

## ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ НА ГНСС-ПРИЕМНИКАХ СМАРТФОНОВ

<sup>1</sup>А.М. Веснин, <sup>1</sup>А.В. Киселев, <sup>1</sup>А.А. Мыльникова, <sup>1,2</sup>С.В. Сыроватский,  
<sup>1,3</sup>Б.М. Малецкий, <sup>1,3</sup>Ю.В. Ясюкевич

<sup>1</sup>Институт солнечно земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
artem\_vesnin@iszf.irk.ru

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

## TOTAL ELECTRON CONTENT MEASUREMENTS USING GNSS RECEIVERS OF SMARTPHONES

<sup>1</sup>A.M. Vesnin, <sup>1</sup>A.V. Kiselev, <sup>1</sup>A.V. Mylnikova, <sup>1,2</sup>S.V. Syrovatskii,  
<sup>1,3</sup>B.M. Maletskii, <sup>1,3</sup>Yu.V. Yasukevich

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia  
artem\_vesnin@iszf.irk.r

<sup>2</sup>Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

**Аннотация.** Представлены результаты измерений параметров навигационного сигнала по данным одночастотных приемников установленных в мобильных устройствах таких как планшеты и смартфоны для целей получения ПЭС. Выявлены особенности измерений по сравнению с более дорогими двух частотными приемниками. Для получения длительных рядов измеряемых параметров, которые обычно используются для изучения ионосферы, данные должны быть очищены от срывов фазы, ухода часов и шумов. Срывы фазы связаны с переключениями на соседний частотный канал для компенсации доплеровского смещения частоты при движении спутника. Так же зарегистрирован существенный линейный тренд, по амплитуде в несколько раз больший, чем ионосферная коррекция, который мы связываем с уходом часов приемника. Данные ПЭС мобильных устройств были исследованы на предмет выявления вариаций ПЭС ионосферной природы и оценки абсолютного электронного содержания. Результаты показали, что особенности сигнала не позволяют достоверно оценить абсолютный ПЭС и вариации используя только сигналы на одной частоте.

**Ключевые слова:** ионосфера, ГНСС, мобильные устройства, ПЭС.

**Abstract.** The results for TEC calculation using navigation signals of single-frequency smartphone based GNSS receivers are presented. We found some mobile data features that are not observed in stationary dual-frequency GNSS receivers. To obtain long term series used for ionospheric studies mobile data must be treated to remove cycle slips, clock trend and noise. We link the cycle slips to frequency channel change for Doppler shift compensation of satellite motion. Severe linear trend which several times greater than ionospheric correction is linked to receiver's clock quality. TEC data obtained on mobile devices were subjected to analysis to estimate absolute vertical TEC and ionospheric origin TEC variations. The quality of the single-frequency mobile device data does not allow to reliable define absolute TEC and variations currently.

**Keywords:** ionosphere, GNSS, mobile devices, TEC.

### ВВЕДЕНИЕ

Данные полного электронного содержания (ПЭС) по измерениям ГНСС широко используются для изучения околоземного пространства [Afraimovich et al., 2013]. ПЭС является интегральной характеристикой и требуется дополнительная обработка для восстановления высотной структуры ионосферы. С другой стороны ПЭС хорошо подходит для анализа возмущений электронной концентрации в ионосфере, составляющие 0.01–0.001 доли единиц измерения ПЭС (TECU). Предполагая, что ионосфера сферически симметричная и основной вклад в ПЭС дает область максимума ионосферы, можно получать глобальное распределение ПЭС и производных от него характеристик: вариаций, ROTI и т. д. онлайн в таких системах как SIMuRG [<https://simurg.iszf.irk.ru>] и Madrigal [<http://millstonehill.haystack.mit.edu>]. При наличии некоторого уровня отсчета, например карт GIM, можно получить приближенное вертикальное полное электронное содержание, но с вариациями, которые не содержатся в GIM в силу большого пространственного и временного усреднения. Так же развиваются методы оценки абсолютного ПЭС, включающих оценку кодовых дифференциальных задержек на спутнике и приемнике [Mylnikova et al., 2017].

Стационарно работающие сети с плотным пространственным распределением и предоставляющие данные существуют на северной и южной Америке, Европе, Австралии и Японии. Большие территории остаются не покрытыми сетями ГНСС. В связи с этим актуальным становится изучение возможностей приемников ГНСС, установленных в гражданских мобильных устройствах, смартфонах и планшетах, для анализа ионосферы, используя ПЭС. С 2017 г., начиная с операционной системы Android 7.0, стало доступно получение «сырых» измерений приемника ГНСС: псевдодальности и фазы [Banville, van Diggelen, 2016]. Используя комбинацию этих измерений можно получать ПЭС по комбинациям измерений на одной и двух частотах.

Ряд работ посвящен исследованию характеристик сигналов ГНСС и точности позиционирования на мобильных устройствах [Riley et al., 2017; Håkansson, 2019]. Показано, что антенна приемника обладает рядом недостатков особенно в условиях многолучевости [Pesyna et al., 2015]. Данные смартфонов подвержены искажению из-за движения приемника, что приводит к искажению данных длительных рядов измерений необходимых для исследования ионосферы. В данной работе проводился анализ измерений одночастотного ГНСС приемника мобильного устройства.

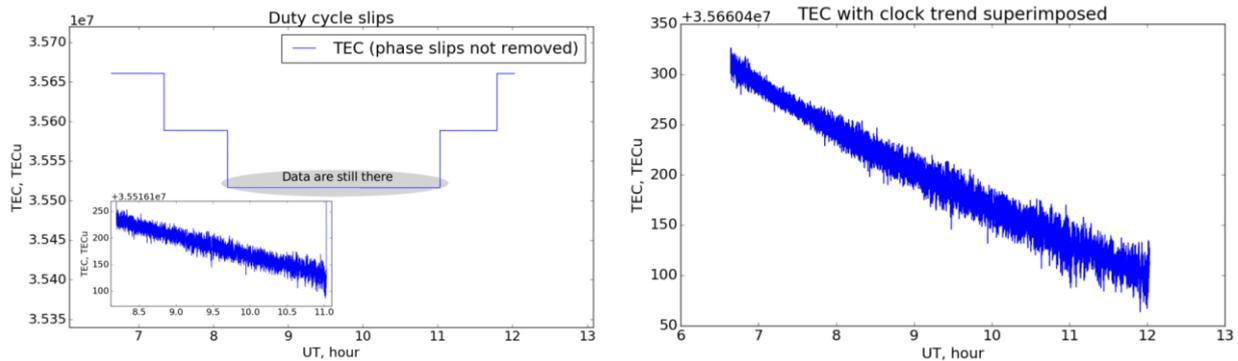


Рис. 1. Измерения ПЭС полученного комбинацией измерения псевдоальности и фазовых измерений на частоте GPS L1. На левой панели скачки показаны срывы фазы, на правой — линейный тренд связанный с уходом часов приемника

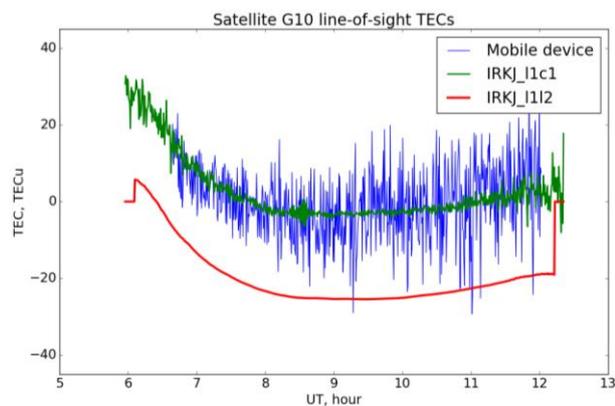


Рис. 2. Сравнение измерений ПЭС на ГНСС приемнике мобильного устройства (синяя линия) и геодезическом ГНСС приемнике IRKJ (зеленая и красная линии)

## ИЗМЕРЕНИЯ ПЭС НА МОБИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

При работе с данными мобильного устройства необходимо учитывать ряд технических особенностей устройств. Первое, что необходимо проверить — это возможность работы мобильного устройства с отключенным режимом рабочего срыва фазы (duty cycle slips). Duty cycle slips означает, что питание ГНСС приемника подается на короткий промежуток времени, необходимый для получения измерений, и большую часть времени цикла приемник отключен. Данный режим позволяет экономить энергию при этом остается возможность измерения координат, однако длительные ряды в данном режиме записать невозможно из-за срывов фазы на каждом измерении. Для измерений ПЭС необходимо устройство с возможностью отключения режима рабочего срыва фазы.

Также существуют две другие задачи, которые решаются для получения длительных рядов измерений: срывы фазы из-за переключения частот во время пролета спутника для компенсации доплеровского сдвига частоты и уход часов (рис. 1). Данные представлены для мобильного приемника расположенного в ИСЗФ для 7 ноября 2018 г. при измерении на одной частоте.

Для компенсации скачков измерений ПЭС использовалась вторая производная фазы. После этого из ряда для полного пролета вычитался линейный тренд. Результаты измерений ПЭС после компенсации и доплеровских срывов фазы и эффекта ухода

часов приемника сравнивались с ПЭС, полученном на приемнике IRKJ (рис. 2). ПЭС на IRKJ получен как для комбинаций фазовых и групповых измерений на частоте L1 (зеленая линия), так и комбинация фазовых измерений на частотах L1 и L2 (красная линия). Для используемого мобильного устройства измерения на второй частоте недоступны, поэтому фазовый ПЭС отсутствует.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данные ПЭС полученного на мобильных устройствах были протестированы на предмет использования в методиках определения вариаций ПЭС и оценки абсолютного вертикального ПЭС [Mylnikova et al., 2017].

При использовании данных мобильного устройства методика определения абсолютного ПЭС не рассчитала требуемые параметры. Для анализа причин была выделена модель шума данных мобильного устройства, эта модель использовалась для искажения данных геодезического приемника. В этом случае методика воспроизводила абсолютный ПЭС как и для не зашумленных данных, но с меньшей точностью. Дальнейший анализ показал, что данные ПЭС мобильного устройства демонстрируют слабую зависимость от угла места, так называемое корыто в измерениях ПЭС, что является критическим для работы методики определения абсолютного ПЭС.

Для исследования возможности выделения вариаций ПЭС был проведен автокорреляционный анализ рядов ПЭС, полученных на мобильном устройстве. При наличии в зашумленных данных вариаций ПЭС ионосферной природы, связанные с акустико гравитационными волнами и внутренними гравитационными волнами (периоды 2–60 мин), на автокорреляционной кривой будут максимумы и минимумы, соответствующего периода. Данный анализ не выявил значимых вариаций ПЭС ионосферной природы. Для дальнейшей работы с данными ПЭС мобильных устройств требуется использование двухчастотных измерений на частотах L1 и L5 доступных в некоторых новых устройствах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 18-35-00218 мол\_а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Afraimovich E.L., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropo-

genic processes and phenomena // Journal of Space Weather and Space Climate. 2013. V. 3. P. A27.

Banville S., van Diggelen F. Precise GNSS for Everyone: Precise Positioning Using Raw GPS Measurements from Android Smartphones // GPS World. 2016. V. 27. P. 43–48.

Håkansson M. Characterization of GNSS observations from a Nexus 9 Android tablet // GPS Solutions. 2019. V. 23, N 1. P. 21.

Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Ivanov V.B. Determining the absolute total electron content from the single-frequency GPS/GLONASS data. // 23<sup>rd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. International Society for Optics. 2017. V. 10466.

Pesyna K.M. Jr, Heath R.W. Jr. Humphreys TE Accuracy in the palm of your hand: centimeter positioning with a smartphone-quality GNSS antenna. GPS World. 2015. V. 26, N 2. P. 16–31.

Riley S, Lentz W, Clare A. On the path to precision-observations with Android GNSS observables. In: Proceedings of the ION GNSS 2017, Institute of Navigation, Portland. 25–29 Sep 2017. P. 116–129.

URL: <https://simurg.iszf.irk.ru>.

URL: <http://millstonehill.haystack.mit.edu>.