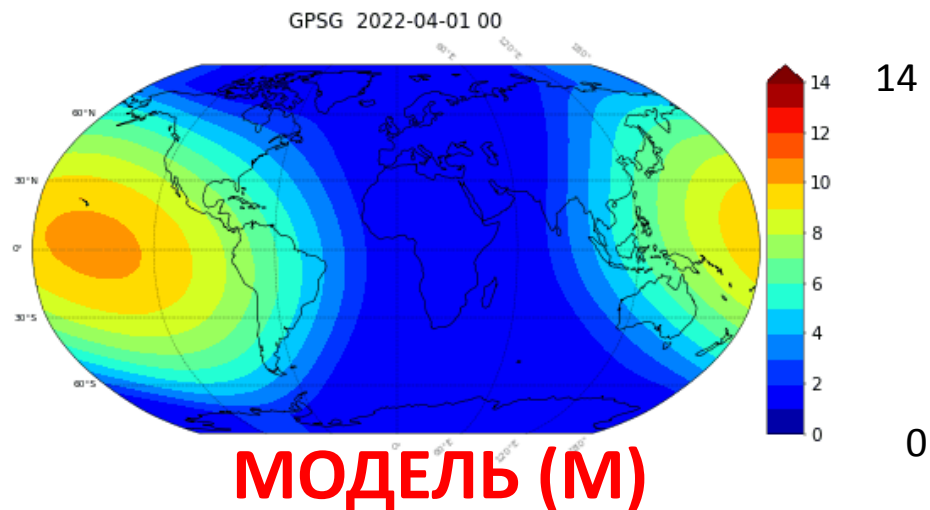
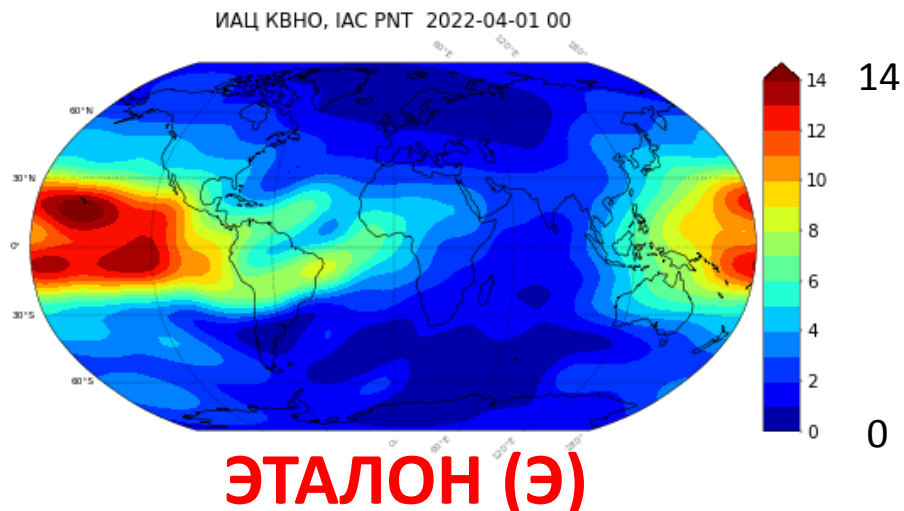
Средняя вертикальная ион. задержка: 4.9 м

Над материками, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.40	0.47	0.47	1.65
WHU	0.40		0.39	0.49	1.72
JPL	0.47	0.39		0.48	1.66
ИАЦ КВНО	0.47	0.49	0.48		1.64
Кадр GPS	1.65	1.72	1.66	1.64	

Модель Клобушара в кадре GPS ~1.6 м

Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО, 1 апр. 2022

Модель ионосферы из кадра GPS, 1 апр. 2022



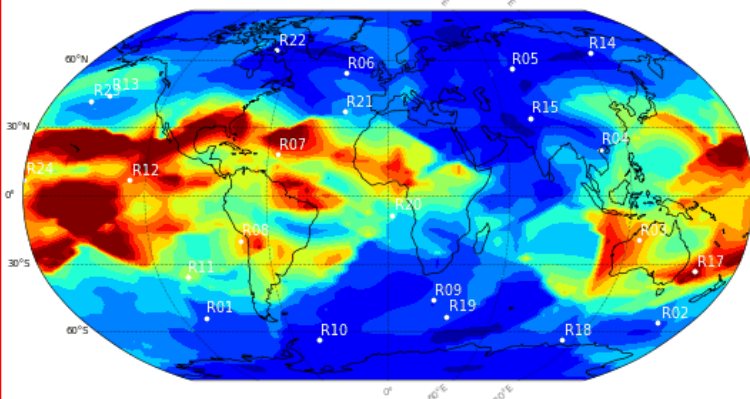
Точность расчета глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО сравнима с существующими аналогами

# Ошибка местоопределения за счет ионосферы (3d) для ГЛОНАСС и GPS за 1 апр. 2022г, метры

Без учета модели ионосферы

## PR(Э) \* PDOP

PR(Э) \* PDOP 2022-04-01 00



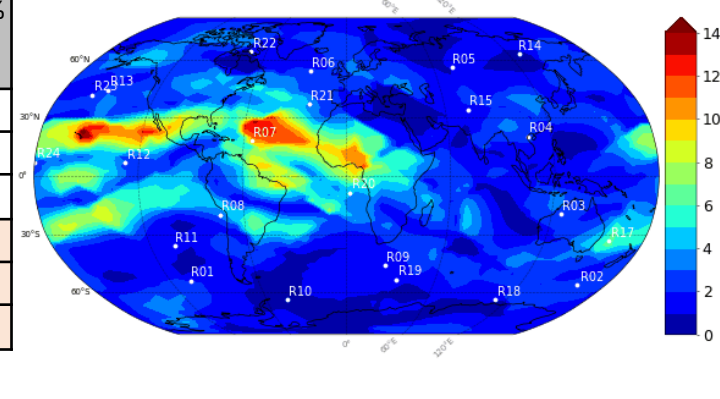
## ГЛОНАСС, PDOP = 2.06

ГЛОНАСС Ошибка за счет ионосферы		Без модели, м	+ мод. Клобушар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	5.8	3.0	48%
	День	7.5	3.3	56%
	Ночь	4.1	2.7	34%
Россия	Сутки	3.1	1.8	42%
	День	3.6	2.0	45%
	Ночь	2.3	1.5	34%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

## PR(Э-М) \* PDOP

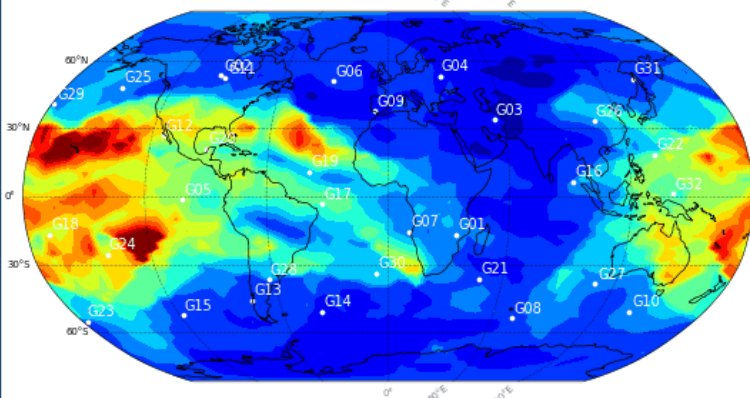
PR(Э - М) \* PDOP 2022-04-01 00



Без учета модели ионосферы

## PR(Э) \* PDOP

PR(Э) \* PDOP 2022-04-01 00



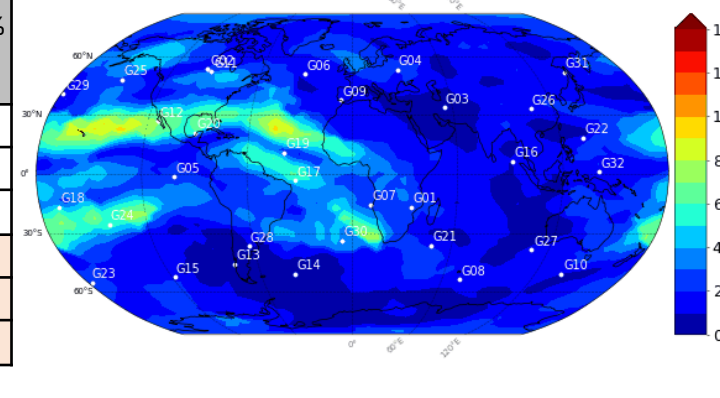
## GPS, PDOP = 1.56

GPS Ошибка за счет ионосферы		Без модели, м	+ мод. Клобушар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	4.6	2.3	50%
	День	6.0	2.5	58%
	Ночь	3.3	2.1	36%
Россия	Сутки	2.8	1.7	40%
	День	3.2	1.8	42%
	Ночь	2.1	1.4	33%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

## PR(Э-М) \* PDOP

PR(Э - М) \* PDOP 2022-04-01 00



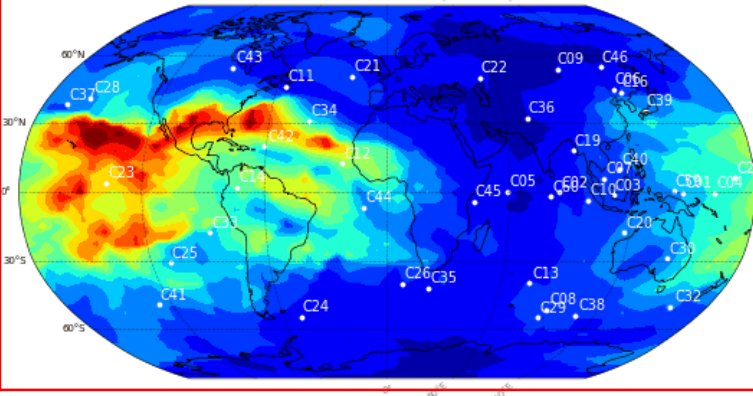
\*PR - pseudorange

Средняя вертикальная ионосферная задержка L1 на 1 апр. 2022г: 4.9 м

# Ошибка местоопределения за счет ионосферы (3d) для BeiDou и GALILEO за 1 апр. 2022г, метры

Без учета модели ионосферы  
**PR(Э) \* PDOP**

PR(Э) \* PDOP 2022-04-01 00

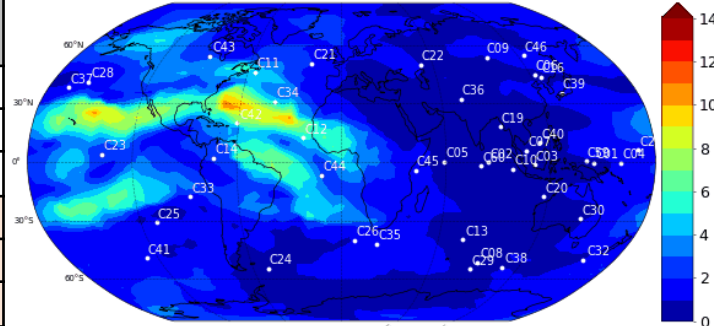


BeiDou, PDOP = 1.4

BeiDou Ошибка за счет ионосферы		Без модели, м	+ мод. Клобушар , м	Улучш, %
Земля	Сутки	4.2	2.1	51%
	День	5.4	2.2	58%
	Ночь	3.0	1.9	36%
Россия	Сутки	2.3	1.3	44%
	День	2.7	1.5	46%
	Ночь	1.8	1.1	39%

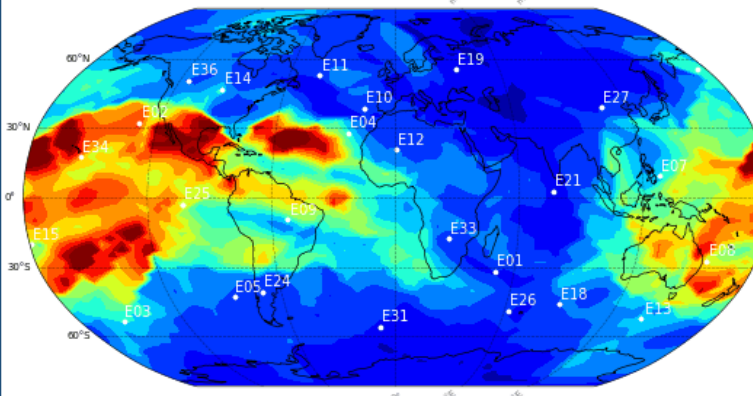
с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)  
**PR(Э-М) \* PDOP**

PR(Э - М) \* PDOP 2022-04-01 00



Без учета модели ионосферы  
**PR(Э) \* PDOP**

PR(Э) \* PDOP 2022-04-01 00

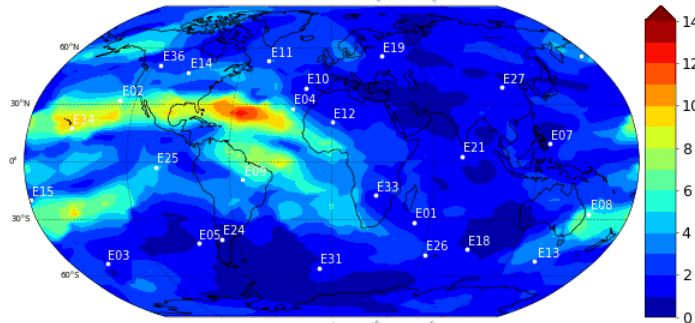


GALILEO, PDOP = 1.8

Galileo Ошибка за счет ионосферы		Без модели, м	+ мод. Клобушар , м	Улучш, %
Земля	Сутки	5.3	2.6	51%
	День	6.8	2.9	58%
	Ночь	3.7	2.4	36%
Россия	Сутки	3.1	1.8	41%
	День	3.5	1.9	45%
	Ночь	2.4	1.6	32%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)  
**PR(Э-М) \* PDOP**

PR(Э - М) \* PDOP 2022-04-01 00



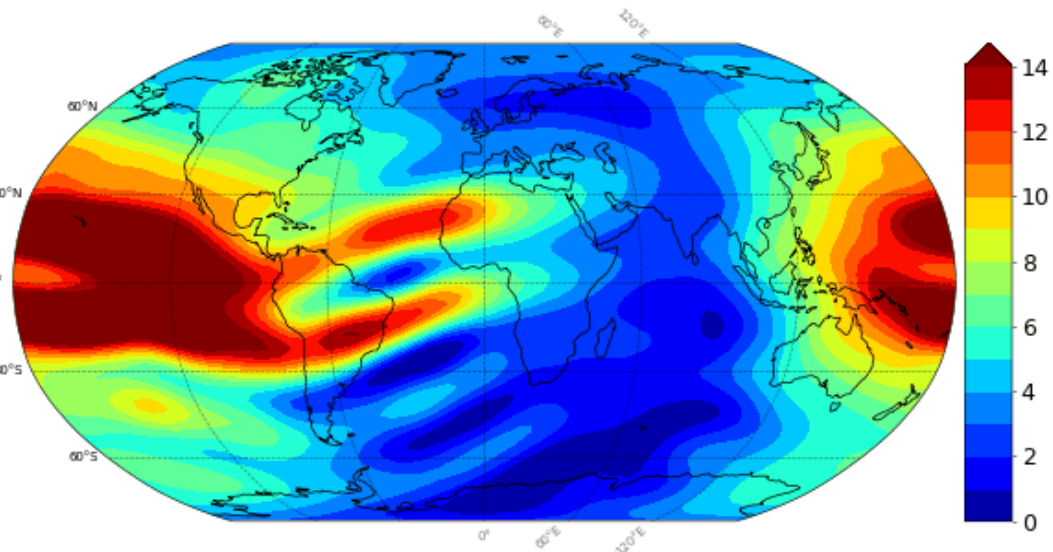
\*PR - pseudorange

Средняя вертикальная ионосферная задержка L1 на 1 апр. 2022г: 4.9 м

# Глобальные карты ионосферы: МАКСИМУМ ионосферной активности - 1 апр. 2014

Глобальная карта ионосферы, 1 апр. 2014

CODG 2014-04-01 00

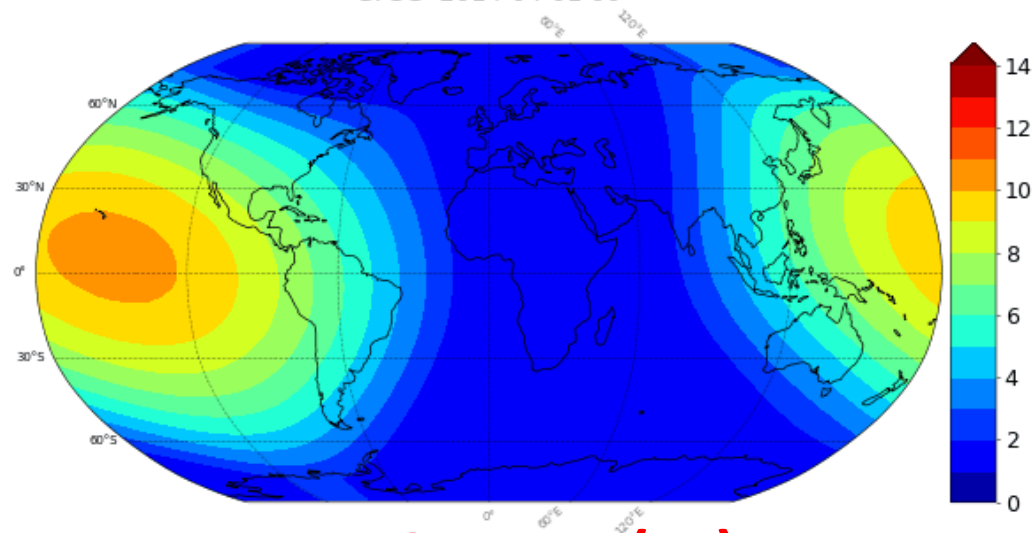


**ЭТАЛОН (Э)**

Среднесуточная вертикальная  
ионосферная задержка: 6.8 м

Модель ионосферы из кадра GPS, 1 апр. 2014

GPSG 2014-04-01 00



**МОДЕЛЬ (М)**

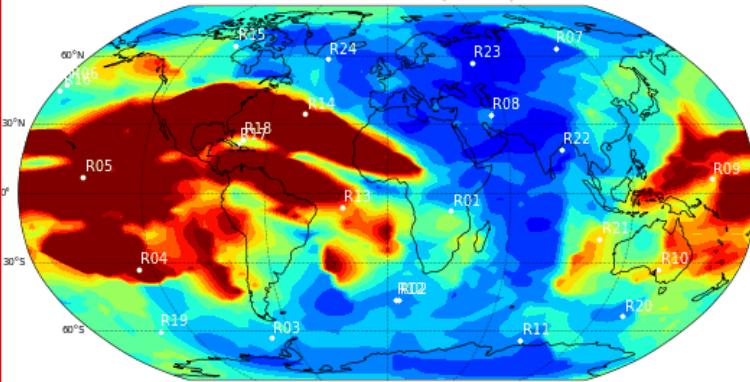


# Ошибка местоопределения за счет ионосферы (3d) для ГЛОНАСС и GPS за 1 апр. 2014г (МАКСИМУМ ионосферной активности), метры

Без учета модели ионосферы

## PR(Э) \* PDOP

PR(Э) \* PDOP 2014-04-01 00



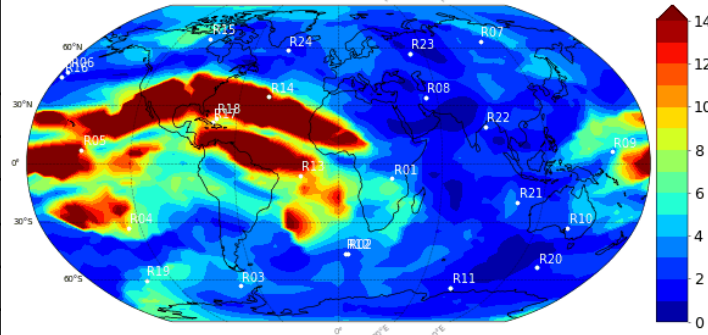
## ГЛОНАСС, PDOP = 2.03

ГЛОНАСС		Без модели, м	+ мод. Клобушар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	7.8	4.4	44%
	День	9.5	4.5	53%
	Ночь	6.0	4.3	29%
Россия	Сутки	4.5	2.0	56%
	День	5.1	1.9	62%
	Ночь	3.8	2.0	47%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

## PR(Э-М) \* PDOP

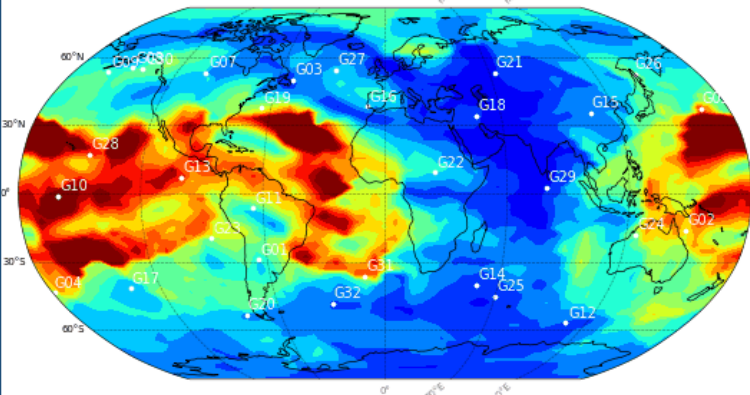
PR(Э - М) \* PDOP 2014-04-01 00



Без учета модели ионосферы

## PR(Э) \* PDOP

PR(Э) \* PDOP 2014-04-01 00



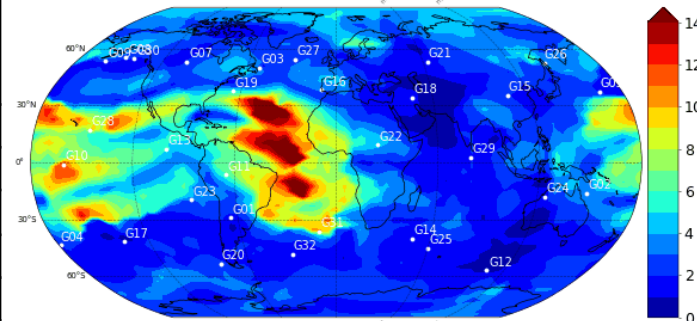
## GPS, PDOP = 1.65

GPS		Без модели, м	+ мод. Клобушар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	6.5	3.6	45%
	День	8.0	3.7	54%
	Ночь	4.9	3.4	30%
Россия	Сутки	4.3	2.1	51%
	День	4.7	2.1	56%
	Ночь	3.7	2.0	45%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

## PR(Э-М) \* PDOP

PR(Э - М) \* PDOP 2014-04-01 00



\*PR - pseudorange

Средняя вертикальная ионосферная задержка L1 на 1 апр. 2014г: 6.8 м

# Точность расчета глобальных карт ионосферы: МИНИМУМ ионосферной активности (1 июля 2020)

Матрицы взаимных СКП, метры L1

По всей территории, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.14	0.20	0.16	0.53
WHU	0.14		0.15	0.17	0.58
JPL	0.20	0.15		0.19	0.60
ИАЦ КВНО	0.16	0.17	0.19		0.51
Кадр GPS	0.53	0.58	0.60	0.51	

Над океанами, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.14	0.20	0.16	0.55
WHU	0.14		0.15	0.18	0.60
JPL	0.20	0.15		0.20	0.63
ИАЦ КВНО	0.16	0.18	0.20		0.53
Кадр GPS	0.55	0.60	0.63	0.53	

Точность расчета глобальной ионосферы ИАЦ КВНО ~0.2 м. Над материкам ~0.16 м

Глобальные карты IGS согласуются друг с другом на уровне 0.15 – 0.2 м

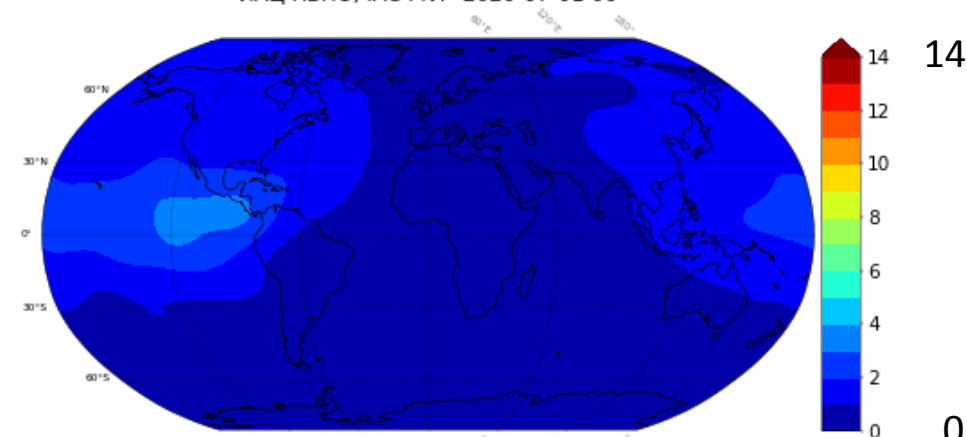
Средняя вертикальная задержка: 1.2 м

Над материками, метры					
Карта	CODE	WHU	JPL	ИАЦ КВНО	Кадр GPS
CODE		0.15	0.18	0.15	0.47
WHU	0.15		0.13	0.14	0.49
JPL	0.18	0.13		0.16	0.50
ИАЦ КВНО	0.15	0.14	0.16		0.44
Кадр GPS	0.47	0.49	0.50	0.44	

Модель Клобушара в кадре GPS ~0.6 м

Глобальная карта ионосферы ИАЦ КВНО, 1 июля 2020

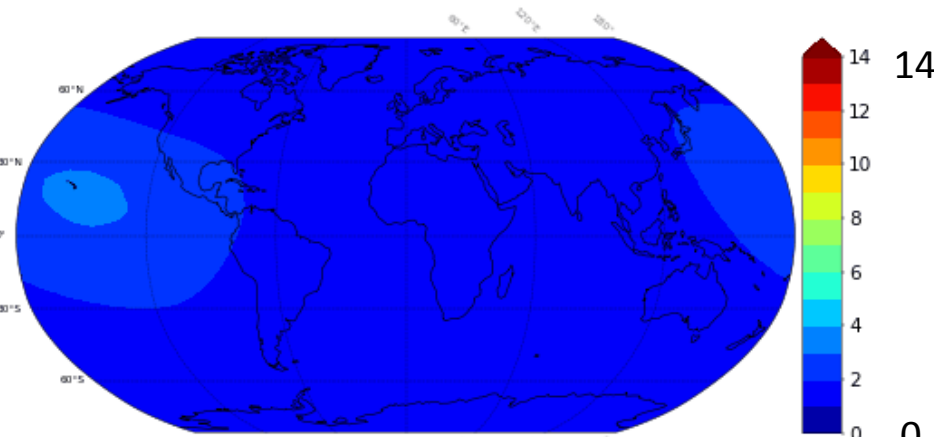
ИАЦ КВНО, IAC PNT 2020-07-01 00



**ЭТАЛОН (Э)**

Модель ионосферы из кадра GPS, 1 июля 2020г

GPSG 2020-07-01 00



**МОДЕЛЬ (М)**

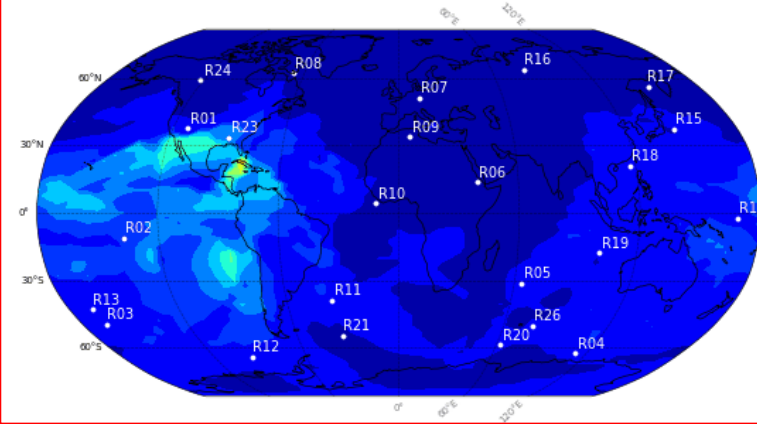
Точность расчета глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО сравнима с существующими аналогами

# Ошибка местоопределения за счет ионосферы (3d) для ГЛОНАСС и GPS за 1 июля 2020г (МИНИМУМ ионосферной активности), метры

Без учета модели ионосферы

**PR(Э) \* PDOP**

PR(Э) \* PDOP 2020-07-01 00



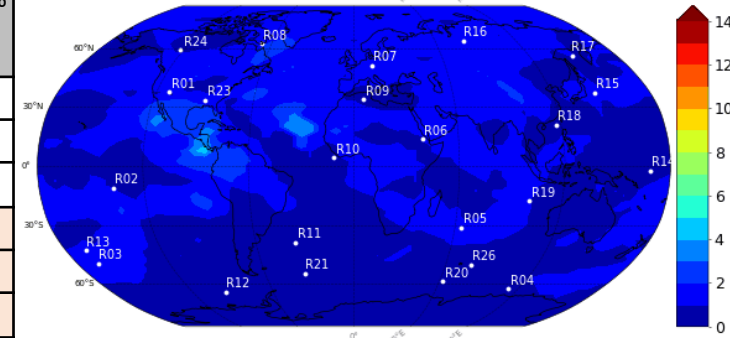
ГЛОНАСС, PDOP = 2.07

ГЛОНАСС		Без модели, м	+ мод. Клобушар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	1.4	1.0	33%
	День	1.8	0.9	47%
	Ночь	1.0	1.0	6%
Россия	Сутки	1.3	0.6	51%
	День	1.4	0.6	54%
	Ночь	1.2	0.6	51%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

**PR(Э-М) \* PDOP**

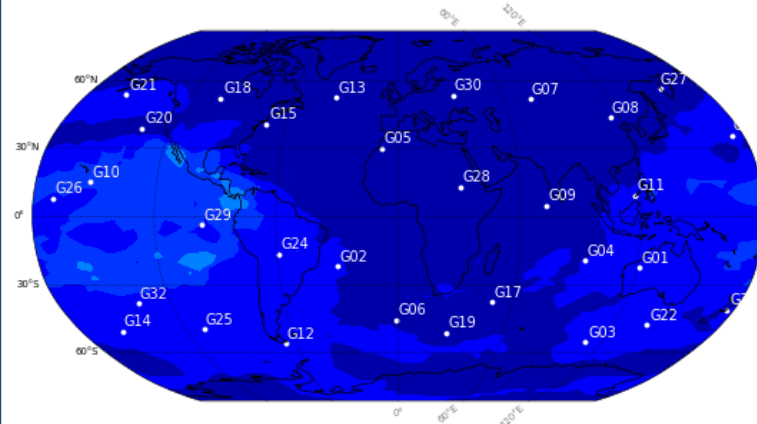
PR(Э - М) \* PDOP 2020-07-01 00



Без учета модели ионосферы

**PR(Э) \* PDOP**

PR(Э) \* PDOP 2020-07-01 00



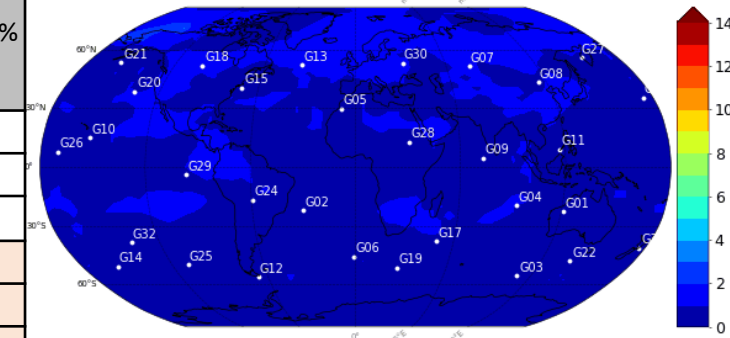
GPS, PDOP = 1.58

GPS		Без модели, м	+ мод. Клобушар, м	Улучш, %
Земля	Сутки	1.1	0.7	35%
	День	1.4	0.7	50%
	Ночь	0.8	0.8	6%
Россия	Сутки	1.1	0.6	50%
	День	1.2	0.6	52%
	Ночь	1.1	0.6	49%

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)

**PR(Э-М) \* PDOP**

PR(Э - М) \* PDOP 2020-07-01 00



\*PR -pseudorange

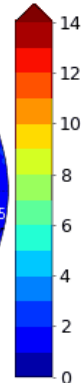
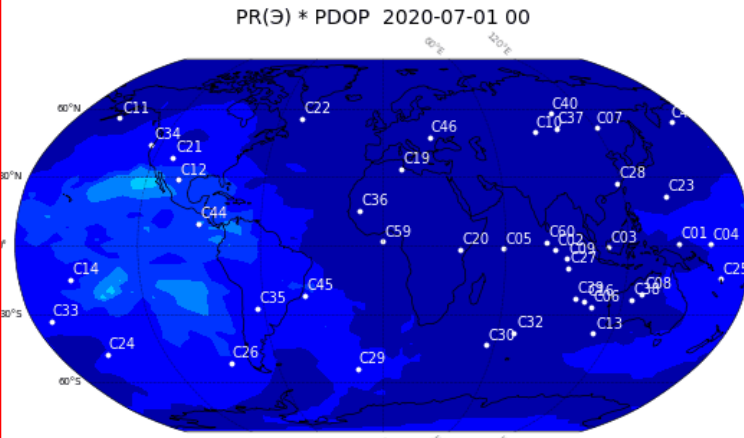
Средняя вертикальная ионосферная задержка L1 на 1 июля 2020г: 1.2 м

# Ошибка местоопределения за счет ионосферы (3d) для BeiDou и GALILEO за 1 июля 2020г (МИНИМУМ ионосферной активности), метры

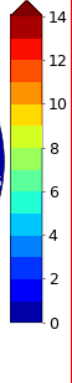
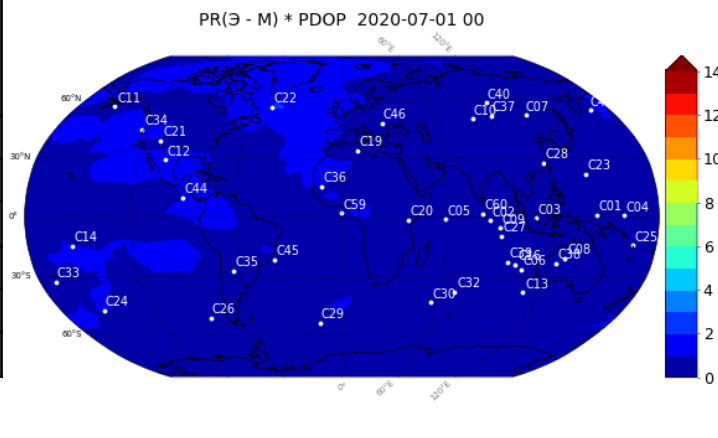
Без учета модели ионосферы  
**PR(Э) \* PDOP**

BeiDou, PDOP = 1.48

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)  
**PR(Э-М) \* PDOP**



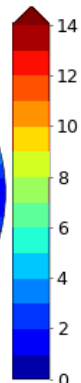
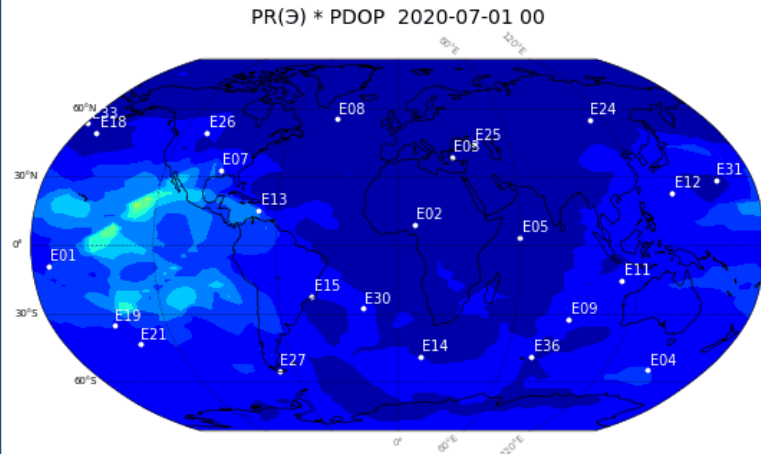
BeiDou Ошибка за счет ионосферы		Без модели, м	+ мод. Клобушар , м	Улучш, %
Земля	Сутки	1.1	0.7	36%
	День	1.3	0.7	51%
	Ночь	0.8	0.7	9%
Россия	Сутки	0.9	0.5	41%
	День	0.9	0.5	45%
	Ночь	0.8	0.5	45%



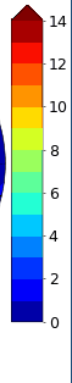
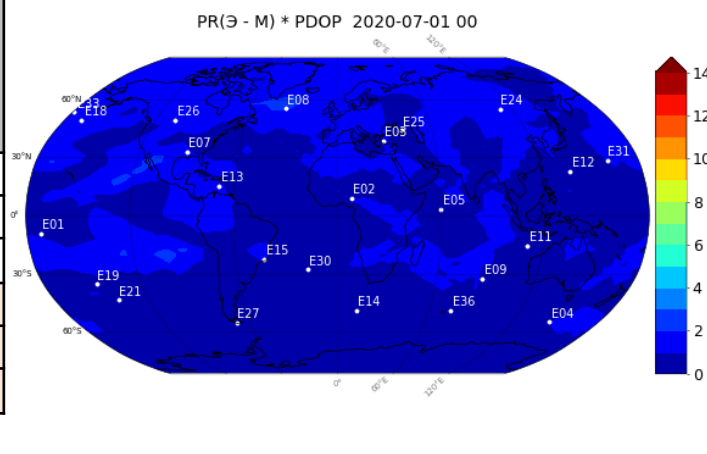
Без учета модели ионосферы  
**PR(Э) \* PDOP**

GALILEO, PDOP = 1.91

с учетом модели ионосферы (из кадра GPS)  
**PR(Э-М) \* PDOP**



Galileo Ошибка за счет ионосферы		Без модели, м	+ мод. Клобушар , м	Улучш, %
Земля	Сутки	1.3	0.9	35%
	День	1.7	0.8	51%
	Ночь	0.9	0.9	6%
Россия	Сутки	1.3	0.6	51%
	День	1.4	0.6	54%
	Ночь	1.3	0.6	53%



\*PR - pseudorange

Средняя вертикальная ионосферная задержка L1 на 1 июля 2020г: 1.2 м

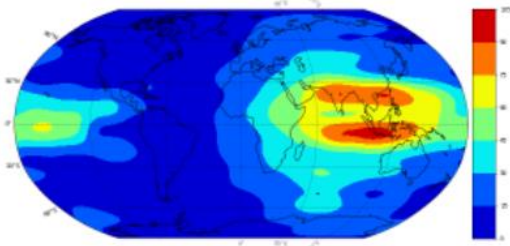
# Результат: ошибка за счет ионосферы с учетом модели из навигационного кадра GPS и при неучете ионосферы (метры), % улучшения



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

Карты ионосферы

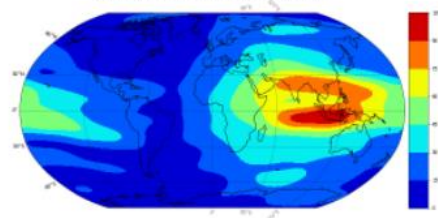
Глобальная ионосферная карта по расчетам Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения ИАЦ PNT (rapid IACG), в ед. TECu (1 ед. TECu соответствует задержке в ~16 см для частоты L1) за 05.04.2022



Скачать IONEX: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>  
Сайт центра анализа: [www.glonass-iac.ru](http://www.glonass-iac.ru)

CODE WHU JPL GPS

Глобальная ионосферная карта по расчетам Европейского центра определения орбит CODE (rapid CORG), в ед. TECu



Скачать IONEX:  
<ftp://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>  
Сайт центра анализа: [www.aiub.unibe.ch](http://www.aiub.unibe.ch)

Карты ионосферы

Точность расчета карт ионосферы

Об ионосфере Земли

Методы моделирования ионосферы

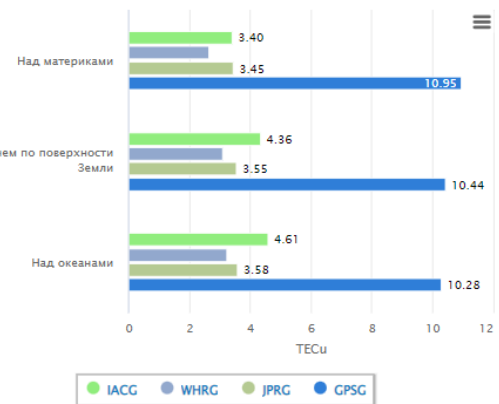
Испытания НАП, оценка условий спутниковой навигации

Ионосфера

Принципы навигации

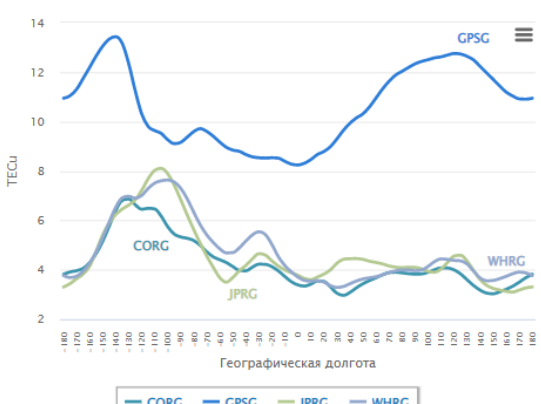
Точность расчета карт ионосферы

Среднеквадратичная погрешность карт ионосферы относительно глобальной ионосферной карты Европейского центра определения орбит CODE (rapid CORG) за 05.04.2022, в ед. TECu



Регион	IACG	WHRG	JPRG	GPSG
Над материками	3.40	3.45	10.95	3.45
В среднем по поверхности Земли	4.36	3.55	10.44	3.55
Над океанами	4.61	3.58	10.28	3.58

Среднеквадратичная погрешность карт ионосферы относительно глобальной ионосферной карты Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения ИАЦ PNT (rapid IACG) за 05.04.2022 в зависимости от долготы, в ед. TECu.



Долгота (градусы)	CORG	GPSG	JPRG	WHRG
-180	~3.5	~11.0	~3.5	~3.5
-150	~4.0	~13.0	~4.0	~4.0
-100	~4.5	~9.0	~4.5	~4.5
-50	~4.0	~9.0	~4.0	~4.0
0	~4.0	~8.5	~4.0	~4.0
50	~4.0	~8.5	~4.0	~4.0
100	~4.0	~11.0	~4.0	~4.0
150	~4.0	~12.0	~4.0	~4.0
180	~4.0	~11.0	~4.0	~4.0

Карты ионосферы

Точность расчета карт ионосферы

Об ионосфере Земли

Методы моделирования ионосферы

Принципы навигации

Ионосфера

Испытания НАП, оценка условий спутниковой навигации

ГЛОНАСС

Карты ионосферы в формате IONEX (2020-2022гг) : <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>

## Выводы

- Точность глобальных карт ионосферы ИАЦ КВНО сопоставима с точностью карт других международных центров анализа службы IGS: СКП  $\sim 0.5\text{м}$  (для высокой активности ионосферы) и  $0.2\text{м}$  (для низкой активности ионосферы).
- Использование модели Клобучара из кадра GPS устраняет в среднем 45% ионосферной погрешности для всех ГНСС (от 30 до 60% в различных условиях). При определенных условиях это значение составляет менее 10% (ночное время в период минимальной ионосферной активности со средним VTEC  $1.2\text{м}$ )
- Вклад ионосферы в точность местоопределения зависит от ионосферной ошибки псевдодальности и геометрического фактора ГНСС (средний PDOP и к-во КА). Среднесуточный вклад в псевдодальность примерно одинаков для всех КА ГНСС на средневысоких орбитах (MEO,  $\sim 20$  тыс. км).
- Активность ионосферы зависит от 11-летнего цикла Солнца (сред. VTEC от 1 м до 10м за 1999-2022). Для ГЛОНАСС среднесуточный вклад в ошибку местоопределения (3d) при полном неучете ионосферы:
  - по всей территории Земли: от 1.4м до 7.8м (мин. и макс. активности ионосферы 2011-2022 )
  - по территории России: от 1.2м до 4.5м.В ночное время для ГЛОНАСС:
  - по всей территории Земли: от 1.0м до 6.0м
  - по территории России: от 1.0м до 3.8мВ дневное время для ГЛОНАСС:
  - по всей территории Земли: от 1.8м до 9.5м
  - по территории России: от 1.3м до 5.1м

**Спасибо за внимание**



## Дополнительные слайды

# Обзор. Роль калибровки и моделирования ионосферы

	Одночастотные навигационные приемники	Двухчастотные навигационные приемники
Влияние ионосферы на точность местоопределения	<b>1-30 метров.</b> В пике достигает 50 метров.	<b>Не влияет</b> благодаря использованию безионосферной линейной комбинации измерений на двух частотах.
Влияние дифференциальных аппаратных задержек на точность местоопределения	<b>1-5 метров.</b> Существуют систематические задержки сигнала в навигационных приемниках и космических аппаратах. Необходима калибровка приемников и КА.	

Моделирование ионосферы необходимо прежде всего для одночастотных потребителей

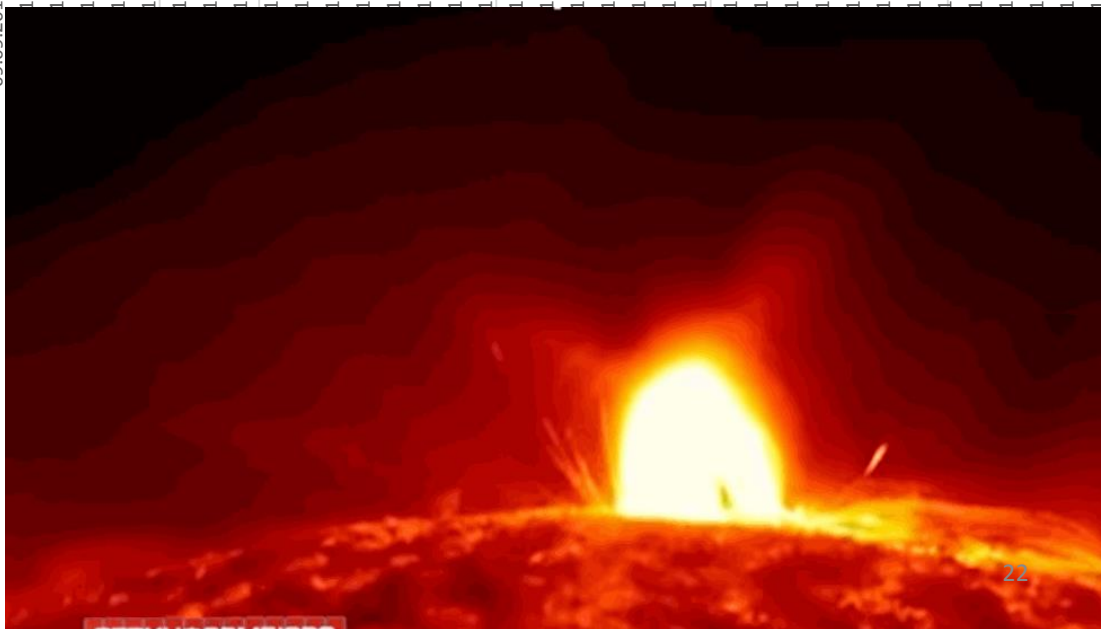
# Обзор. Основные группы моделей ионосферы

Группа моделей	Модель ионосферы	Примеры	Тип	
Однослойная модель ионосферы, наблюдаемая по измерениям ГНСС, моделируется только TEC. (Трехслойная)	Global ionosphere maps (GIM)	JPL, CODE, ESOC, NRCan, <b>ИАЦ КВНО</b>	Глобальная	Сеточная
	Локальная ионосфера + DCB (IGG DCB)	Institute of Geodesy and Geophysics, Wuhan, China, <b>ИАЦ КВНО</b>	Локальная	Параметр.
Физические модели ионосферы. Трехмерная многослойная модель ионосферы, расчет VTEC, температуры и скорости электронов, ионов, состав ионосферы. Помимо ГНСС используются измерения ионозондов, радаров некогерентного рассеяния, индексы солнечной и геомагнитной активности.	Ассимиляционная модель ионосферы	«Центральная Аэрологическая Обсерватория», г. Долгопрудный, Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) Utah State University (USU) Space Weather Center (SWC)	Глобальная	Физическая
	System of Ionosphere Monitoring and Prediction (SIMP) ИПГ	ИПГ им. академика Е. К. Фёдорова	Регион.	Физическая
	International Reference Ionosphere (IRI)	Australian Bureau of Meteorology space weather services (SWS) (Мельбурн, Австралия)	Глобальная	Физическая
Упрощенные модели ионосферы в кадре ГНСС и функциональных дополнениях ГНСС	Параметрическая модель ионосферы в навигационном кадре	Клубучар GPS , NeQuick Galileo, Глонасс (кодированный сигнал)	Глобальная	Параметр.
	Региональная сеточная модель в кадре функционального дополнения ГНСС	СДКМ , SBAS, EGNOS Galileo, MSAS QZSS, SNAS Beidou	Регион.	Сеточная

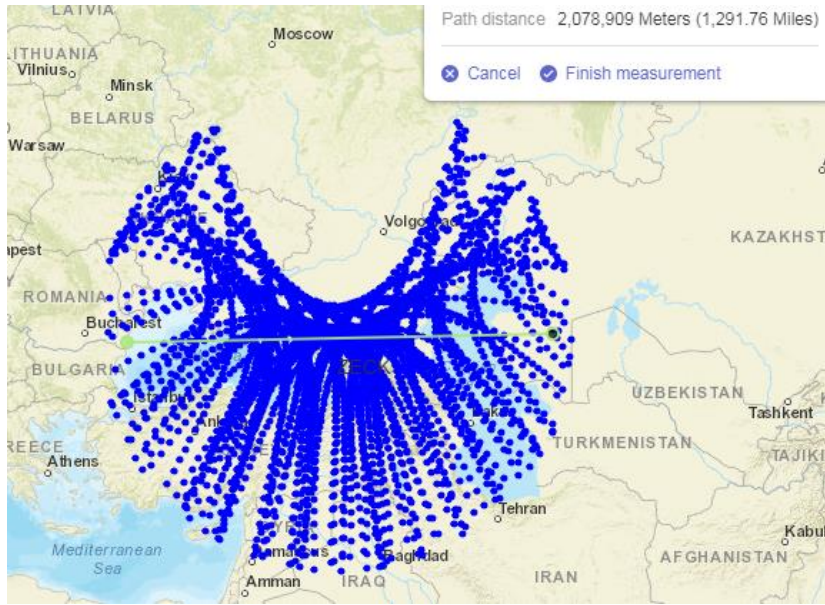
# Ионосфера и вспышки на Солнце



Вспышка на Солнце 07.09.2017



## 2. Уточнение дифференциальных кодовых задержек с помощью моделирования локальной ионосферы. Метод IGGDCB.

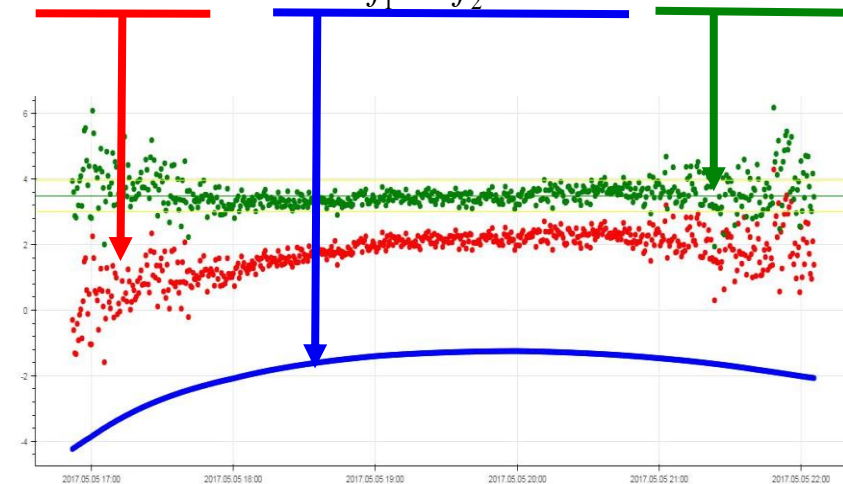


$$STEC = VTEC \cdot m(E) = VTEC \cdot \frac{1}{\sin(E')}$$

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

Для каждой станции моделируется локальная ионосфера в зависимости от широты  $\varphi$  и солнечно-фиксированной долготы  $t = \lambda - \lambda_{SUN}$ . Метод разложения по GTS-функциям (generalized trigonometric series functions)

$$P_{GS,C1}^{SC} - P_{GS,C2}^{SC} = 40.31 \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \cdot STEC + DCB_{GS,C1-C2}^{SC} + \varepsilon_{GS,C1-C2}^{SC,GF}$$

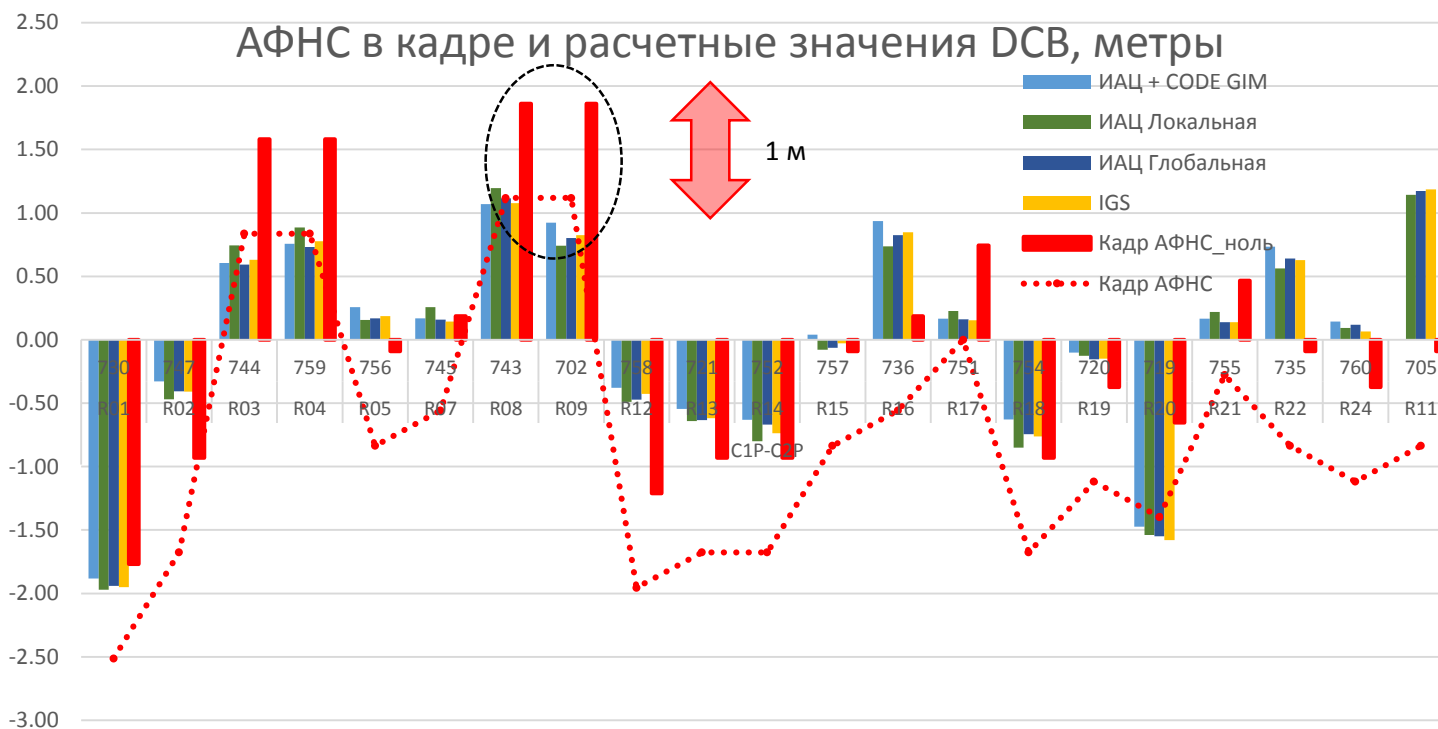


Одновременное уточнение дифференциальных кодовых задержек  $DCB_{GS,P1-P2}^{SC}$  и параметров локальной ионосферы  $STEC$ . Метод IGGDCB (IGG - Institute of Geodesy and Geophysics, Wuhan, China.) описан в работах:

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.

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

# ГЛОНАСС. Задержка Tgd в кадре (АФНС), сравнение с DCB ИАЦ КВНО и IGS (1 авг. 2021)



$$T_{gd} = -DCB_{C1-C2}^{SC} = b_{C2}^{SC} - b_{C1}^{SC}$$

Матрицы взаимных СКП расчета DCB, 1 авг. 2021, метры

Взаимные СКП, метры	ИАЦ + CODE GIM	ИАЦ Локальная	ИАЦ Глобальная	IGS	Кадр АФНС
ИАЦ + CODE GIM		0,10	0,04	0,04	0,61
ИАЦ Локальная	0,10		0,08	0,08	0,54
ИАЦ Глобальная	0,04	0,08		0,03	0,59
IGS	0,04	0,08	0,03		0,59
Кадр АФНС	0,61	0,54	0,59	0,59	

Взаимные СКП, C1C – C2C, метры	ИАЦ + CODE GIM	ИАЦ Локальная	ИАЦ Глобальная	IGS	Кадр АФНС
ИАЦ + CODE GIM		0,09	0,02	0,04	0,75
ИАЦ Локальная	0,09		0,09	0,08	0,72
ИАЦ Глобальная	0,02	0,09		0,05	0,75
IGS	0,04	0,08	0,05		0,74
Кадр АФНС	0,75	0,72	0,75	0,74	

**(+) 4 способа расчета (3 ИАЦ + 1 IGS) DCB ГЛОНАСС согласуются между собой ≤ 0.1 м**

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

**(+) Есть потенциал для снижения погрешности потребителя**

# СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Раздел "Ионосфера" на сайте ИАЦ КВНО АО «ЦНИИмаш» [<https://www.glonass-iac.ru/iono/>]
- 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.
- 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.
- 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).
- А. А. Аржанников, В. Д. Готов, В. В. Митрикас / Вычисление аппаратных дифференциальных задержек и построение карт ионосферы с помощью ГНСС // «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), Санкт-Петербург, 13 сентября 2021 [<https://iaaras.ru/meetings/kvno2021/abstracts/arjannikov/>]
- 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
- 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.
- <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/products/mgex/dcb/>
- <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/YYDDD/rapid/>
- <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/ionex/>
- <ftp://gdc.cddis.eosdis.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>