Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 335–338.

УДК 551.510.535
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-335
ORCID: 0009-0008-5246-2246

ТОЧНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДИНАМИКИ ПЭС ПО ДАННЫМ ГНСС-ПРИЕМНИКА, РЕАЛИЗОВАННОГО НА ОСНОВЕ ОБЩЕДОСТУПНЫХ КОМПОНЕНТОВ

А.И. Сапунова, И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад, В.С. Лобанова, В.М. Ермак

Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН,
sashasap789@gmail.com

THE ACCURACY OF RESTORING THE DYNAMICS OF THE TEC ACCORDING TO THE DATA OF GNSS RECEIVER REALIZED ON THE BASIS OF ACCESSIBLE COMPONENTS

A.I. Sapunova, I.A. Ryakhovskya, Y.V. Poklad, V.S. Lobanova, V.M. Ermak

Academician M.A. Sadovsky Institute of Geospheric Dynamics RAS, sashasap789@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты исследования качества сигналов, регистрируемых приемником u-blox ZED F9P. Для анализа применимости приемников данного вида для изучения динамики ионосферы полученные значения ПЭС и ROT были сопоставлены с результатами регистрации сигналов GPS с привлечением данных JAVAD Prego. Полученные результаты показывают высокую согласованность.

Ключевые слова: ГНСС, u-blox ZED F9P, полное электронное содержание (ПЭС).

Abstract. We present results of the study on quality of signals recorded by the u-blox ZED-F9P receiver. To assess the applicability of this type of receiver for studying ionospheric dynamics, the obtained TEC and ROT values were compared with the results of GPS signal recording using data from the JAVAD Prego receiver. The obtained results demonstrate a high degree of consistency.

Keywords: GNSS, u-blox ZED F9P, Total Electron Content (TEC).

ВВЕДЕНИЕ

В ГФО «Михнево» с 2014 г. ведется непрерывная регистрация сигналов ГНСС с помощью приемников JAVAD Prego и JAVAD SIGMA 3T. На основе зарегистрированных сигналов возможно восстановление как наклонного, так и абсолютного значения вертикального полного электронного содержания (ПЭС).

С 7 по 8 апреля 2026 г. в Геофизической обсерватории (ГФО) «Михнево» велась непрерывная регистрация сигналов ГНСС с помощью двухчастотного приемника u-blox ZED F9P**.** Для анализа применимости приемников данного вида для изучения динамики ионосферы полученные значения ПЭС были сопоставлены с результатами регистрации сигналов GPS специализированными геофизическими приемниками.

В работах [Кагогин, 2023; Gomez, Rodrigues, 2022; Tunini, 2022] показано, что данные приемники подходят как для амплитудного сцинтилляционного мониторинга, так и для мониторинга ионосферы.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Первичные данные приемника позволили оценить ПЭС — интегральный параметр состояния ионосферы, который характеризует количество свободных электронов на луче спутник—приемник. Расчет ПЭС проводился по фазовым измерениям псевдодальности [Афраймович, Перевалова, 2006]

$$I = \frac{1}{40.308}\,\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\left[(L_1\lambda_1 - L_2\lambda_2) + const_{1,2} + \sigma L\right], \quad (1)$$

где L_1, L_2 — фазовые измерения псевдодальности, f_1, f_2 — несущие частоты (для GPS они соответствуют 1575.42 и 1227.60 МГц, для GLONASS — 1602.56 и 1246.43 МГц), λ_1, λ_2 — длины волн, соответствующие несущим частотам, $const_{1,2}$ — константа, возникающая из-за неопределенности фазы, σL — ошибка измерений. Константа восстанавливается по результатам кодовых наблюдений.

Вертикальное ПЭС

$$I_V = I\cos\left(\arcsin\arcsin\left(\frac{R}{R+h}\cos\theta\right)\right), \quad (2)$$

где R — радиус Земли, h — высота подионосферной точки, θ — угол возвышения спутника над горизонтом, I — значение наклонного ПЭС.

Кроме того, немаловажной характеристикой состояния ионосферы является скорость изменения ПЭС (ROT):

$$ROT = \frac{dI_V}{dt}, \quad (3)$$

Этот параметр качественно описывает наличие возмущения в ионосфере.

ПРОЦЕСС РЕГИСТРАЦИИ СИГНАЛОВ

Для нашего исследования была выбрана антенна приемника JAVAD SIGMA 3T, так как по характеристикам и качеству она близка антенне, используемой с JAVAD Prego.

Основным отличием u-blox ZED F9P от профессиональных геофизических приемников являются доступные кодировки. При использовании тестируемого GPS-приемника нет возможности регистрировать спутники, на которых сигнал имеет W-кодировку, более надежную относительно C-кодировок. Поэтому для части спутников расчет ПЭС по двум частотам невозможен.

Фазовые измерения в отличие от кодовых позволяют получить более точные значения ПЭС с меньшими шумами. Поэтому мы сравнивали наклонное ПЭС по

двум приемникам. Наша методика предполагает нахождение ПЭС по данным фазовых измерений, а с помощью кодовых мы получаем константу, необходимую для устранения неопределенности фазы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 синяя кривая — ход относительного наклонного ПЭС по результатам регистрации u-blox ZED F9P, оранжевая — ПЭС по данным JAVAD Prego. Наблюдается значительная согласованность динамики ПЭС. Важно учитывать также углы возвышения спутников. При углах возвышения меньше 35º наблюдаются значительные расхождения. Это может быть вызвано как естественными препятствиями (в нашем случае лесом), так и особенностями регистрации близко к горизонту, где ионосфера на луче спутник—приемник очень неоднородна.

Важным параметром при исследовании динамики ионосферы является также *ROT*. На рис. 2 показаны сопоставления *ROT* для каждого спутника наблюдаемого созвездия. Синяя кривая — результаты по данным приемника u-blox ZED F9P, оранжевым – JAVAD Prego.

Аналогично ПЭС наблюдается значительная согласованность *ROT* по данным обоих приемников при углах возвышения более 35º. Это говорит о том, что на временных масштабах менее 1 мин u-blox ZED F9P позволяет исследовать динамику ионосферы с той же точностью, что JAVAD Prego.

Отдельно стоит отметить, что по отношению сигнал/шум (*SNR*) u-blox ZED F9P не уступает, а в некоторых случаях превосходит JAVAD Prego. В основном это может быть обусловлено как окружающими природными помехами (лес), так и большей мощностью сигнала при использовании C-кодировки. Для высокоточного определения фазы несущей частоты используется W-кодировка. Это важно для возможности отслеживания фазы без срывов. На рис. 3 видно, что *SNR* падает ниже 35 для u-blox ZED F9P (синяя кривая) при углах возвышения менее 20º, а для JAVAD Prego (оранжевая кривая) *SNR* достигает этого значения при высотах меньше 30º.

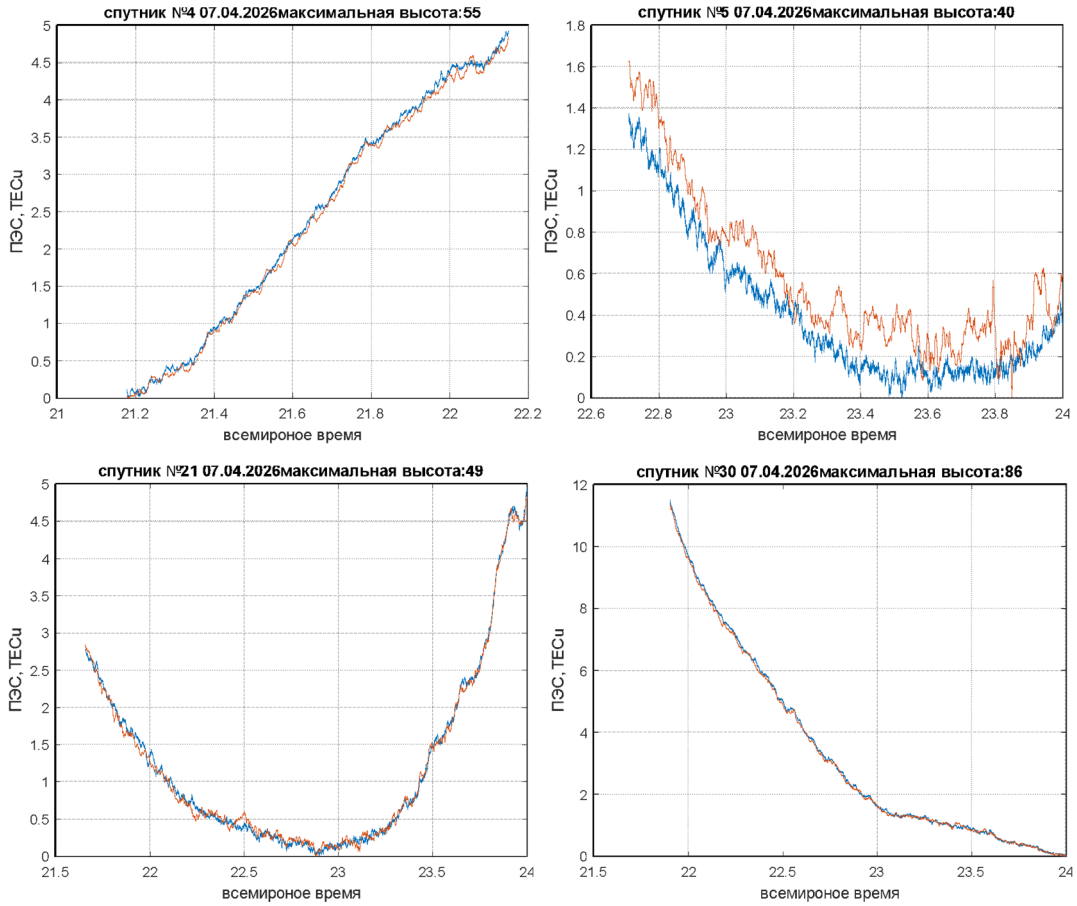

Рис. 1. Примеры сопоставления наклонного ПЭС за вторую половину 07.04.2026. Синяя кривая — результаты расчетов по данным u-blox ZED F9P, оранжевая — JAVAD Prego

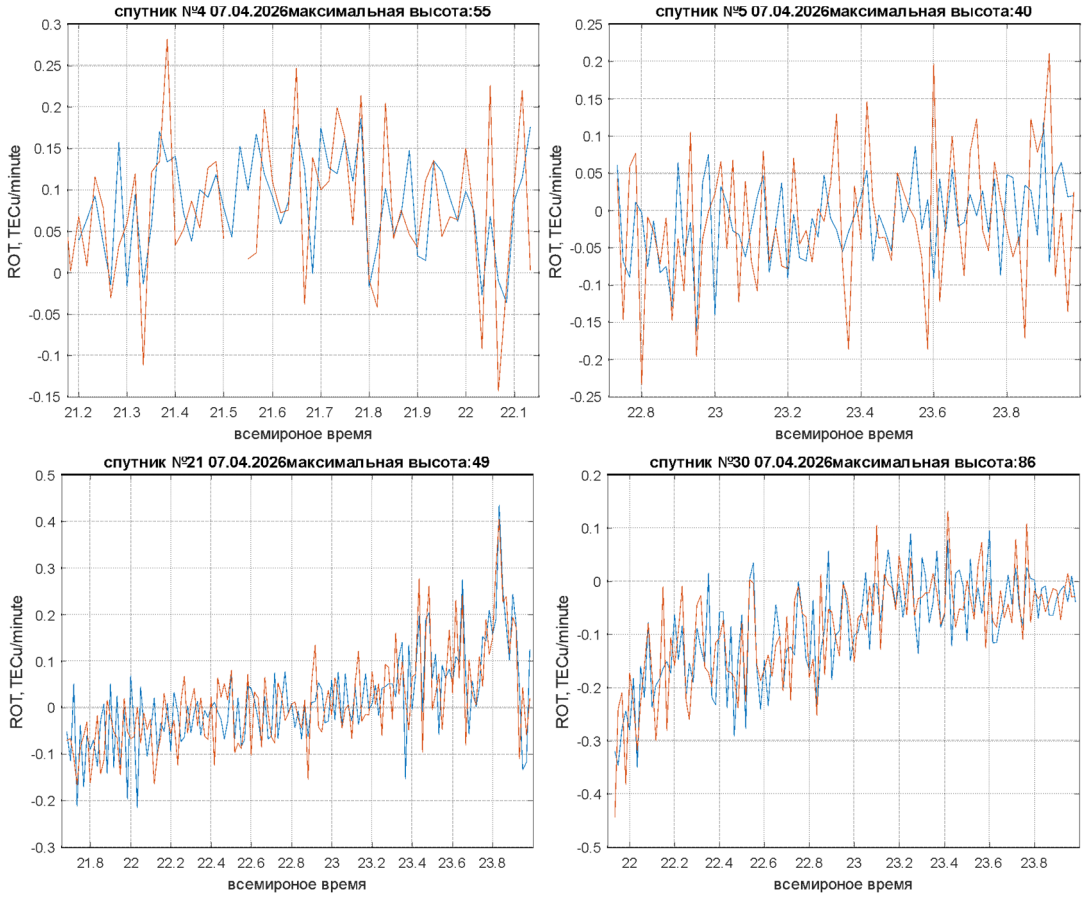

Рис. 2. Примеры сопоставления наклонного *ROT* за вторую половину 07.04.2026. Синяя кривая — результаты расчетов по данным u-blox ZED F9P, оранжевая — JAVAD Prego

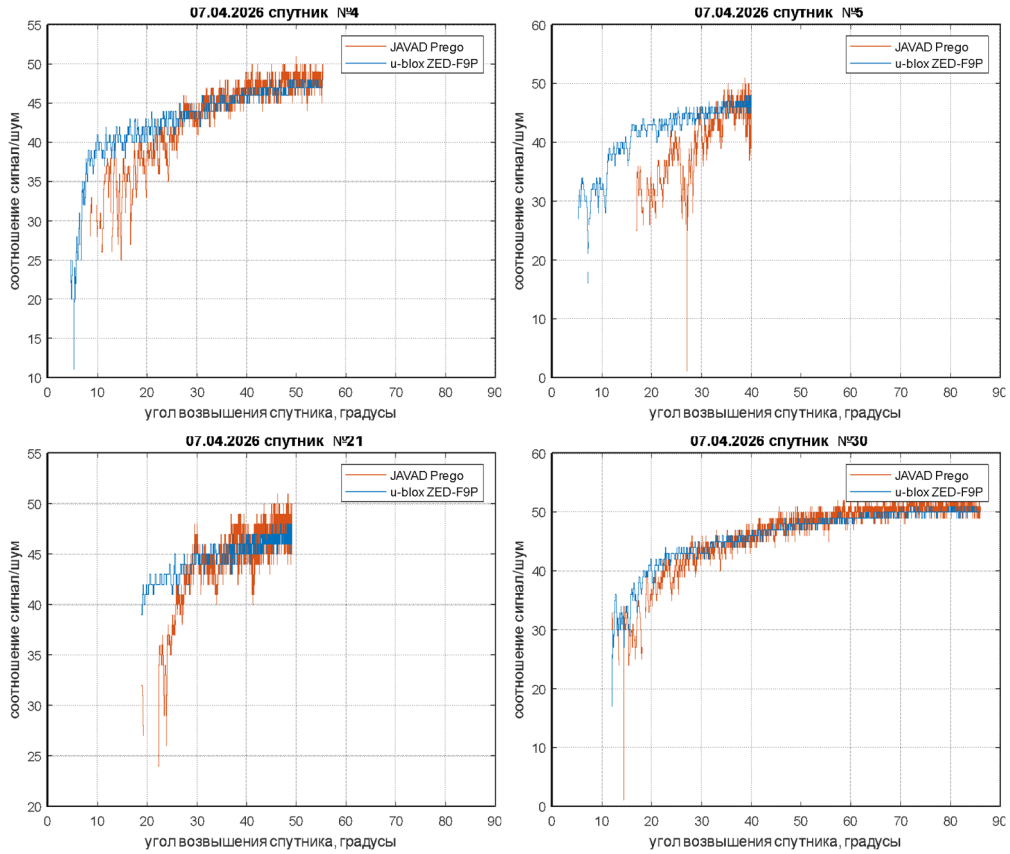

Рис. 3. Примеры сопоставления наклонного отношения сигнал/шум на частоте L1C за вторую половину 07.04.2026. Синяя кривая — результаты расчетов по данным u-blox ZED F9P, оранжевая — JAVAD Prego

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

После проведенного сопоставления можно утверждать, что u-blox ZED F9P является надежным регистратором сигналов ГНСС. Его преимуществом относительно остальных доступных нам приемников является дешевизна и небольшая потребляемая энергия. В дальнейшей работе планируется использовать u-blox для создания автономной сети регистраторов ГНСС, имеющей широкую географию, в том числе в полярной области.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 122032900175-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.

Когогин Д.А., Соколов А.В., Насыров И.А. и др. Приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на базе модуля U-BLOX ZED-F9P для ионосферных исследований // Геомагнетизм и аэрономия. 2023. Т. 63, № 6. DOI: 10.31857/S0033849423060074.

Gomez Socola J., Rodrigues F.S. ScintPi 2.0 and 3.0: low-cost GNSS-based monitors of ionospheric scintillation and total electron content // Earth, Planets and Space. 2022. V. 74, N 1. P. 185. DOI: 10.1186/s40623-022-01743-x.

Tunini L., Zuliani D., Magrin A. Applicability of cost-effective GNSS sensors for crustal deformation studies // Sensors. 2022. V. 22, N 1. P. 350. DOI: 10.3390/s22010350.