*Секция В. Физика атмосферы Земли, включая околоземное космическое пространство. БШФФ-2026. С. 266–269.*

УДК 550.388.2
DOI 10.62955/0135-3748-2026-266
ORCID 0009-0009-8865-4191

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЮДЖЕТНОГО ПРИЕМНИКА U-BLOX ZEDF9P ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ

**В.А. Кашпиров**

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, vkashpirov@mail.iszf.irk.ru

# USING THE LOW-COST U-BLOX ZED F9P RECEIVER TO STUDY IONOSPHERIC DYNAMICS

**V.A. Kashpirov**

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, vkashpirov@mail.iszf.irk.ru

**Аннотация.** В работе исследуется возможность применения приёмника u-blox ZED-F9P для регистрации ПИВ на основе анализа временных рядов ПЭС. В результате получилось, что временные ряды ПЭС, полученные по данным приемника u-blox согласуются с данными профессионального приемника Javad.

**Ключевые слова:** ГНСС, ионосфера, обработка данных

**Abstract.** This paper explores the feasibility of using the u-blox ZED-F9P receiver to record TIDs based on TEC time series analysis. The results showed that the TEC time series obtained from the u-blox receiver are consistent with those from the professional Javad receiver.

**Keywords:** GNSS, ionosphere, data processing

## ВВЕДЕНИЕ

Задача исследования ионосферной динамики является важной в спутниковой навигации и радиофизике, поскольку состояние ионосферы влияет на распространение радиоволн и работу глобальных навигационных систем. Одним из основных параметров исследования является полное электронное содержание (ПЭС), позволяющее анализировать пространственно-временную структуру ионосферы и связанные с ней процессы в системе Земля–Солнце. А основным средством для получения ПЭС являются приемники сигналов Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС), сети которых в большинстве своем развивались для задач, не связанных с мониторингом ионосферы и как следствие обладают не оптимальным покрытием для глобального мониторинга ионосферы.

Актуальность работы связана с необходимостью поиска доступных средств мониторинга ионосферы, которые бы помогли существенно улучшить глобальное покрытие таких сетей. Профессиональные ГНСС-приёмники обеспечивают высокую точность измерений, однако их стоимость ограничивает возможность создания плотных сетей наблюдений. В связи с этим представляет интерес исследование возможностей более бюджетных приемников, таких как u-blox ZED-F9P для задач ионосферного мониторинга. Такой приёмник для ионосферных исследований использовался в [D A Kogogin et al 2021 J. Phys.: Conf. Ser. 1991], однако остался ряд вопросов о точности получения вариаций ПЭС в интересах мониторинга перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) [Афраймович и Перевалова, 2006]. В настоящее время существуют подходы, которые позволяют оценить величину ПЭС агрегируя данные множества смартфонов [Smith et al., 2024], однако для получения информации в динамике электронной концентрации в ионосфере посредством ПЭС, необходимо, чтобы данные каждого приемника обладали достаточным качеством.

В работе исследуется возможность применения приёмника u-blox для регистрации ПИВ на основе анализа временных рядов ПЭС. При более высоком уровне шумов бюджетный приемник позволяет регистрировать волновые структуры и выполнять спектральный и корреляционный анализ вариаций ПЭС.

## ПАРАМЕТРЫ

При исследовании ионосферы одним из основных параметров является полное электронное содержание (ПЭС) — количество электронов вдоль луча «спутник–приёмник» в столбе сечением 1 м². Наличие свободных электронов влияет на распространение радиоволн и вызывает дополнительный набег фазы сигнала. Несмотря на интегральный характер, ПЭС является важным параметром для мониторинга влияния космической погоды на радиотехнические системы.

ПЭС рассчитывается по двухчастотным фазовым измерениям [Афраймович, Перевалова, 2006]. Наклонное ПЭС $I$ для линии «спутник–приёмник» по фазовым измерениям определяется выражением:

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

где $f_1, f_2$— рабочие частоты ГНСС; $L_1\lambda_1, L_2\lambda_2$— фазовые измерения на двух частотах; $K$— фазовая неоднозначность; $\sigma_L$— шумовая погрешность измерений. ПЭС измеряется в TECU, где $1\ TECU = 10^{16}$электронов/м².

Ключевым параметром для анализа ионосферных возмущений являются вариации ПЭС — высокочастотные компоненты сигнала, полученные после удаления тренда и фильтрации. Перед фильтрацией данные ПЭС детрендировались с помощью кубических сглаживающих сплайнов (Dierckx, 1975), минимизирующих отклонение от исходных данных при заданном уровне сглаживания. После этого применялся фильтр центрированного скользящего среднего (СМА), пропускающий вариации в выбранном диапазоне периодов и подавляющий остальные компоненты сигнала [Maletckii et al., 2020 Wave Signatures in Total Electron Content Variations].

Полученные вариации ПЭС зависят от угла места спутника вследствие геометрии наблюдений. Волновые структуры во временных рядах вариаций ПЭС интерпретируются как проявления прохождения ПИВ, вызывающих изменения электронной концентрации вдоль луча «спутник–приёмник».

## МЕТОДЫ

### 1. Расчёт ПЭС

Приемник u-blox позволяет получать параметры, необходимые для данных RINEX, из которых можно строить временные ряды ПЭС для различных спутников. И получающиеся графики сопоставимы с данными от приёмника Javad Delta. У приёмника u-blox zed f9p наблюдаются срывы в данных, а также была исследована разница шумов ПЭС, и результаты оказались следующие, у приемника шумы на 50% выше, чем у приемника Javad Delta.

### 2. Расчёт Вариаций ПЭС

Абсолютные значения ПЭС зависят от геометрии наблюдений, суточного хода и фонового состояния ионосферы. Поэтому для исследования динамических процессов, в частности перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), более информативным является анализ вариаций ПЭС — высокочастотных компонент сигнала после удаления медленно меняющегося тренда. В работе рассматривались диапазоны вариаций 20–60, 10–20 и 2–10 минут.

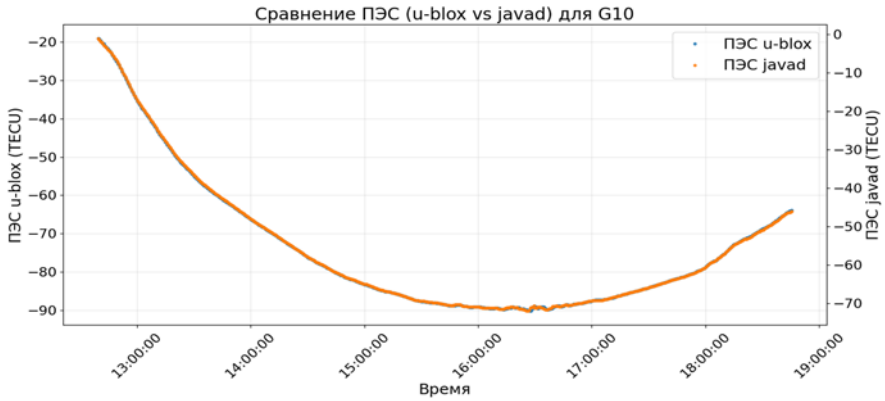


*Рис 1.* ПЭС под данным приёмников u-blox (синий) и Javad (оранжевый), смещенный для Javad на ~82 TECU, для спутника G10 15 апр. 2025 с 13 до 19 UTC.

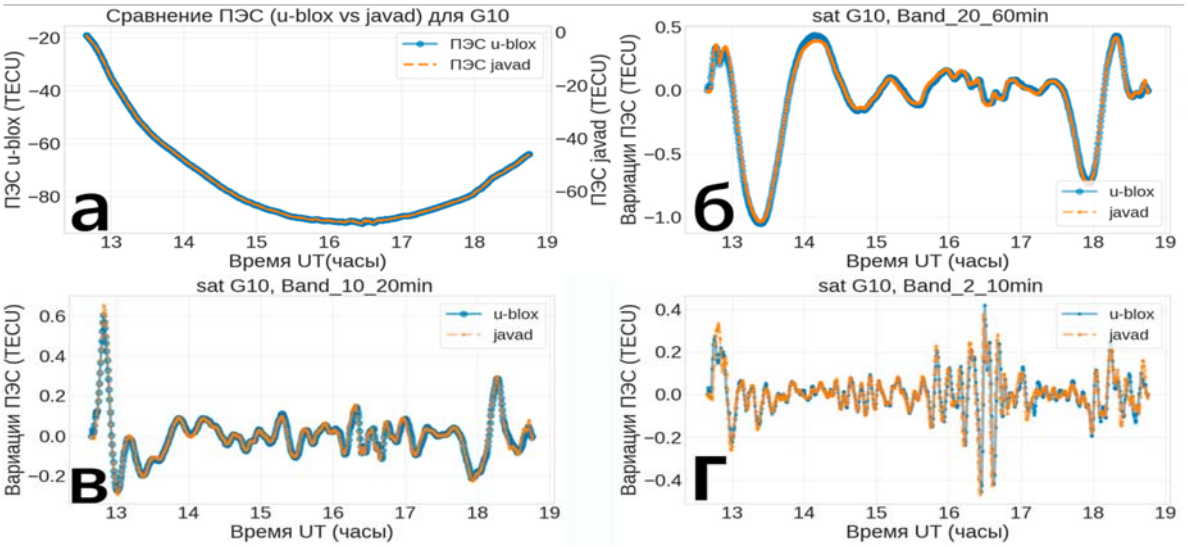


*Рис. 2.* Временные ряды ПЭС и его вариаций для приёмников Javad (оранжевые линии) и u-blox (синие линии) для спутника G10 измеренные в ИСЗФ СО РАН, 15 апреля 2025 г.: исходные ряды ПЭС (а) и вариации ПЭС в диапазоне 20–60 мин (б), 10–20 мин (в), 2–10 мин (г). На панели (а) левая вертикальная ось – это ПЭС u-blox, а правая вертикальная ось – это ПЭС Javad, смещенный на ~82 TECU

Рисунок 2 показывает, что вариации ПЭС для приемников Javad и u-blox имеют схожий вид. В исходном ряде ПЭС (рис. 2а) отчётливо проявляется волновая структура, которая отражается во всех диапазонах вариаций. При этом по амплитуде вариаций ПЭС (рис. 2б-г) явных различий не наблюдается. Вариации ПЭС по данным u-blox могут как опережать по фазе, так и отставать от данных, полученных с использованием приёмника Javad. В период с 13:00–14:00 UTC u-blox характеризуется отставанием по фазе от Javad, что наиболее заметно для вариаций в диапазоне 2-10 мин. В период с 16:00–17:00 UTC вариации ПЭС по данным u-blox напротив, характеризуются опережением по фазе, относительно приемника Javad.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### 1. Кросс-корреляция вариаций ПЭС между данными двух приемников, Javad Delta и u-blox

Различия между рядами ПЭС на разных приемниках могут возникать как вследствие физических причин, так и в виде артефактов обработки, поскольку процедуры детрендирования и фильтрации чувствительны как к структуре исходных данных, так и к шумовым составляющим. В этой связи анализ кросскорреляционной функции между двумя временными рядами вариаций ПЭС является обоснованным и эффективным инструментом для количественной оценки их сходства и выявления возможных расхождений по времени. Определив кросс-корреляционную функцию для временных рядов вариаций ПЭС 2-10, 10-20, 20-60 минут, были построены графики.

Анализ кросс-корреляционных функций (рис. 3, справа) показал, что вариации ПЭС, полученные по данным приёмников Javad Delta и u-blox, обладают высокой степенью сходства во всех исследуемых диапазонах периодов. Максимумы корреляционных функций расположены вблизи нулевого временного сдвига, однако в отдельных интервалах наблюдаются небольшие фазовые смещения между временными рядами. Наиболее заметны такие различия для диапазона 2–10 минут, где влияние шумов и особенностей обработки данных проявляется сильнее.

### 2. Оценка ошибок определения скорости и угла

Перемещающиеся ионосферные возмущения — это волнообразные структуры, влияющие на технические средства. При регистрировании параметров ионосферы важно оценить влияние ПИВ. Однако при этом надо знать, что несколько станций регистрируют параметры без ошибок (например, временного сдвига), связанных с приемником. Тогда расчет скорости и направления ПИВ будет корректным. Для того чтобы проверить данную гипотезу, нужно оценить влияние регистрируемых параметров, на расчет параметров ПИВ.

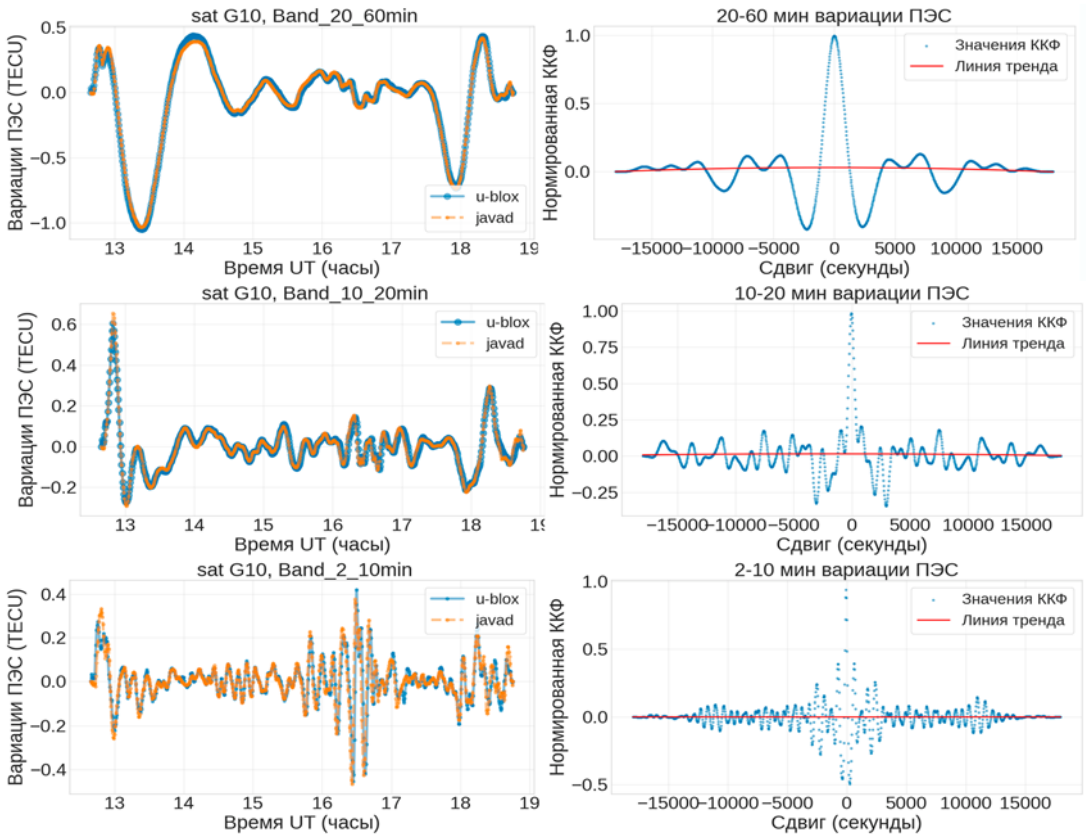


*Рис. 3.* Временные ряды вариаций ПЭС с данных приемников Javad и u-blox в периодах 20-60, 10-20, и 2-10 минут соответственно(слева), а также кросскорреляционная функция между временными рядами(справа)

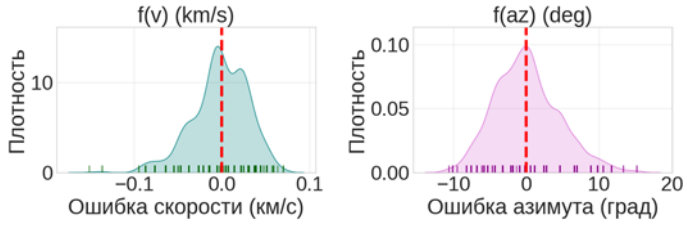


*Рис.4*. График плотности распределения ошибок скорости (слева) и плотности распределения ошибок азимута (справа). Данные были рассчитаны за 15 апреля 2024 г.

Рисунок показывает, что общий вид распределения соответствует нормальному, однако вершина распределения скорости находится не в нуле. График плотности распределения ошибок азимута, соответствует нормальному и имеет максимум в нуле, что говорит о том, что приемник u-blox может установить направление возмущения с достаточной точностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были исследованы возможности приемника u-blox ZED F9P для исследования и анализа ионосферных возмущений на основе данных вариаций ПЭС. Для оценки данные, полученные с бюджетного приемника, сопоставлялись с данными профессионального приемника Javad Delta. В ходе исследования был проведён кросс-корреляционный анализ вариаций ПЭС, в диапазонах 2-10, 10-20, и 20-60 минут. Максимумы функций располагаются вблизи нулевого сдвига (по времени), что свидетельствует о согласованности временных рядов. Также была рассмотрена оценка влияния временных задержек на определение параметров ПИВ. Установлено, что распределение ошибок азимута находится вблизи нулевого значения, а распределение ошибок скорости характеризуется небольшим смещением относительно нуля. Это указывает на возможность использования приемника u-blox для определения направления волновых структур.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э. Л., Перевалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли = GPS-monitoring of the Earth's Upper Atmosphere / Российская акад. наук, Сибирское отд-ние, Ин-т солнечно-земной физики. — Иркутск : Ин-т солнечно-земной физики СО РАН ; ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. — 479 с. : ил., табл. — ISBN 5-98277-033-7.

P. Dierckx. An algorithm for smoothing, differentiation and integration of experimental data using spline functions // Journal of Computational and Applied Mathematics. — 1975. — Vol. 1, № 3. — P. 165–184. — DOI: 10.1016/0771-050X(75)90034-0.

Kogogin, D.A.; Nasyrov, I.A.; Sokolov, A.V.; Shindin, A.V.; Ryabov, A.V.; Maksimov, D.S.; Zagretdinov, R.V. Capacities of TEC Measurements by the Low-Cost GNSS Receiver Based on the u-blox ZED-F9P for Ionospheric Research. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1991/1/012020

Maletckii, B.; Yasyukevich, Y.; Vesnin, A. Wave Signatures in Total Electron Content Variations: Filtering Problems. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 1340. https://doi.org/10.3390/rs12081340

Smith, J., Kast, A., Geraschenko, A., Morton, Y. J., Brenner, M. P., van Diggelen, F., & Williams, B. P. (2024). Mapping the ionosphere with millions of phones. *Nature*, *635*(8038), 365-369.