

УДК 551.510.62

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХЧАСТОТНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ СИГНАЛОВ  
L1/L5 ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ СПУТНИКОВ СИСТЕМ SBAS ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ  
ИОНОСФЕРЫ**

**В. Е. Куницын<sup>1,2</sup>, Г. А. Курбатов<sup>1</sup>, А. М. Падохин<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет имени М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН

Получена 3 февраля 2014 г.

**Аннотация.** С развитием приемной аппаратуры и появлением в орбитальных группировках геостационарных систем SBAS (satellite-based augmentation systems) спутников передающих сигналы, аналогичные по структуре сигналам GPS, на двух когерентных частотах L1 и L5, появляется возможность использовать эти сигналы для исследований полного электронного содержания (ТЕС – total electron content) ионосферы аналогично сигналам GPS/ГЛОНАСС. В данной работе приводятся результаты оценки вариаций ТЕС по данным приема сигналов геостационарных спутников систем SBAS на среднеширотном приемном пункте в Москве (МГУ). В работе приведены результаты сравнения с данными ионозондов, а также результаты вейвлет-анализа полученных рядов вариаций ТЕС, позволяющие судить о характерных периодах изменчивости ТЕС, показана возможность исследования ионосферных эффектов солнечных вспышек по данным систем SBAS.

**Ключевые слова:** ионосфера, полное электронное содержание, солнечные вспышки, дистанционное зондирование, спутниковые навигационные системы, GPS, ГЛОНАСС, SBAS.

**Abstract:** With the development of receiving equipment and SBAS constellation the dual frequency L1 and L5 transmissions compatible with GPS signals are now available from a number of geostationary satellites. These signals can be used for

ionospheric TEC measurements by the analogy with GPS/GLONASS signals. In this work we present the results of the estimations of geostationary TEC variations at the mid-latitude receiving station in Moscow, comparison with ionosondes data as well as wavelet spectra of TEC variations with typical periodical components. We also demonstrate the possibilities of SBAS TEC studies in connection with Solar flares.

**Key words:** ionosphere, total electron content, Solar flares, remote sensing, satellite navigational systems, GPS, GLONASS, SBAS.

## Введение

Геостационарные спутники используются для исследований полного электронного содержания (ТЕС) ионосферы довольно давно. До недавнего времени эти исследования в большинстве своем основывались на методе фарадеевского вращения плоскости поляризации линейно поляризованной радиоволны вокруг оси распространения при прохождении через ионосферу Земли. Данным методом в разное время исследовались ионосферные эффекты солнечных вспышек [1,2], статистические характеристики перемещающихся ионосферных возмущений [3], акустико-гравитационные волны [4], и т.д. Недостатком данного метода является необходимость в дополнительной информации о магнитном поле Земли вдоль луча “геостационарный спутник – наземная приемная станция”. Отметим, что наблюдения ТЕС методом фарадеевского вращения возможны лишь с помощью геостационарных спутников, поскольку в этом случае угол между траекторией луча и вектором магнитного поля остается постоянным.

Другим методом, широко применяемым в настоящее время для определения ТЕС, является использование когерентных двухчастотных радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем GNSS, к которым относятся, в частности, американская система GPS и российская система ГЛОНАСС [6-8]. Линейная комбинация фазовых измерений на двух рабочих частотах позволяет определить ТЕС с точностью до некоторой аддитивной постоянной, не требуя никакой дополнительной информации. К достоинствам данного метода стоит

отнести высокую точность измерений фазы и глобальный охват (большое число навигационных спутников и развитая сеть приемников). Однако, при использовании данных GNSS всегда следует учитывать движение спутников, а следовательно и подионосферных точек, в то время как при геостационарных наблюдениях подионосферные точки практически неподвижны.

Совместить достоинства обоих подходов (неподвижность подионосферных точек и использование высокоточных фазовых измерений на двух когерентных частотах) можно при использовании сигналов спутников систем дифференциальной коррекции SBAS (американская система WAAS, европейская EGNOS, индийская GAGAN, японская MSAS, российская СДКМ). Геостационарные спутники этих систем транслируют дифференциальные навигационные поправки для улучшения работы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. При этом в последние годы в орбитальных группировках систем SBAS появились спутники, вещающие на двух когерентных рабочих частотах  $f_1$  и  $f_5$  (1575,4 МГц и 1176,45 МГц соответственно), совпадающих с соответствующими частотами системы GPS и использующие аналогичные методы кодирования, что дает возможность приема их сигналов стандартными геодезическими навигационными приемниками. К этим аппаратам относятся спутники Intelsat Galaxy 15, TeleSat Anik F1R, Inmarsat 4-F3 системы WAAS; SES-5 системы EGNOS; GSAT-8 и GSAT-10 системы GAGAN, причем сигналы двух последних возможно принимать на территории России.

## 2. Особенности исследования ТЕС по данным геостационарных спутников SBAS

Измерения фазы радиосигнала (фазового пути)  $L_1$  и  $L_5$  на двух рабочих частотах  $f_1$  и  $f_5$  при прохождении им пути от спутника SBAS до наземной станции приемника можно по аналогии с GNSS измерениями использовать для определения наклонного ТЕС вдоль луча “спутник-приемник” [5]:

$$TEC = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \left( \frac{L_1}{f_1} - \frac{L_5}{f_5} \right) \frac{f_1^2 f_5^2}{f_1^2 - f_5^2} \frac{c}{K} + const, \quad (1)$$

где  $K = 40.308 \frac{M^3}{c^2}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$  - скорость света в вакууме,  $N_e(\vec{r})$  – распределение электронной концентрации в ионосфере, а интеграл берется вдоль луча “спутник-приемник”.

Вместе с преимуществами геостационарных измерений ТЕС, такими как практически неподвижная подионосферная точка, существует несколько аспектов, требующих дополнительного учета при анализе таких данных: большой вклад плазмосферы в геостационарные измерения по сравнению с GNSS измерениями из-за разницы в высоте орбит спутников (~35800 км. для спутников SBAS и ~20200 км. и ~19100 км. для GPS и ГЛОНАСС соответственно); небольшие углы возвышения геостационарных спутников уже в средних широтах, что требует учета пространственных градиентов электронной концентрации.

Низкие углы возвышения, как и в случае со спутниками GNSS, могут приводить к срывам сопровождения фазы, что в свою очередь приводит к разрывам и скачкам в данных ТЕС, которые необходимо устранять, используя условие непрерывности ТЕС. Также на геостационарные наблюдения ТЕС будет оказывать влияние хорошо известный в случае GNSS наблюдений высокий уровень шумов на низких углах возвышения спутников, связанный в первую очередь с многолучевостью распространения сигналов.

### 3. Примеры наблюдений на приемном пункте МГУ

На рис. 1 представлена геометрия регистрации сигналов спутника GSAT-8 на приемном пункте в Московском Государственном Университете (55.75 с.ш., 37.62 в.д.), оснащенный геодезическим навигационным приемником JAVAD Sigma-G3T с антенной GrAnt. Стрелкой указано направление на спутник, точкой – положение подионосферной точки. Данная станция обладает самым длительным непрерывным рядом наблюдений сигналов спутника GSAT-8 насчитывающим более полутора лет.

На рис. 2 приведены оценки шумов (15 сек. СКО) в записях ТЕС по данным приема сигналов спутника GPS 05 (верхняя панель) и спутника GSAT-8 (нижняя панель) на приемном пункте МГУ. Для спутника GPS 05 также приведена зависимость угла возвышения от времени. Хорошо видно, что в шумах ТЕС по данным геостационарного спутника GSAT-8 присутствует полусуточная периодика, возможно связанная с движением аппарата, шумы в среднем составляют 0.2 TECU, достигая значений 0.7TECU, что в разы больше характерного уровня шумов для спутника GPS на тех же углах возвышения. Это может быть объяснено большей высотой орбиты геостационарного спутника и, возможно, различными мощностями передатчиков. Таким образом видно, что наблюдения ТЕС по данным спутников SBAS не применимы для задач требующих точностей определения вариаций ТЕС лучше 0.5TECU, например для диагностики эффектов активных воздействий на ионосферу мощным КВ радиоизлучением [9], однако, могут дать дополнительную информацию об ионосферных процессах, сопровождающихся значительными вариациями ТЕС. В таких случаях необходимо использовать процедуры сглаживания полученных записей геостационарного ТЕС.

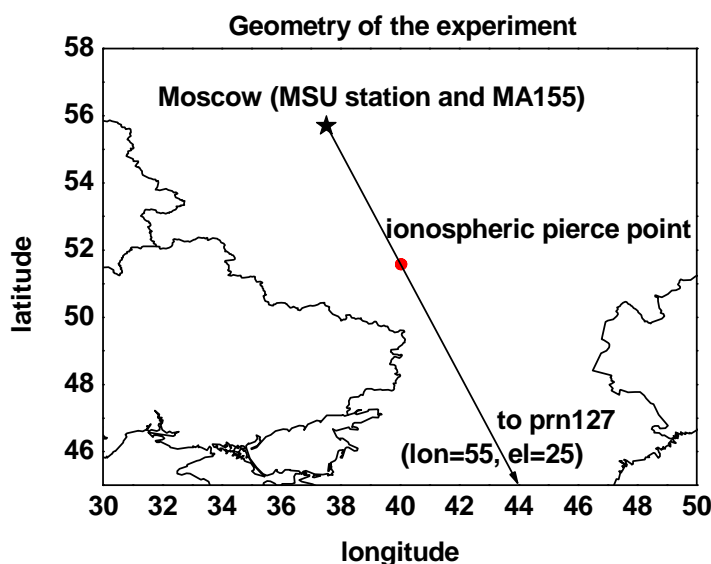


Рис. 1. Геометрия регистрации сигналов спутника GSAT-8 (prn127) системы GAGAN на приемном пункте в МГУ.

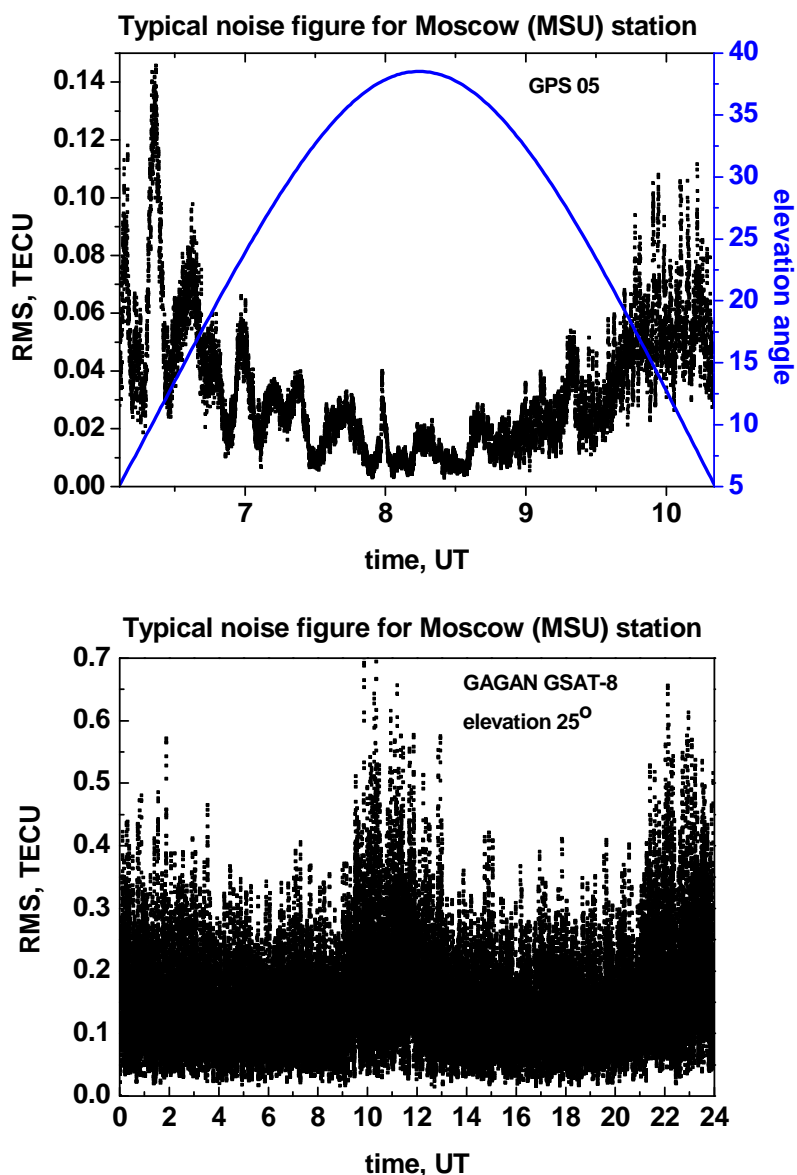


Рис. 2. Оценка шумов в записи TEC по данным спутника GPS 05 (верхняя панель) и спутника GSAT-8 (нижняя панель) на приемном пункте МГУ.

На рис. 3 (верхняя панель) представлен пример сопоставления относительного наклонного TEC по данным спутника GSAT-8 и приемного пункта МГУ с данными о критической частоте  $f_0F2$  московского ионозонда МА 155. На нижней панели рис 3. представлен вейвлет-спектр [10] представленной на верхней панели записи TEC, на котором ясно выделяются 24 и 12 часовые периодики. Отметим разницу в поведении геостационарного TEC и  $f_0F2$  в основном в вечерних условиях, что можно объяснить суточными вариациями высоты и толщины слоя F2. Также на это могут влиять пространственные

градиенты распределения электронной концентрации из-за значительного ~500 км. расстояния между ионозондом и подионосферной точкой (см рис. 1).

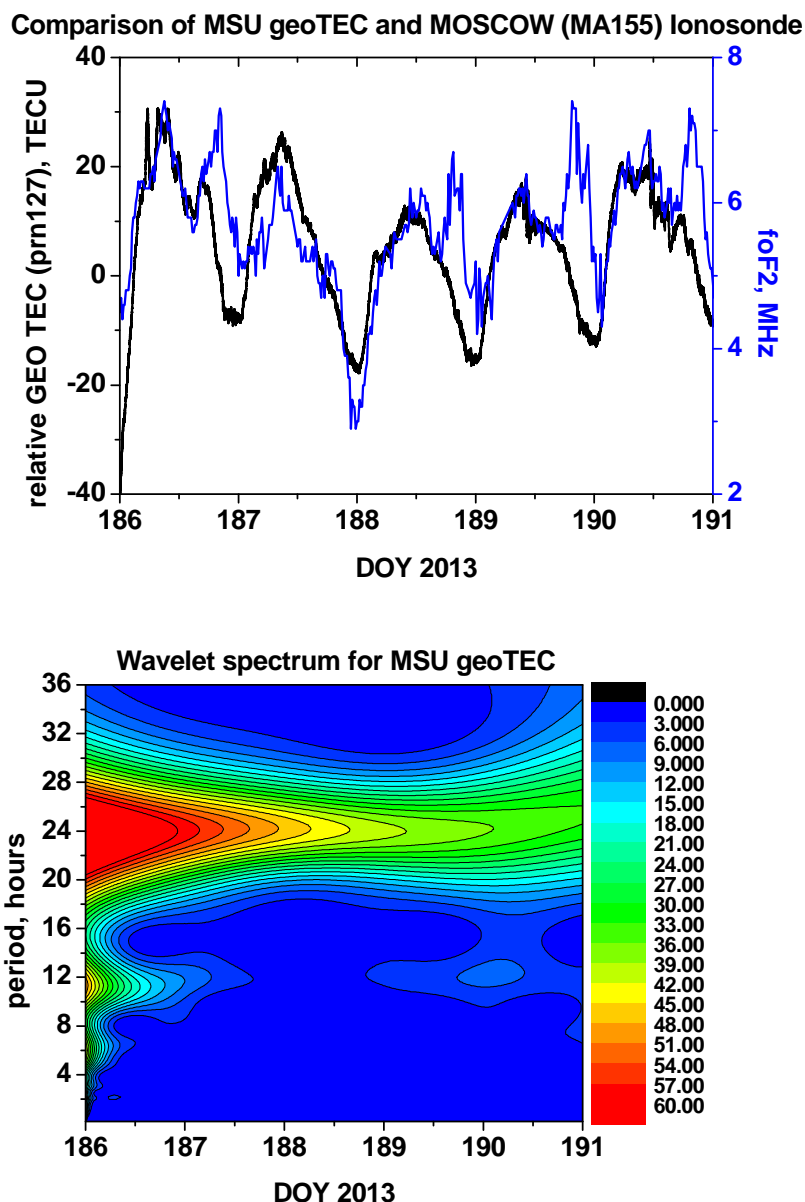


Рис. 3. Относительный наклонный ТЕС по данным спутника GSAT-8 и приемного пункта МГУ в сравнении с данными ионозонда МА 155 (верхняя панель) и вейвлет-спектр вариаций ТЕС (нижняя панель).

В завершении продемонстрируем возможности использования наблюдений ТЕС по данным приема сигналов L1/L5 спутников SBAS для исследования ионосферных эффектов солнечных вспышек. Во время хромосферной вспышки резко увеличивается интенсивность рентгеновского и ультрафиолетового

излучения Солнца, что приводит к росту электронной концентрации в ионосфере Земли [11], различному для разных высот, а следовательно и к росту ТЕС, который можно оценить с использованием сигналов SBAS аналогично сигналам GNSS [12,13]. На рис. 4 представлен пример обработки данных приема сигналов спутника GSAT-8 на приемном пункте МГУ во время одной из недавних солнечных вспышек класса X1.7 25 октября 2013 г. Во время максимума вспышки в 8:01 UT (12:01 мск.) станция МГУ находилась в дневном секторе. На записи хорошо видно внезапное увеличение ТЕС на величину  $\sim 4$  TECU, вызванное увеличением потоков солнечного ионизирующего рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения во время вспышки (также представлены на рис. 4).

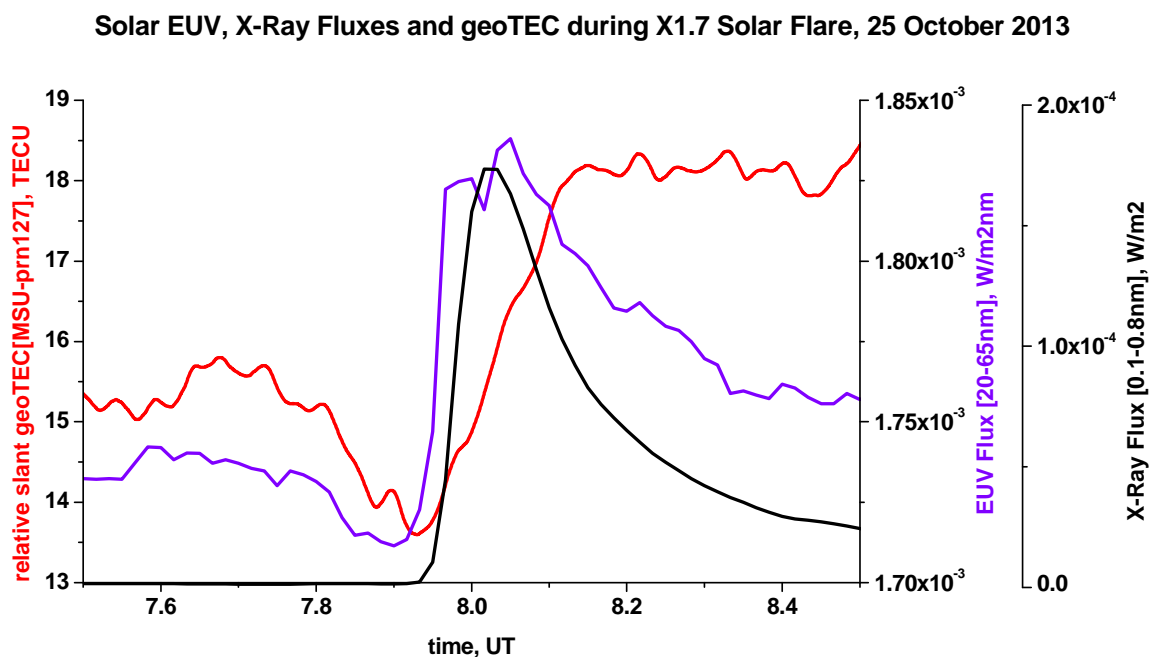


Рис. 4. Относительный наклонный ТЕС по данным спутника GSAT-8 и приемного пункта МГУ в сравнении с потоками рентгеновского и жесткого ультрафиолетового излучения Солнца во время вспышки класса X1.7

25 октября 2013 г.

Отметим, что вариации ТЕС во время вспышки хорошо коррелируют с изменчивостью потока жесткого ультрафиолетового излучения эффективно ионизирующего F область ионосферы. Заметим также, что низкий угол



возвышения спутника GSAT-8 в данном случае является преимуществом, обеспечивая больший путь сигнала в ионосфере и, соответственно, больший отклик наклонного TEC на вспышку.

#### **4. Выводы**

Приведенные результаты показывают возможность использования двухчастотных когерентных сигналов L1/L5 спутников SBAS для непрерывного мониторинга TEC в ионосфере. Основным преимуществом данных измерений является практически неподвижная подионосферная точка геостационарных спутников, что позволяет анализировать длительные записи TEC в отличие от коротки 2-6 часовых записей, как в случае с GPS/ГЛОНАСС. Вместе с тем при анализе геостационарных измерений TEC необходимо учитывать больший по сравнению с GPS/ГЛОНАСС вклад плазмосферы, а также пространственные градиенты распределения электронной концентрации из-за низких углов возвышения геостационарных спутников уже в средних широтах.

Растущее число приемников сигналов, а также двухчастотных спутников в созвездии SBAS дает возможность в будущем включить данный тип данных в процедуры ионосферной радиотомографии [6,14,15] и интерферометрии [16].

#### **5. Благодарности**

Авторы благодарны NGDC за данные, использованные в работе, и компании JAVAD GNSS за специальное программное обеспечение геодезических навигационных приемников, использованных в работе.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты 13-05-01122, 14-05-31445, 14-05-00855, 14-05-10069), гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук МК-2670.2014.5 и Программы развития Московского Государственного Университета.

## Литература

1. M. Mendillo, J.A. Klobuchar, R.B. Fritz, A.V. da Rosa, L. Kersley, K.C. Yeh, B.J. Flaherty, S. Rangaswamy, P.E. Schmid, J.V. Evans, J.P. Schnoedel, D.A. Matsoukas, J.R. Koster, A.R. Webster, P. Chin, Behavior of the ionospheric F region during the Great Solar Flare of August 7, 1972. // Journal of Geophysical Research, 79(4), 665-672, 1974
2. K. Davies, Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment. // Space Science Review, 25(4), 357-430, 1980
3. Z.T. Katamzi, N.D. Smith, C.N. Mitchell, P. Spalla, M. Materassi, Statistical analysis of travelling ionospheric disturbances using TEC observations from geostationary satellites. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 74, 64-80, 2011
4. W. Dieminger, J. Schodel, G. Schmidt, G. Hartmann, Recording gravity waves by means of geostationary beacon-satellites. // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 32(9), 1615-1617, 1970
5. B. Hoffmann-Wellenhof, H. Lichtenegger and J. Collins, Global Positioning System: theory and practice, 5th ed. New York-Wien: Springer-Verlag, 2001
6. В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева, Радиотомография ионосферы. Москва: Физматлит, 2007.
7. О.И. Яковлев, Космическая радиофизика. Москва: Научная книга, 1998.
8. В. М. Смирнов, Е. В. Смирнова, Модуль ионосферного обеспечения на базе спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. 2010. №6. URL: <http://jre.cplire.ru/alt/jun10/3/text.pdf>
9. V.E. Kunitsyn, A.M. Padokhin, A.E. Vasiliev, G.A. Kurbatov, V.L. Frolov, G.P. Komrakov, Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating, // Advances in Space Research, 47(10), 1743-1749, 2011

10. J. Morlet, Sampling theory and wave propagation, in: C.H. Chen(Ed.), Issues in Acoustic Signal/Images Processing and Recognition, NATO ASI Series, vol. 1. Springer, Berlin, pp. 233–261, 1983.
11. A.P. Mitra, Ionospheric Effects of Solar Flares, Norwell, MA: D. Reidel, 1974
12. E.L. Afraimovich, GPS global detection of the ionospheric response to solar flares, // Radio Science, 35(6), 1417-1424, 2000
13. V.E. Kunitsyn and A.M. Padokhin, Determining the intensity of solar flare ionizing radiation from data of the GPS/GLONASS navigation systems, // Moscow University Physics Bulletin, 62(5), 334-337, 2007
14. I.A. Nesterov and V.E. Kunitsyn, GNSS radio tomography of the ionosphere: The problem with essentially incomplete data, // Advances in Space Research, 47(10), 1789-1803, 2011
15. V.E. Kunitsyn, I.A. Nesterov, A.M. Padokhin and Yu.S. Tumanova, Ionospheric radio tomography based on the GPS/GLONASS navigation systems, // Journal of Communications Technology and Electronics, 56(11), 1269-1281, 2011
16. E.L. Afraimovich, K.S. Palamartchouk and N.P. Perevalova, GPS radio interferometry of travelling ionospheric disturbances, // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 60(12), 1205-1223, 1998