

Сравнительный анализ моделей учета задержек сигналов ГНСС в ионосфере

© Е. А. Рощина, А. В. Сальцберг

АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

В работе выполнены сравнение двух подходов к учету ионосферных задержек, применяемых в системах ГЛОНАСС / GPS, и оценка их влияния на погрешность определения псевдодалности. Использование моделей позволяет уменьшить влияние ионосферы на трассу распространения сигнала, но в условиях экстремальной солнечной активности (а также в специфических регионах) ионосфера по-прежнему остается одним из основных источников погрешности определения псевдодалности.

В ГЛОНАСС используется модель с гармонической аппроксимацией, учитывающей суточные и полусуточные вариации электронной концентрации. Модель Клобучара, используемая в GPS, основана на упрощенной эмпирической модели с суточными вариациями, описываемой косинусоидальной функцией. Модели BeiDou и Galileo не рассматривались, поскольку в BeiDou используется модифицированная версия модели Клобучара, что делает ее методологически близкой к модели GPS, а модель NeQuick, применяемая в Galileo, по ее параметризации и подходу к описанию глобальных вариаций вертикального электронного содержания структурно схожа с моделью ГЛОНАСС с акцентом на региональные особенности и гармонические компоненты. Это позволяет рассматривать модели, используемые в Galileo и ГЛОНАСС, в рамках одного класса.

По данным из навигационных сообщений определены модельные значения вертикального электронного содержания для восьми наземных станций измерения, а также значения по данным ионосферных карт Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения АО «ЦНИИмаш». Проведено сравнение полученных значений вертикального электронного содержания со значениями, вычисленными по двухчастотным наблюдениям ГЛОНАСС. Сравнение показало наличие существенных расхождений между модельными значениями полного электронного содержания (ГЛОНАСС/GPS), фактическими данными (двухчастотные измерения) и картами вертикального электронного содержания в периоды суточных максимумов электронного содержания, коррелирующих для ГЛОНАСС с индексом солнечной активности и широтой места. Проанализирован алгоритм расчета поправки к определению псевдодалности по модели ГЛОНАСС и выявлены неточности, которые могут быть устранены заменой отдельных формул.

Проведенное исследование подчеркивает необходимость совершенствования ионосферных моделей для повышения точности навигации, особенно в контексте развития технологий автономного транспорта и высокоточного позиционирования.

Ключевые слова: ГНСС, ГЛОНАСС, ионосферная задержка сигнала, вертикальное электронное содержание, псевдодалность.

Контакты для связи: Рощина Елена Александровна (e.roshchina@goz.ru).

Для цитирования: Рощина Е. А., Сальцберг А. В. Сравнительный анализ моделей учета задержек сигналов ГНСС в ионосфере // Труды ИПА РАН. 2025. Вып. 75. С. 12–20.
<https://doi.org/10.32876/AplAstron.75.12-20>

Comparative Analysis of Models for Signal Delays in Ionosphere

E. A. Roshchina, A. V. Saltsberg

JSC “Obukhov Plant”, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The paper compares two approaches to estimating ionospheric delays used in GLONASS and GPS systems, and evaluates the impact of these models on pseudorange determination errors. While the considered models reduce ionospheric delay effects, during periods of high solar activity or in certain regions, the influence of ionospheric delays on signal propagation remains a primary source of pseudorange errors for users.

The GLONASS system employs a model with harmonic approximation, accounting for diurnal and semi-diurnal variations in electron density. In contrast, the Klobuchar model used in GPS is based on a simplified empirical approach, describing diurnal variations with a cosine function. Models used in BeiDou and Galileo were not analyzed in this study. BeiDou's model is a modified version of the Klobuchar model, making it methodologically similar to GPS. The Galileo model, NeQuick, is structurally akin to the GLONASS approach in its parameterization and in describing global vertical electron content variations, with particular emphasis on regional features and harmonic components. This similarity allows us to categorize Galileo's and GLONASS's models within the same class.

The model values of vertical electron content for eight ground-based sites were obtained using navigation messages data. Also, the values were derived from ionospheric maps provided by the Information and Analytical Center for Coordinate-Time and Navigation Support (JSC “TsNIIMash”). These values were compared with those calculated from the inter-frequency difference of pseudorange code observations using GLONASS. The comparison revealed discrepancies between the model-derived vertical electron content values (GLONASS/GPS), actual data (inter-frequency code measurements), and vertical electron content maps during daily maxima of electron content. These discrepancies correlate with the solar activity index and geographic latitude for GLONASS. The analysis also identified inaccuracies in the GLONASS model that could potentially be corrected by revising certain formulas.

This research emphasizes the need for further improvements in ionospheric modeling to enhance navigation accuracy, especially in the context of advancing autonomous vehicle technologies and high-precision positioning systems.

Keywords: GNSS, GLONASS, ionospheric delay, vertical electron content, pseudorange.

Contacts: Elena A. Roshchina (e.roshchina@goz.ru).

For citation: Roshchina E. A., Saltsberg A. V. Comparative analysis of models for signal delays in ionosphere // Transactions of IAA RAS. 2025. Vol. 75. P. 12–20.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.75.12-20>

Введение

Одним из перспективных направлений развития системы ГЛОНАСС является снижение погрешности навигационных определений потребителей базовой услуги при условии применения одночастотной аппаратуры потребителя с 9.5 м до 0.1 м (Карутин, Кузенков, 2023). Точность навигационных определений характеризуется не только погрешностью эфемеридно-временной информации, но и погрешностями учета задержек сигнала в ионосфере и тропосфере, а также погрешностями калибровок наземной и бортовой аппаратуры.

Разработка методов учета ионосферных задержек является одним из ключевых факторов повышения точности глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Существует несколько глобальных моделей, используемых ГНСС, в том числе модель Клобучара (Klobuchar, 1987), модель NeQuick (European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users, 2016), BDGIM (Yuan et al., 2019), адаптивная модель ГЛОНАСС (Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС) и др. К настоящему времени сравнение моделей проводилось многими авторами (Ясюкевич и др., 2021), цель же данной работы — исследовать, каков характер и величина погрешностей, вносимых в определение псевдодальности на этапе учета ионосферной задержки сигнала ГНСС согласно реальным текущим данным. Наиболее интересен анализ погрешности при учете задержки сигнала в северном полушарии, особенно в Арктике, где актуальность навигационных определений растет в связи с развитием северных регионов. Потребители на территории РФ в настоящее время широко используют системы GPS и ГЛОНАСС. В данной работе сравниваются погрешности моделей этих систем.

Задержка сигнала в ионосфере

Измеренная в некоторый момент времени t псевдодальность P_i^j включает в себя ионосферную задержку сигнала:

$$P_i^j = \rho_i^j + c(t_i - t^j) + T_i^j + I_i^j + c(b_i + b^j),$$

где ρ_i^j — геометрическое расстояние между j -космическим аппаратом (КА) и наземной i -станцией в момент t ;

c — скорость света;

$t_i - t^j$ — расхождение шкал времени КА и приемника;

T_i^j — поправка за задержку сигнала в тропосфере;

I_i^j — поправка за задержку сигнала в ионосфере;

b_i — задержка сигнала в аппаратуре i -станции;

b^j — задержка в бортовой аппаратуре j -КА.

Задержка сигнала в ионосфере зависит от интегрального электронного содержания по трассе распространения сигнала и определяется по известной формуле:

$$I = 40.364 \cdot \frac{STEC}{f^2} \text{ или } I = 40.364 \cdot \frac{VTEC}{f^2} \cdot \sec(z_{pp}),$$

где f — несущая частота навигационного сигнала (Гц), МГц;

$STEC$ — интегральное значение электронной концентрации вдоль пути распространения сигнала в ионосфере, 10^{16} м^{-2} ;

$VTEC$ — вертикальное электронное содержание в заданной точке ионосферы;

z_{pp} — зенитный угол вхождения луча в ионосферу в точке прокола (Klobuchar, 1987).

Модели и их параметры

В системе ГЛОНАСС для расчета вертикального электронного содержания F2-слоя ионосферы используется модель с гармонической аппроксимацией, учитывающей суточные и полусуточные вариации электронной концентрации. Исходными

данными для расчета являются геоцентрические координаты приемника и передатчика, несущая частота сигнала, момент времени UTC, а также три параметра, передаваемые в составе НС с кодовым разделением:

— коэффициент максимальной концентрации электронов F2-слоя ионосферы (коэффициент адаптации) c_A ,

— скорректированное значение индекса Солнечной активности $c_{F_{10.7}}$,

— среднесуточный индекс геомагнитной активности c_{Ap} .

В период 15.01.25 – 14.03.25 г. были приняты НС ряда аппаратов (R04, R05, R06, R11, R12, R21, R22, R24, R25) ГЛОНАСС. В рассматриваемый период значение параметра c_A не изменялось и было равным 1. На рис. 1 представлены фрагменты рядов параметров $c_{F_{10.7}}$ и c_{Ap} в сравнении с индексом геомагнитной активности Ap и индексом активности Солнца $F_{10.7}$ по данным (GFZ Helmholtz Centre for Geosciences, 2025) (далее — GFZ) за один месяц. Всего за время наблюдения было три пика солнечной активности, когда индекс $F_{10.7}$ превышал значение 200 с.е.п., третий пик пришелся на март 2025 г.

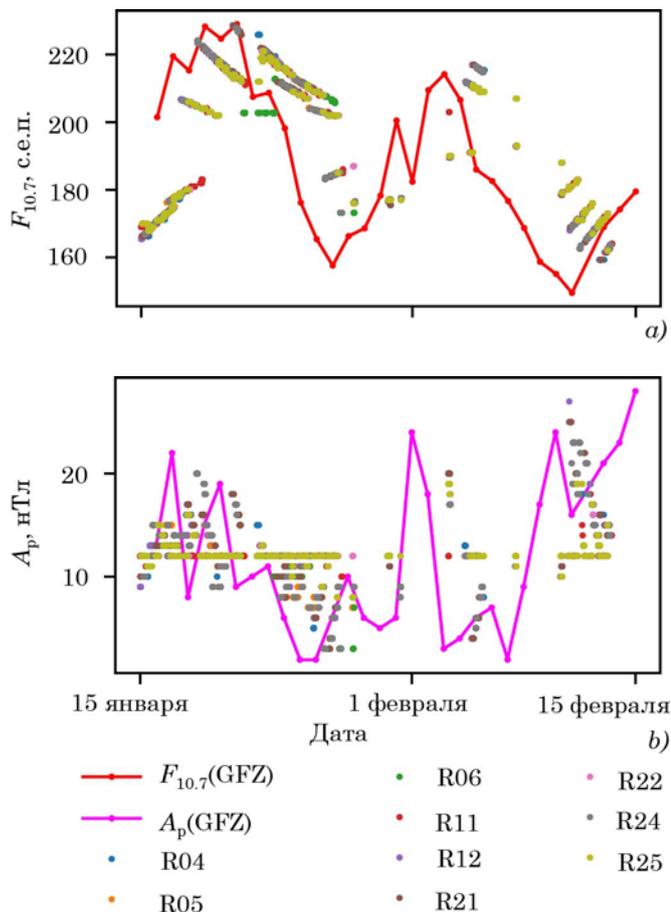


Рис. 1. Ход индексов активности Солнца $F_{10.7}$ и геомагнитной активности Ap по данным GFZ и параметров $c_{F_{10.7}}$ и c_{Ap} из НС аппаратов ГЛОНАСС, номера которых приведены в подписях

Также в работе рассмотрены результаты определения $VTEC$ по модели Клобучара, которая представляет собой упрощенную эмпирическую модель с постоянной частью для задержки сигнала в ночное время и с суточными вариациями вертикального электронного содержания, описываемыми косинусоидальной функцией, амплитуда и период которой зависят от геомагнитной широты приемника. Для расчета амплитуды и периода в навигационном сообщении GPS передаются потребителю коэффициенты модели: $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$.

Сравнение модельных и фактических значений

Для анализа расчетного и измеренного вертикального электронного содержания в ионосфере было выбрано восемь измерительных станций International GNSS Service (International GNSS Service) (далее IGS), местоположения которых представлены на рис. 2. Станции выполняют двухчастотные измерения НС ГЛОНАСС с кодовым разделением, которые доступны в архиве (Crystal Dynamics Data Information System, 2025), список станций приведен в таблице. Станции выбраны так, чтобы были представлены разные ионосферные зоны:

— экваториальная аномалия, которая состоит из двух областей по обе стороны от геомагнитного экватора на широтах $15\text{--}20^\circ$, где днем образуются максимумы ионизации за счет «фонтан-эффекта»;

— область средних широт;

— авроральный овал — область, где наиболее часто наблюдаются полярные сияния. В спокойные периоды граница авроральной зоны днем отстоит от магнитного полюса на $10\text{--}16^\circ$, ночью — на $20\text{--}23^\circ$. Во время магнитных бурь авроральный овал может смещаться в средние широты;

— полярная зона.

Далее для каждой станции были рассчитаны значения $VTEC$ по измерениям сигналов с кодовым разделением с несущими частотами L1 и L2. Были выбраны измерения на малых зенитных углах входа луча в ионосферу, чтобы минимизировать погрешности за счет градиента $VTEC$ по вертикали и горизонтали. Значения $VTEC$ вычислены в соответствии с методикой, описанной в (Montenbruck et al., 2014). Если в момент t были определены псевдодалности P_{il1}^j и P_{il2}^j по сигналам на несущих частотах f_1 и f_2 диапазонов L1 и L2, то полное электронное содержание определяется по формуле:

$$STEC = \frac{1}{40.36 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)} \times (P_{il1}^j - P_{il2}^j - c \cdot (b_{il1} + b_{L1}^j - b_{il2} - b_{L2}^j)).$$

Список выбранных станций IGS

Код станции	Расположение	Широта, град.	Долгота, град.
KLSQ	Гренландия	67	-51
SCOR	Гренландия	70	-22
THU2	Гренландия	77	-69
HKSL	Гонконг	22	114
HKWS	Гонконг	22	114
BADG	РФ («Бадарь»)	52	102
SVTL	РФ («Светлое»)	60	30
ZECK	РФ («Зеленчукская»)	44	42

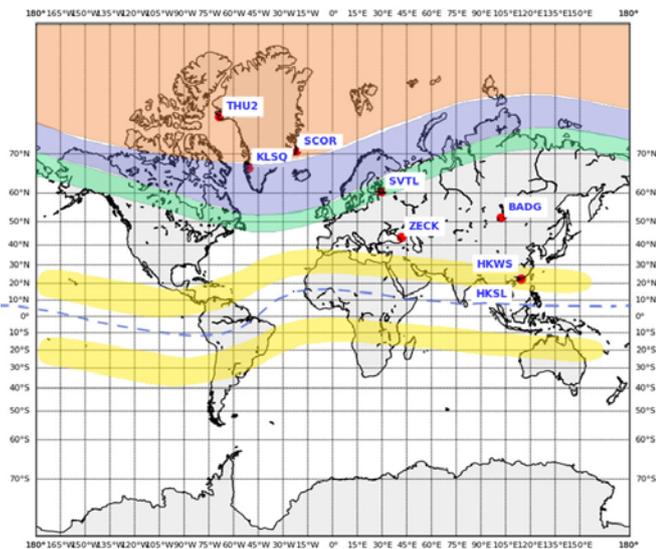


Рис. 2. Измерительные станции IGS. Область экваториальной аномалии условно отмечена желтым цветом, зона аврального овала — голубым (день) и зеленым (ночь), полярная зона — бежевым

Поправки за счет задержек в аппаратуре приемника и передатчика были учтены согласно данным IGS ([Crystal Dynamics Data Information System, 2025](#); [Wang et al., 2016](#)). Вертикальное электронное содержание $VTEC$ определено путем умножения $STEC$ на косинус зенитного угла z_{pp} вхождения сигнала в ионосферу:

$$VTEC \approx STEC * \cos(z_{pp}), 10^{16} \text{ м}^{-2}.$$

При анализе погрешности определения псевдодальности вместо $VTEC$ удобно рассматривать вертикальную задержку сигнала с несущей частотой $L1$, определяемую по формуле:

$$\Delta S = 40.364 \cdot \frac{VTEC}{(1602)^2}, \text{ м.}$$

В процессе расчета вертикальной задержки $\Delta S_{L1,2}$ по двухчастотным измерениям были определены координаты точек прокола ионосферы, для которых также были вычислены вертикальные

задержки сигнала с использованием моделей ГЛОНАСС ($\Delta S_{\text{ГЛОНАСС}}$), Клобучара (ΔS_{GPS}) и по глобальным ионосферным картам ИАЦ КВНО (ΔS_{IONEX}) ([ИАЦ КВНО, 2025](#); [Schaer, Gunter, 1998](#)). Полученные ряды представлены на рис. 3–6 для станций из разных широтных зон.

Для станций в области экваториальной аномалии (рис. 3) двухчастотные измерения в периоды дневных максимумов электронной концентрации превышают значения, полученные по картам ИАЦ КВНО. Предположительно, это различие может быть объяснено влиянием сглаживания данных при расчете карт. Расчетные значения вертикальной задержки по модели ГЛОНАСС согласуются с фактическими, полученными по двухчастотным измерениям. Модель Клобучара для дневных максимумов вертикальной задержки дает заниженные значения.

Для среднеширотных станций (рис. 4) двухчастотные измерения хорошо согласуются со значениями, полученными по картам электронного содержания, на всех интервалах кроме периодов максимумов суточного электронного содержания. Для них модель ГЛОНАСС зачастую дает завышенные значения в зоне дневных максимумов, но есть периоды, когда модельные значения хорошо согласуются с фактическими. Модель Клобучара стабильно завышает значения вертикальной задержки в дневных максимумах примерно на 50 %.

Похожая картина наблюдается для станций, расположенных в зоне аврального овала («Светлое» и южная часть Гренландии), и полярных станций (северная часть Гренландии) (рис. 5, 6), где электронное содержание в ионосфере ниже, и еще больше растет отрыв модельных значений от реальных в суточных максимумах.

На рис. 7 представлены распределения разностей вертикальной задержки сигнала для расчетных значений, определенных по картам электронного содержания, и по моделям со значениями, вычисленными по двухчастотным измерениям. Разности вертикальной задержки сигналов

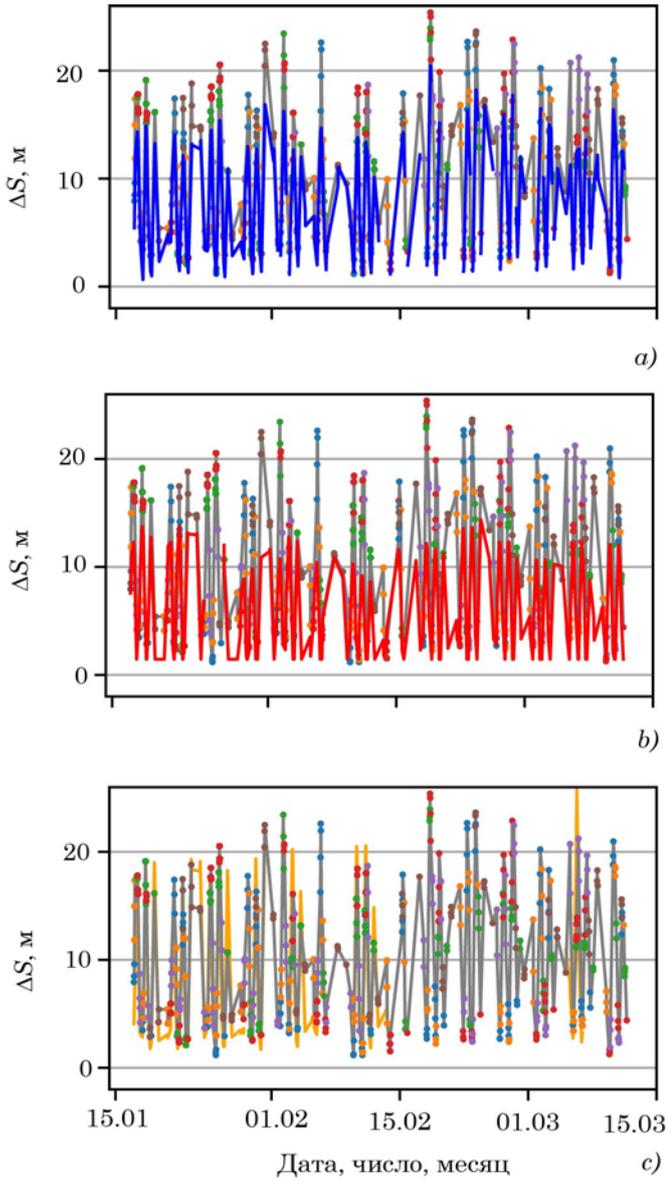


Рис. 3. Сравнение вертикальной задержки сигнала в ионосфере $\Delta S_{L_{1,2}}$, вычисленной для Гонконга (HKSL): а) по двухчастотным измерениям и по картам вертикального электронного содержания ΔS_{IONEX} ; б) по модели Клубучара ΔS_{GPS} ; в) по модели ГЛОНАСС $\Delta S_{ГЛОНАСС}$

показывают, что карты ионосферного содержания хорошо согласуются с двухчастотными измерениями. В среднем, разность составляет около 1.9 м для экваториальной зоны и 0.4 м — для более высоких широт. Модель Клубучара дает заниженные значения максимумов вертикальной задержки

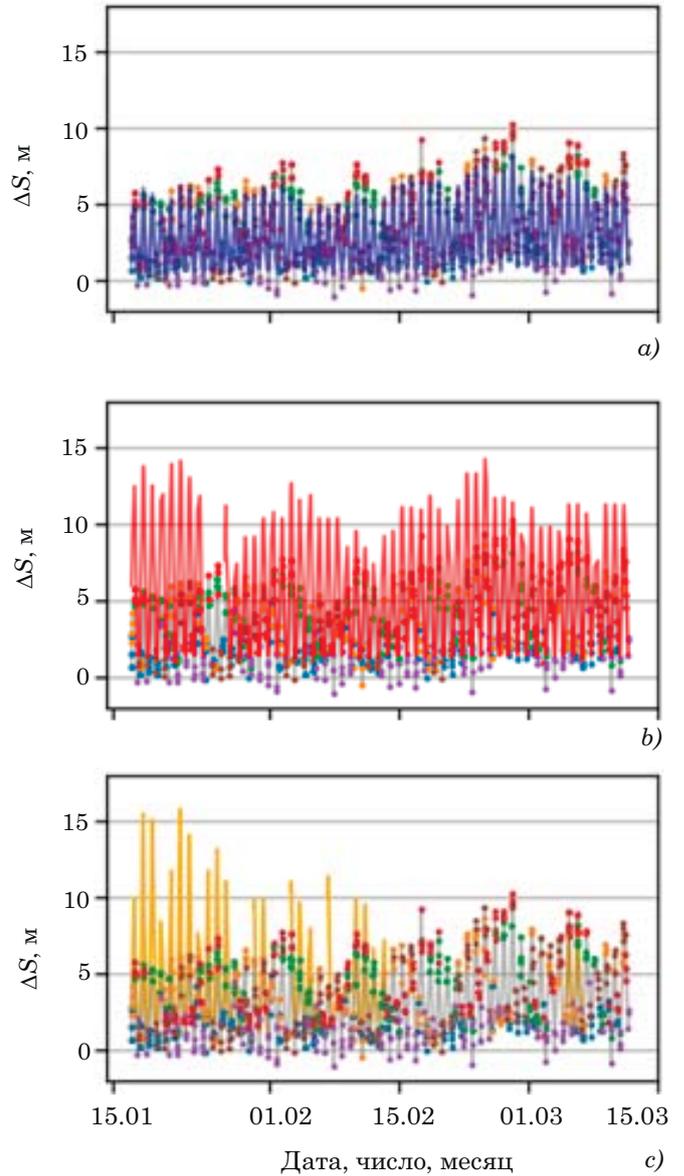


Рис. 4. Сравнение вертикальной задержки сигнала в ионосфере $\Delta S_{L_{1,2}}$, вычисленной для станции «Бадарь» (BADG): а) по двухчастотным измерениям и по картам вертикального электронного содержания ΔS_{IONEX} ; б) по модели Клубучара ΔS_{GPS} ; в) по модели ГЛОНАСС $\Delta S_{ГЛОНАСС}$

в зоне экваториальной аномалии (в среднем на 2 м) и завышенные (в среднем на 2.8–4.6 м) значения для более высоких широт. ГЛОНАСС лучше аппроксимирует вертикальную задержку, чем модель Клубучара. Разности модельных значений $\Delta S_{ГЛОНАСС}$ и $\Delta S_{L_{1,2}}$ в экваториальной зоне в среднем

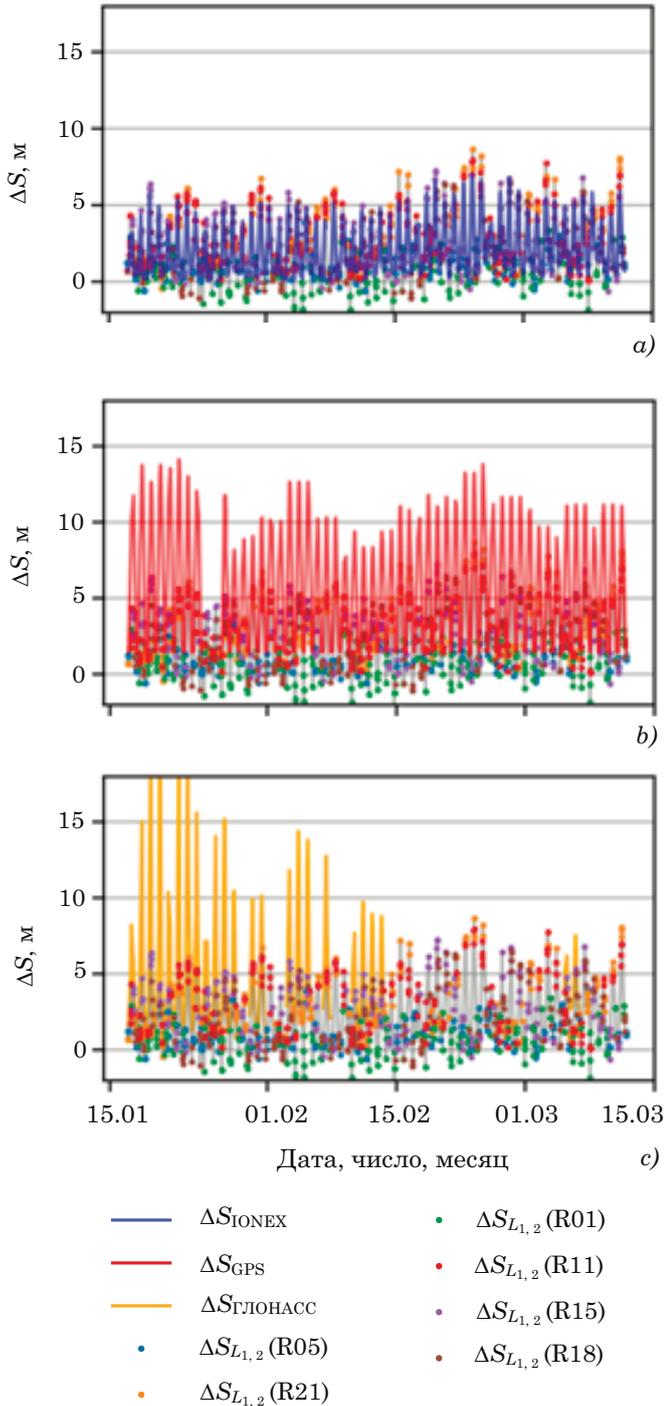


Рис. 5. Сравнение вертикальной задержки сигнала в ионосфере $\Delta S_{L1,2}$ для станции в «Светлом» (SVTL), вычисленной: а) по двухчастотным измерениям и по картам вертикального электронного содержания ΔS_{IONEX} ; б) по модели Клобучара ΔS_{GPS} ; в) по модели ГЛОНАСС $\Delta S_{Glonass}$

составляют 0.3 м, а в остальных областях 1–2 м, но в периоды суточных максимумов электронного содержания значения разностей могут достигать 18 м.

И для моделей Клобучара и ГЛОНАСС прослеживается зависимость разностей от широты места. Кроме того, модель ГЛОНАСС демонстрирует сильную корреляцию завышенных значе-

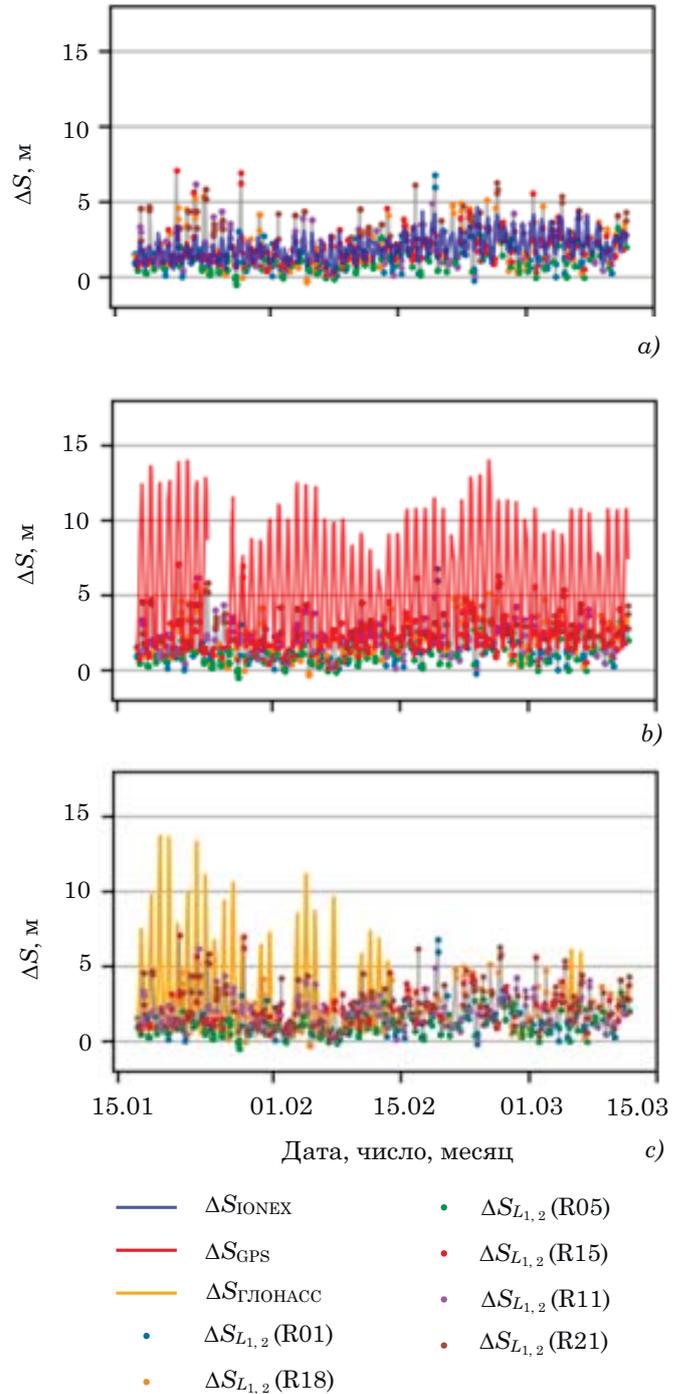


Рис. 6. Сравнение вертикальной задержки сигнала в ионосфере $\Delta S_{L1,2}$ для станции в Гренландии (THU2), вычисленной: а) по двухчастотным измерениям и по картам вертикального электронного содержания ΔS_{IONEX} ; б) по модели Клобучара ΔS_{GPS} ; в) по модели ГЛОНАСС $\Delta S_{Glonass}$

ний $VTEC$ с индексом солнечной активности $F_{10.7}$ в средних и высоких широтах (рис. 8). Таким образом, в периоды высокой солнечной активности модель нуждается в корректировке с помощью параметра c_A , ограничивающего значение максимальной электронной концентрации F2-слоя.

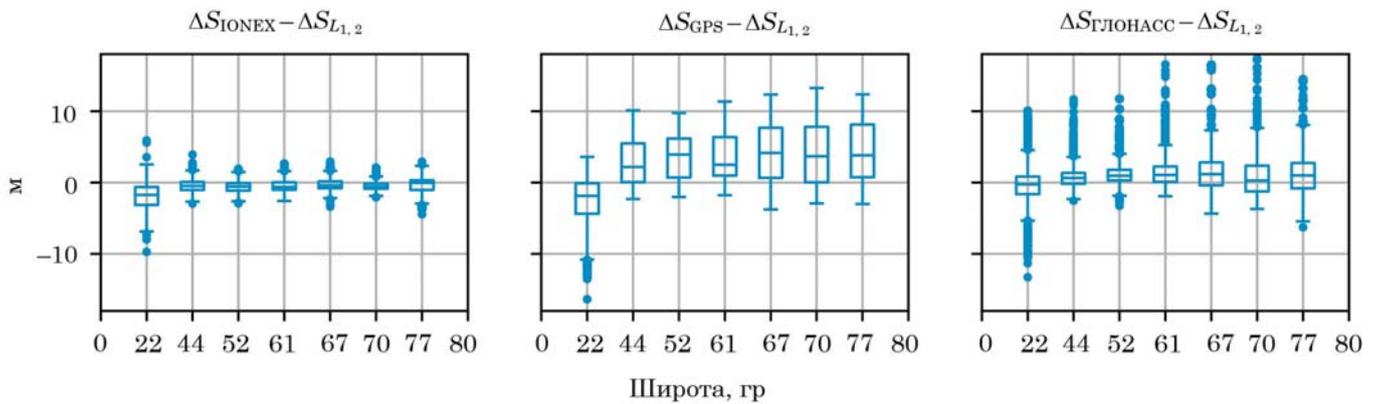


Рис. 7. Зависимости от широты станций распределения разностей измеренных вертикальных задержек сигналов $\Delta S_{L_{1,2}}$ и расчетных: по картам вертикального электронного содержания ΔS_{IONEX} ; по модели Клубучара ΔS_{GPS} ; по модели ГЛОНАСС $\Delta S_{ГЛОНАСС}$

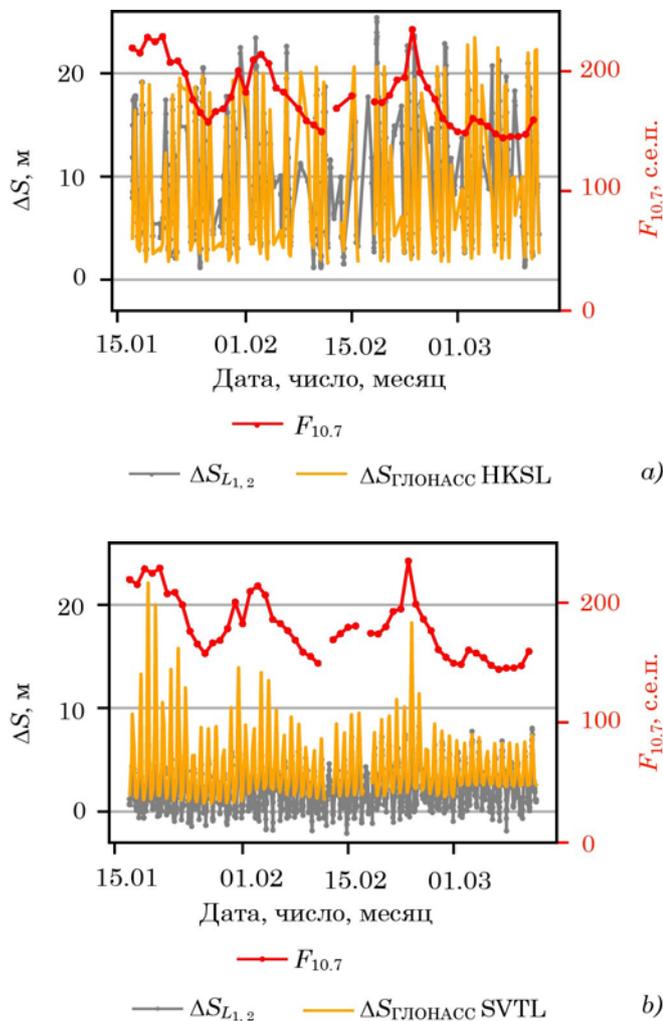


Рис. 8. Зависимость суточных максимумов значений вертикальной задержки, определенных по модели ГЛОНАСС, от индекса активности Солнца $F_{10.7}$ для станций а) в области экваториальной аномалии и б) в зоне аврорального овала

Погрешность за счет задержки обновлений данных в навигационном сообщении

На погрешность расчетного вертикального электронного содержания также влияют особенности обновления и размножения параметров на борту КА. Параметры модели в принятых НС могут существенно различаться для разных КА на одну и ту же эпоху, а также запаздывать относительно фактических значений.

На рис. 9 представлены разности максимальных и минимальных значений вертикальной задержки для станции в «Светлом». Значения вертикальной задержки были определены на одни и те же моменты времени по модели ГЛОНАСС и параметрам s_A , $s_{F_{10.7}}$ и s_{Ar} из принятых НС КА ГЛОНАСС. Таким образом, при измерении псевдодальностей по НС КА на одну эпоху разные наборы параметров дадут разные значения вертикальной задержки, и разности могут достигать 10 м для вертикального распространения в одной

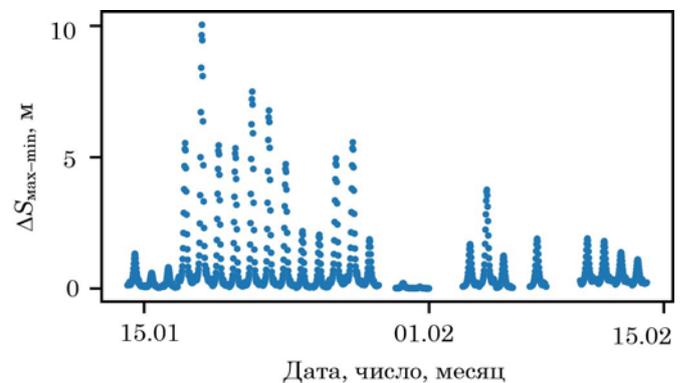


Рис. 9. Разности максимальных и минимальных значений вертикальной задержки, вычисленных по разным наборам параметров модели ГЛОНАСС из НС различных КА на одну и ту же эпоху, для станции SVTL

и той же точке ионосферы. При расчете полной задержки сигнала погрешность определения одной псевдодальности увеличится при умножении на секанс зенитного угла в точке прокола, а при расчете местоположения еще больше усугубит ситуацию геометрический фактор.

Погрешность за счет использования упрощенных формул

Некоторый вклад в погрешность, вносимую при учете задержек в ионосфере, может дать использование в модели приближенных формул.

В алгоритме модели ГЛОНАСС геомагнитные координаты приемника определяются по формулам сферической тригонометрии с фиксированными значениями географических координат геомагнитного полюса 78.5 с.ш и 68.7 з.д. В применении к точкам на всей земной поверхности алгоритм дает погрешность до 2° по сравнению с точными векторными формулами. В областях [77.4 с.ш., 79.6 с.ш.] × [63.1 з.д., 74.4 з.д.] и [77.3 ю.ш., 79.6 ю.ш.] × [105.6 в.д., 116.9 в.д.] выражение для синуса геомагнитной широты дает значение по модулю больше единицы и, таким образом, в этих областях алгоритм неприменим. Точный расчет геомагнитных координат производится с помощью векторных формул. Матрица преобразования является результатом перемножением матриц вращения вокруг оси O_z на угол $-68^\circ.7$ и вокруг оси O_y на угол $(90-78^\circ.5)$ (Жаров, 2006):

$$A = \begin{bmatrix} \sin \varphi_G \cdot \cos \lambda_G & \sin \varphi_G \cdot \sin \lambda_G & -\cos \varphi_G \\ -\sin \lambda_G & \cos \lambda_G & 0 \\ \cos \varphi_G \cdot \cos \lambda_G & \cos \varphi_G \cdot \sin \lambda_G & \sin \varphi_G \end{bmatrix},$$

где φ_G, λ_G — геомагнитные широта и долгота соответственно.

Тогда единичный радиус-вектор в геомагнитной системе координат вычисляется по формуле:

$$\mathbf{r}' = A\mathbf{r},$$

где \mathbf{r} — единичный радиус-вектор в географической системе координат:

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \lambda \\ \cos \varphi \cdot \sin \lambda \\ \sin \varphi \end{bmatrix},$$

где φ, λ — географические широта и долгота соответственно.

Геомагнитные координаты определяются из компонент радиус-вектора (X', Y', Z') :

$$\varphi_G = \begin{cases} \arctg\left(\frac{Z'}{\sqrt{X'^2 + Y'^2}}\right), & \text{если } X'^2 + Y'^2 \neq 0 \\ \pm \frac{\pi}{2}, & \text{если } X'^2 + Y'^2 = 0 \end{cases},$$

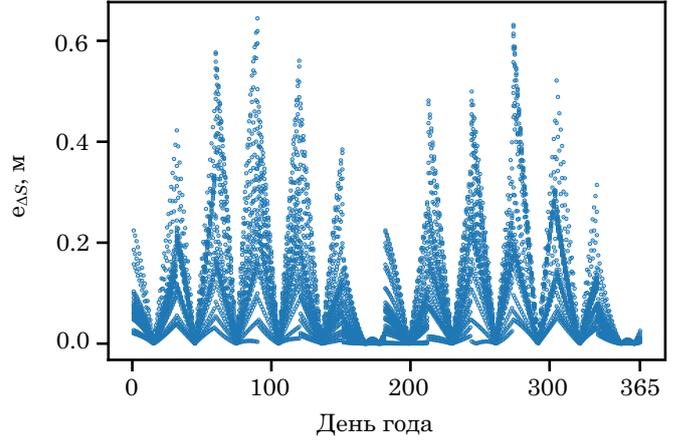


Рис. 10. Погрешность расчетной вертикальной задержки $\Delta S_{\text{ГЛОНАСС}}$ за счет склонения Солнца, вычисленного по месяцу даты, для станции SVTL

$$\lambda_G = \begin{cases} \arctg\left(\frac{Y'}{X'}\right) + \begin{cases} \pi, & \text{если } X' < 0 \\ 2\pi, & \text{если } X' > 0 \text{ и } Y' < 0 \end{cases} \\ \frac{\pi}{2}, & \text{если } X' = 0 \text{ и } Y' > 0 \\ \frac{3\pi}{2}, & \text{если } X' = 0 \text{ и } Y' < 0 \end{cases}.$$

Расчет склонения Солнца dec производится по месяцу даты $month$ с использованием приближенной формулы согласно (ИКД ГЛОНАСС):

$$dec = \arcsin\{0.39795 \cdot \sin[\pi \cdot (month - 3.167)/6]\}.$$

Разность вычисленного таким образом склонения с эфемеридными значениями согласно планетной теории DE431 (Служба естественных спутников планет MULTI-SAT) достигает 7°. Погрешность определения склонения Солнца дает вклад в погрешность при расчете вертикального электронного содержания. Например, для станции SVTL при значениях параметров модели $c_{F10.7} = 154$ с.е.п., $A_p = 9$ нТл, $c_A = 1$ погрешность вертикальной задержки сигнала на частоте L1 $\Delta S_{\text{ГЛОНАСС}}$ может превышать 60 см (рис. 10). Существует несложный алгоритм расчета координат Солнца, дающий значения на достаточном уровне точности (Меёс, 1988), которым нетрудно заменить используемые в настоящее время формулы.

Заключение

При учете задержки сигнала в ионосфере для одночастотных приемников в определение псевдодальности могут вноситься следующие погрешности:

- за счет некорректной работы модели при высокой солнечной активности в средних и высоких широтах в периоды суточных максимумов электронного содержания F2-слоя;
- за счет использования в модели приближенных формул;
- вследствие особенностей обновления параметров модели.

Необходимо отметить, что адаптивная модель ГЛОНАСС намного лучше в сравнении с моделью Клобучара аппроксимирует значения вертикального электронного содержания в смысле математического ожидания и среднеквадратического отклонения за исключением существенных отклонений в суточных максимумах.

Кроме того, анализ алгоритма модели ГЛОНАСС показал, что переход к использованию точных формул расчета геомагнитных координат и склонения Солнца позволит снизить погрешности расчета вертикального электронного содержания.

Литература

Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. Редакция 1.0. М.: 2016. С. 92–100.

Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 15.05.2025).

Служба естественных спутников планет MULTI-SAT (IMCSE, ГАИШ МГУ) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sai.msu.ru/neb/nss/> (дата обращения 18.09.2025).

Карутин С. Н., Кузнецов А. Н. Научно-технические проблемы развития системы ГЛОНАСС в современных условиях // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 67. С. 51–54.

Меёс Ж. Астрономические формулы для калькуляторов. М.: Мир, 1988. С. 65.

Жаров В. А., Сферическая астрономия. Фрязино, 2006. С. 90.

Ясюкевич Ю. В., Ясюкевич А. С., Затолокин Д. А., Данильчук Е. И. Оценка эффективности моделей ионосферы для коррекции одночастотного координатного решения при позиционировании по ГНСС // Материалы XIX международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М., 2021.

Crystal Dynamics Data Information System (CDDIS). NASA [Электронный ресурс]. URL: <https://cddis.nasa.gov>. (accessed: 14.03.2025)

European GNSS (Galileo) Open Service-Ionospheric Correction Algorithm for Galileo Single Frequency Users. Issue 1.2. European commission, 2016. P. 83.

GFZ Helmholtz Centre for Geosciences [Электронный ресурс]. URL: <http://kp.gfz.de/en> (accessed: 14.03.2025).

International GNSS Service [Электронный ресурс]. URL: <http://igs.org> (accessed: 14.03.2025).

Klobuchar J. Ionospheric time-delay algorithms for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1987. no. 3. P. 325–331.

Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps // Navigation. 2014. no. 61. P. 191–201.

Schaer S., Gurtner W. IONEX: The IONosphere Map EXchange Format Version 1 // Proceedings of the IGS AC Workshop. 1998. 15 p.

Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations // Journal of Geodesy. 2016. Vol. 90, no. 3. P. 209–220.

Yuan Y., Wang N., Li Z., Huo X. The BeiDou global broadcast ionospheric delay correction model (BDGIM) and its preliminary performance evaluation results // NAVIGATION. 2019. Vol. 66. P. 55–69.