

## Возможности исследования естественных и искусственных ионосферных неоднородностей с помощью одиночных GNSS-приемников

В.Е. Куницын<sup>1</sup>, А.Е. Васильев<sup>2</sup>, А.М. Падохин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Физический факультет

<sup>2</sup> Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ ИПГ)  
E-mail: alex\_vass@mail.ru

В работе рассмотрены методы исследования естественных и искусственных ионосферных неоднородностей по данным высокоорбитальных навигационных систем GPS/ГЛОНАСС, а также геостационарных спутников типа SBAS, основанные на корреляционном и вейвлет преобразованиях. Приводятся примеры детектирования искусственных неоднородностей, вызванных воздействием на ионосферу мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда «Сура».

**Ключевые слова:** GNSS, SBAS, неоднородности ионосферной плазмы, активные воздействия на ионосферу, стенд «Сура».

### Введение

С развитием наземной сети приемников сигналов высокоорбитальных навигационных систем GNSS (Global Navigational Satellite Systems), расположенных по всему земному шару (сеть приемников IGS – International GNSS Service, крупные региональные сети, такие как EUREF, GEONET), появилась возможность использовать непрерывные измерения параметров проходящих через ионосферу навигационных сигналов для регионального и глобального мониторинга состояния ионосферы. В частности, в областях с высокой плотностью приемных станций можно решать задачу восстановления четырехмерной пространственно-временной структуры распределения электронной концентрации в ионосфере (Куницын и др., 2007).

В областях, где плотность сети приемников не велика (к таким областям можно отнести большую часть территории России), можно использовать данные одиночных GNSS приемников для исследований вариаций полного электронного содержания ионосферы (TEC). Исходными данными для этой задачи являются измерения фазы радиосигнала (фазового пути) при прохождении пути от спутника до наземной станции приемника на двух рабочих частотах. Для системы GPS (Global Positioning System) эти частоты составляют  $f_1 = 1575,42$  МГц и  $f_2 = 1227,6$  МГц, для системы ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) – 1600 МГц и 1250 МГц. Соответствующие данные принято обозначать  $L_1$  и  $L_2$  – фазовые пути радиосигналов, измеренные в длинах зондирующих волн. Также можно использовать данные о псевдодальностях  $P_1$  и  $P_2$  (групповые пути радиосигналов), измеренных по времени распространения цуга волн на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . По данным  $L_1$  и  $L_2$ ,  $P_1$  и  $P_2$  можно определить TEC вдоль траектории луча  $l$  спутник-приемник по следующим формулам:

$$TEC = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \left( \frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + const, \quad (1)$$

$$TEC = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \frac{P_2 - P_1}{K \left( \frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)}, \quad (2)$$

где  $K = 40,308 \text{ м}^3/\text{с}^2$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  – скорость света в вакууме,  $N_e(\vec{r})$  – распределение электронной концентрации в ионосфере.

Кроме спутников GPS/ГЛОНАСС можно использовать также геостационарные спутники системы SBAS, использующие частоты, совпадающие с частотами системы GPS, и сходную с GPS структуру сигналов, что позволяет принимать эти сигналы с помощью большинства специализированных геодезических GNSS приемников. Преимуществом использования данных спутников в исследованиях ионосферы является практически неподвижное (по сравнению с GPS/ГЛОНАСС) положение подионосферной точки, что упрощает интерпретацию полученных вариаций ТЕС. К недостаткам следует отнести небольшие углы возвышения спутников SBAS для приемников, расположенных в умеренных широтах, а также тот факт, что большинство спутников SBAS передает сигналы только на одной частоте системы GPS (в настоящий момент только спутники WAAS с точкой стояния над Америкой используют две частоты системы GPS), что делает невозможным определение ТЕС исключительно по фазовым данным по формуле (1) и требует использования комбинации фазовых данных и данных псевдодальностей, полученных на одной частоте:

$$TEC + const = 0,5 \frac{f_1^2}{K} (P_i - L_i \lambda_i), \quad (3)$$

где  $\lambda_i$  – длина волн несущей частоты.

В связи с тем, что данные псевдодальностей существенно более зашумлены по сравнению с фазовыми данными, ТЕС, вычисленный по формуле (3), также будет содержать высокий уровень шума. Стоит также отметить, что ТЕС, определенный с помощью сигналов геостационарных спутников SBAS, из-за высоты орбит нельзя в полной мере относить к ионосфере, в данных измерениях содержится также вклад плазмосферы, который в определенных условиях может достигать трети. Данное замечание относится также и к GPS/ГЛОНАСС.

Для исследования временных рядов ТЕС удобно использовать, например, вейвлет-анализ (Morlet, 1983; Daubechies, 1992), позволяющий выделять характерные периоды вариаций, время их возникновения и исчезновения, для чего строятся оценки локального спектра энергии  $S(a_i, b_j)$ :

$$S(a_i, b_j) = |W(a_i, b_j)|^2$$

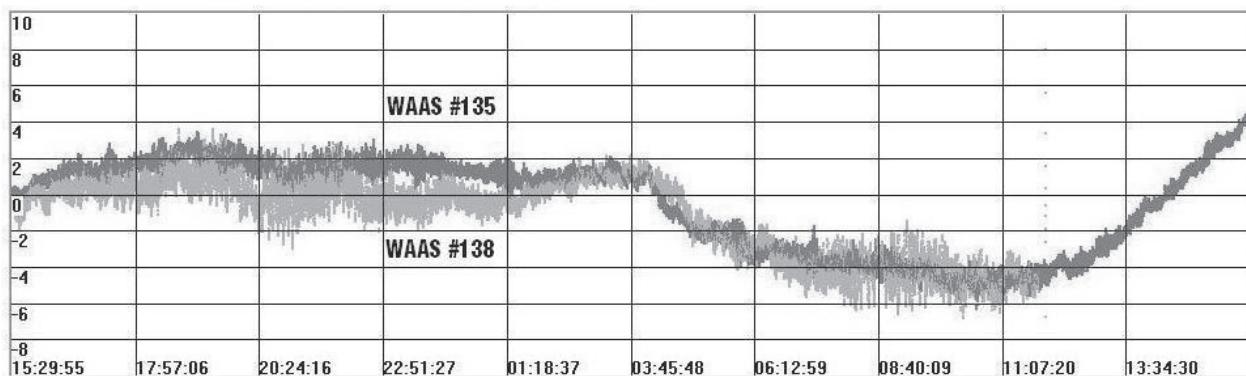
$$W(a_i, b_j) = \sum_{k=0}^{N-1} var TEC(t_k) \psi^* \left( \frac{t_k - b_j}{a_i} \right) / \sum_{k=0}^{N-1} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{t_k - b_j}{a_i} \right)^2 \right), \quad (4)$$

где  $a_i$  – аналог периода,  $b_j$  – аналог времени,  $\psi(t) = \exp\left(-t^2/2\right)\exp(i2\pi t)$  – родительская функция вейвлета Морле (Morlet, 1983).

Данный подход не является новым и использовался, например, в работе (Kamatzi et al., 2011) для анализа перемещающихся ионосферных возмущений и вызванных ими вариаций ТЕС, полученных методом фараадеевского вращения по данным геостационарных спутников ATS-6 и OTS-2, в периоды максимума и минимума солнечной активности.

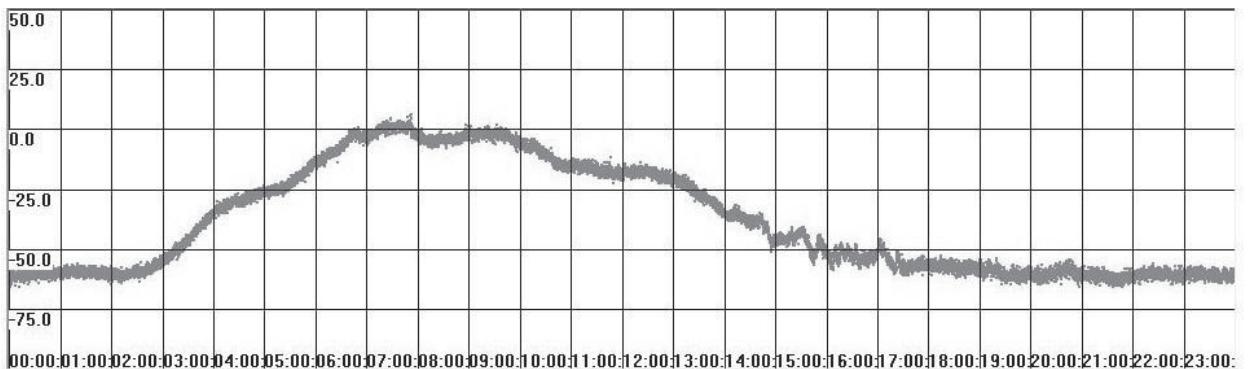
### Экспериментальные результаты

Экспериментальные данные приема сигналов геостационарных спутников SBAS, используемые в данной работе, получены с двух приемных пунктов, оснащенных геодезическими GNSS приемниками производства американской фирмы JAVAD. Один из пунктов находится в Сан-Хосе, США и поддерживается компанией JAVAD, второй пункт входит в развертываемую в настоящее время сеть GNSS приемников Росгидромета и расположен в г. Чебоксары. На приемнике, расположенном в США, принимались сигналы двухчастотных геостационарных спутников системы WAAS, на приемнике в Чебоксарах – одночастотного геостационарного спутника индийской системы GAGAN.

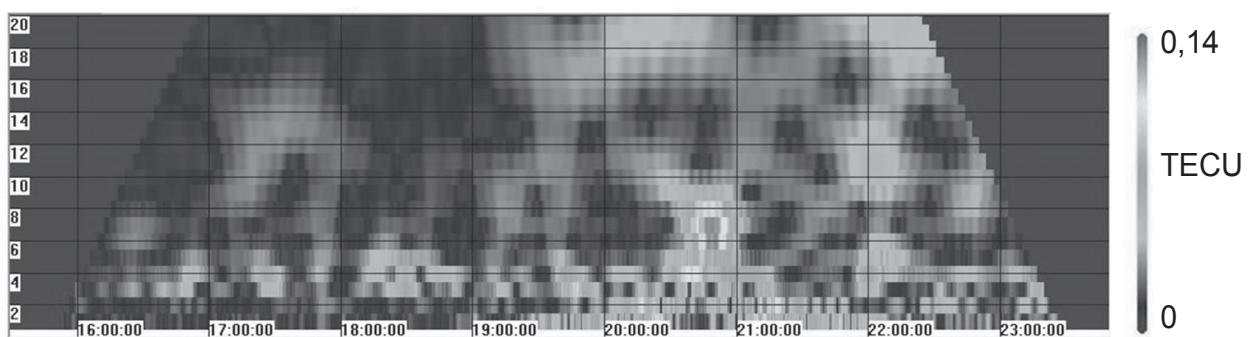


*Рис. 1. Относительный наклонный ТЕС (в единицах TECU)  
по данным приема сигналов двухчастотных геостационарных спутников WAAS.  
Сан-Хосе, США, 17 июня 2009 г., время UT*

На рис. 1 приведены результаты определения наклонного относительного ТЕС по фазовым данным на двух частотах с двух геостационарных спутников WAAS для приемника расположенного в Сан-Хосе. На рис. 2 приведены вариации ТЕС по данным измерений фазы и псевдодальности одночастотного геостационарного спутника системы GAGAN для приемника в Чебоксарах. На графиках хорошо виден суточный ход ТЕС, а также возмущения с меньшими временными масштабами, которые также хорошо видны и на вейвлет-спектрах вариаций ТЕС. На рис. 3 приведен пример вейвлет-спектра вариаций ТЕС для спутника WAAS # 135 по данным приемника в Сан-Хосе для периодов меньше 20 минут 17 июня 2009г. Отчетливо выделяются вариации с периодами ~5–7 минут, 12 минут, 18–20 минут, характерные для ионосфера.



*Рис. 2. Относительный наклонный ТЕС (в единицах ТЕСУ) по данным приема сигналов одночастотного геостационарного спутника GAGAN (SBAS PRN 127).  
(Росгидромет, приемный пункт «Чебоксары»), 15 октября 2011 г., время UT*



*Рис. 3. Вейвлет-спектр вариаций ТЕС для спутника WAAS # 135  
по данным приемника в Сан-Хосе, США, 17 июня 2009 г. По горизонтальной оси  
отложено время UT, по вертикальной – период в минутах*

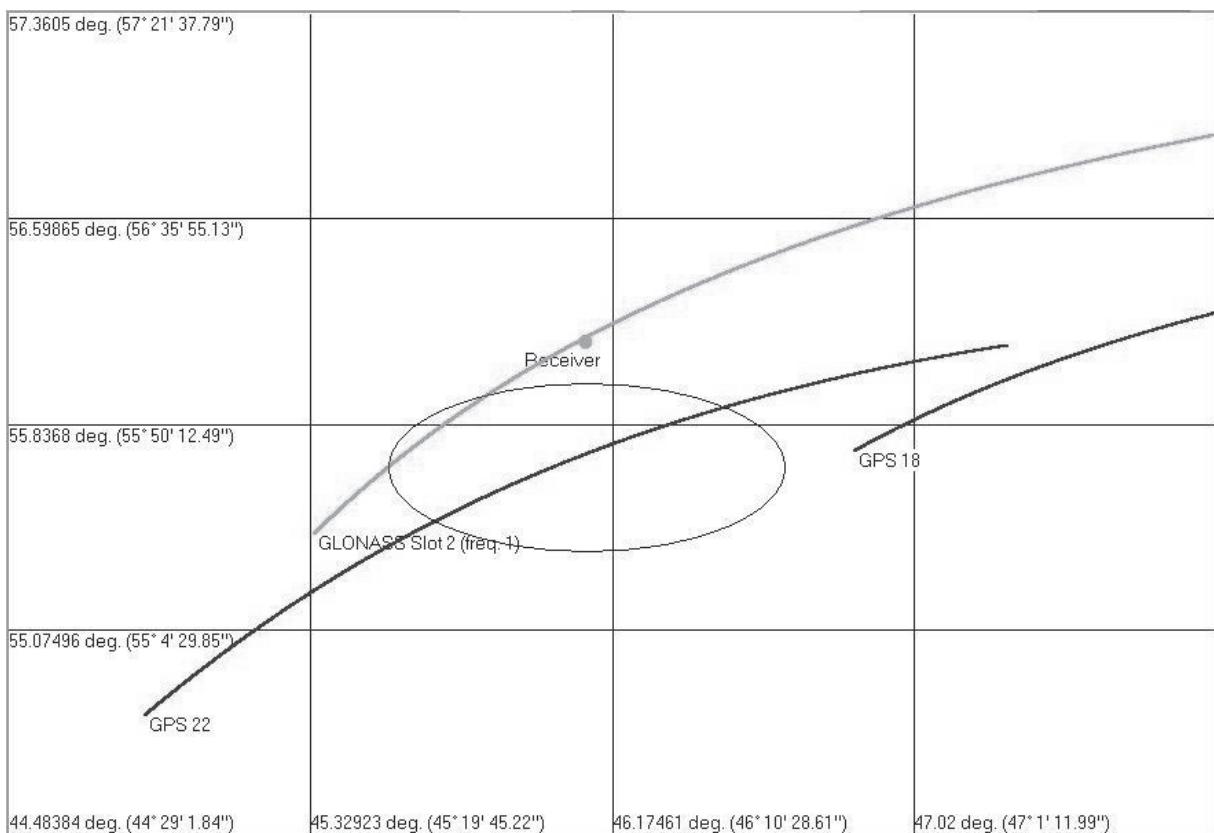
Остановимся также на использовании вейвлет-анализа для исследования искусственных ионосферных неоднородностей, вызванных работой нагревного стенда «Сура» (НИРФИ).

Многочисленные исследования характеристик и свойств искусственной ионосферной турбулентности, возбуждаемой в  $F_2$ -области ионосферы при воздействии на нее мощными КВ радиоволнами О-поляризации (Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007 и ссылки внутри), позволили установить, что вблизи уровня отражения мощной радиоволны развиваются струкционная параметрическая, тепловая (резонансная) параметрическая и самофокусировочная неустойчивости. Это приводит, в частности, к сильному разогреву здесь плазмы и генерации искусственных неоднородностей ее плотности в диапазоне масштабов от долей метра до десятков километров, которые оказывают существенное влияние на свойства распространяющихся через возмущенную область ионосферы радиоволн, в частности сигналы навигационных систем.

Приведем пример анализа данных, полученных во время проведения нагревных экспериментов (Фролов и др., 2010; Kunitsyn et al., 2011). 16 марта 2009 г. сеанс нагрева проводился с 6:15UT до 8:26UT в невозмущенных геомагнитных условиях ( $K_p = 1$  во время всего сеанса). Использовалась частота излучения 4,3МГц. Волна накачки отражалась на высоте ~200 км. В первой части сеанса до 07:36 UT использовался режим нагрева прямоугольными импульсами длительностью 30 сек. с 30 сек. перерывами между импульсами и эффективной

мощностью 40 МВт. С 07:36 UT эффективная мощность была увеличена до 80 МВт при сохранении того же режима нагрева, а с 7:51 UT использовался режим нагрева прямоугольными импульсами длительностью 5 минут с 5-минутными перерывами между импульсами.

Во время данного сеанса нагрева подионосферная точка для спутника GPS prn22 пересекала область нагрева с 7:23 UT до 8:11 UT, ее траектория показана на *рис. 4*, на котором также обозначены границы возмущенной области по уровню 0,1 максимальной излучаемой мощности. На *рис. 5* приведена запись вариаций ТЕС во время прохождения подионосферной точки через область нагрева (отмечена полужирной линией на оси времени снизу), а также схематично представлены импульсы нагрева (сверху). Вариации с периодикой 1 минута отчетливо видны на вейвлет-спектре вариаций ТЕС, показанном на *рис. 6*. Период 1 минута соответствует модуляции эффективной мощности стенда «Сура». Отметим также, что данная периодика стала отчетливо выделяться, только начиная с 07:36 UT, когда стенд был переключен на эффективную мощность 80 МВт и пропадает после 07:51 UT, когда стенд был переключен на другой режим модуляции эффективной мощности нагрева. Максимальные вариации ТЕС порядка 0,04 TECU, наблюдались в 07:40 UT практически в области магнитного зенита, что ясно свидетельствует об искусственном происхождении наблюдаемых вариаций ТЕС. Также можно сделать вывод, что в условиях проведения эксперимента эффективной мощности волны накачки 40 МВт с данной модуляцией оказалось не достаточно для создания неоднородностей распределения электронной концентрации, детектируемых по данным GPS.



*Рис. 4. Траектория подионосферной точки спутника GPS PRN # 20 для GNSS приемника, расположенного на стенде «Сура» во время экспериментов по активному воздействию на ионосферу 16 марта 2009 г. Овалом выделена возмущенная область по уровню 0,1 от максимальной излучаемой мощности*

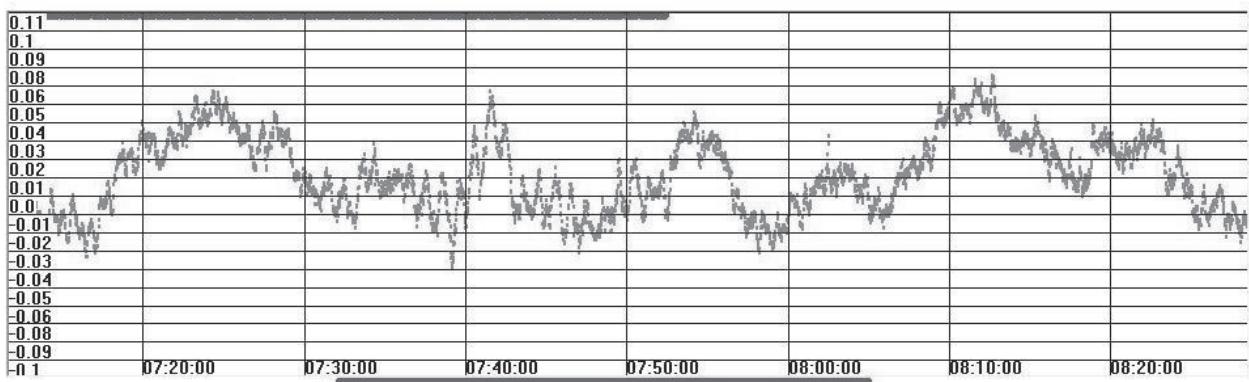


Рис. 5. Вариации ТЕС (в единицах ТЕСУ) для спутника GPS PRN # 22 и приемного пункта на стенде «Сура», 16 марта 2009 г. Чертой внизу картины отмечено время пересечения диаграммы направленности стенда подионасферной точкой спутника. Сплошная черта вверху картины обозначает время нагрева

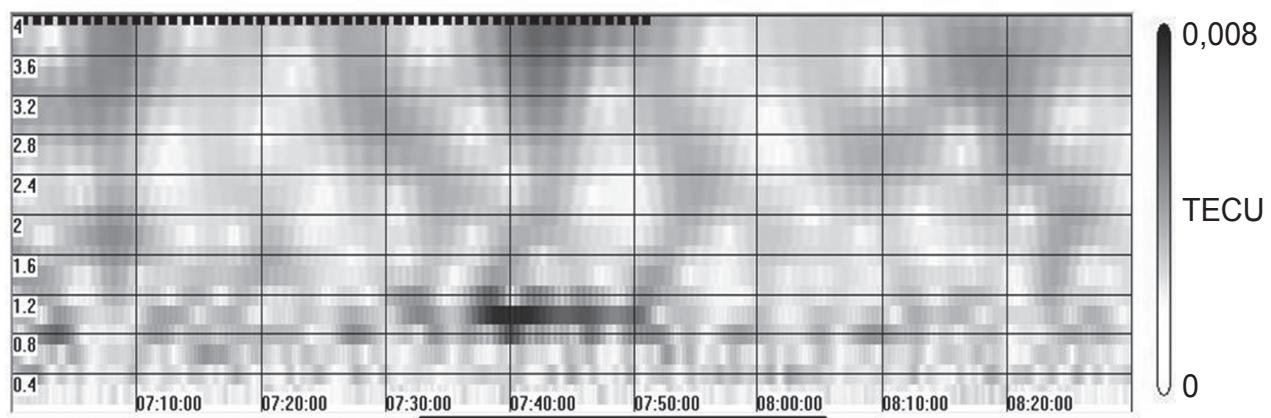


Рис. 6. Вейвлет-спектр вариаций ТЕС для спутника GPS PRN # 22 и приемного пункта на стенде «Сура» 16 марта 2009 г. Чертой внизу картины отмечено время пересечения диаграммы направленности стенда подионасферной точкой спутника. Сплошная черта вверху картины обозначает время нагрева. По горизонтальной оси отложено время UT, по вертикальной – период в минутах

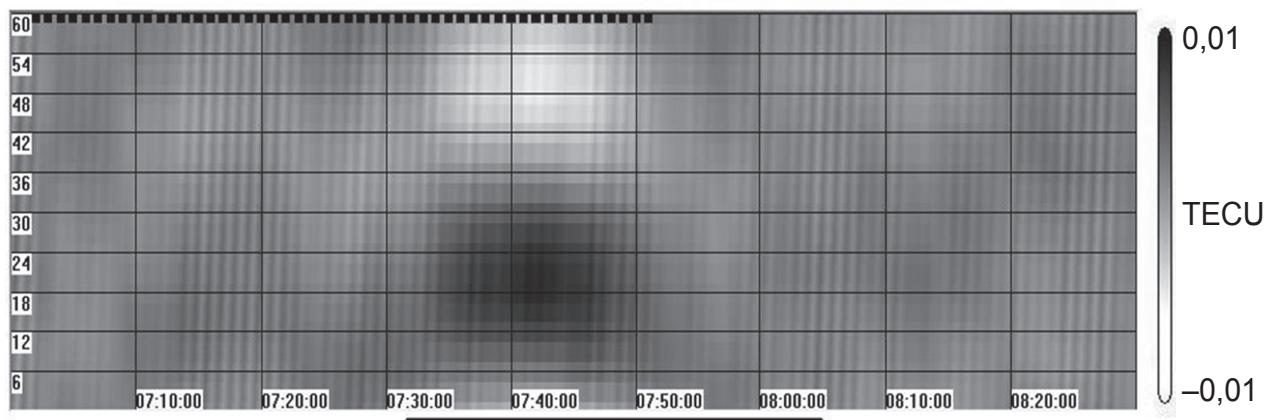


Рис. 7. Взаимная корреляционная функция вариаций ТЕС для спутника GPS PRN # 22 и приемного пункта на стенде «Сура» и функции модуляции эффективной излучаемой мощности стенд 16 марта 2009 г. Чертой внизу картины отмечено время пересечения диаграммы направленности стенда подионасферной точкой спутника. Сплошная черта вверху картины обозначает время нагрева. По горизонтальной оси отложено время UT, по вертикальной – сдвиг по времени  $\tau$  в секундах

Для анализа времени отклика ионосферы (времени развития неоднородностей) на воздействие мощного КВ радиоизлучения стенда удобно рассматривать также функции взаимной корреляции  $C(t, \tau)$  вариаций  $sTEC(t)$  и функции модуляции эффективной излучаемой мощности стенда  $H(t)$ :

$$C(t, \tau) = \frac{2}{\Delta T} \int_{t-\Delta T/2}^{t+\Delta T/2} sTEC(t) \cdot H(t-\tau) dt \quad (5)$$

На *рис. 7* показана временная зависимость функции взаимной корреляции вариаций ТЕС и режима модуляции мощности волны накачки. По горизонтальной оси отложено время, по вертикальной оси отложен временной сдвиг между режимом искусственных нагревов и вариацией ТЕС. Полученный сдвиг (~20 сек.) как раз и характеризует время реакции ионосферы на «включение» волны накачки. Аналогичную схему обработки можно применить и для производных ТЕС. Отметим, что рассмотренный здесь корреляционный подход не применим для исследования естественных вариаций ТЕС, так как их нельзя связать с каким-либо одним определенным процессом.

### **Заключение**

В работе продемонстрированы возможности исследования вариаций полного электронного содержания ионосферы естественного и искусственного происхождения с использование одиночных GNSS приемников, а также возможность использования сигналов двух- и одночастотных геостационарных спутников системы SBAS для определения вариаций полного электронного содержания. Показано, что при воздействии на ионосферу мощной КВ радиоволновой обыкновенной поляризации с частотой меньше порядка критической частоты слоя  $F_2$  ионосферы в вейвлет-спектре вариаций ТЕС при прохождении подионосферной точки используемого для диагностики спутника через возмущенную область наблюдаются периодики соответствующие спектру модуляции мощности волны накачки. Анализ функций взаимной корреляции вариаций ТЕС и модуляции эффективной излучаемой мощности волны накачки позволяет в свою очередь оценить время отклика ионосферы на включение волны накачки.

Авторы благодарны В.Л. Фролову за плодотворные обсуждения полученных в работе результатов, а также всем сотрудникам стенда «Сура» за помощь в проведении экспериментов. Авторы выражают признательность компании JAVAD GNSS и Росгидромету за GNSS данные, использованные в работе. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-05-01157-а, 12-05-10068-к) и гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (проект МК-2544.2012.5).

## Литература

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Наука, 2007.
2. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // УФН. 2007. Т. 177. № 11. С. 1145–1177.
3. Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Комраков Г.П., Котик Д.С., Митяков Н.А., Поляков С.В., Рапонорт В.О., Сергеев Е.Н., Терещенко Е.Д., Толмачева А.В., Урядов В.П., Худукон Б.З. Модификация ионосферы Земли мощным КВ радиоизлучением // УФН. 2007. Т. 177. № 3. С. 330–340.
4. Фролов В.Л., Комраков Г.П., Куницын В.Е., Падохин А.М., Васильев А.Е., Курбатов Г.А. Зондирование возмущенной излучением нагревного стенда «Сура» ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS // Известия вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 7. С. 421–444.
5. Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. Capital City Press, Montpelier, Vermont, USA, 1992.
6. Katamzi Z.T., Smith N.D., Mitchell C.N., Spalla P. and Materassi M. Statistical analysis of travelling ionospheric disturbances using TEC observations from geostationary satellites // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2011. V. 74. P. 64–80.
7. Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E., Kurbatov G.A., Frolov V.L., Komrakov G.P. Study of GNSS-measured Ionospheric Total Electron Content variations generated by powerful HF heatings // Advances in Space Research. 2011. 47 (10). P. 1743–1749.
8. Morlet J. Sampling theory and wave propagation // Chen C.H. (ed.). Issues in Acoustic Signal /Images Processing and Recognition, NATO ASI Series. 1983. Vol. 1. Springer, Berlin, P. 233–261.

### Study of natural and artificial ionospheric disturbances with a standalone GNSS-receiver

V.E. Kunitsyn<sup>1</sup>, A.E. Vasiliev<sup>2</sup>, A.M. Padokhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Russia  
119991, Moscow, Lenin Hills, 1, str. 2

<sup>2</sup> E.K. Fedorov Institute of applied geophysics, Russia  
129128 Moscow, Rostokinskaya str. 9  
E-mail: alex\_vass@mail.ru

In present work we consider methods for studying natural and artificial ionospheric disturbances based on the correlation and wavelet analysis of the data of GPS/GLONASS navigational and SBAS geostationary satellites. Examples of the detection of artificial ionospheric disturbances induced by powerful HF radiowaves radiated by the Sura heater are presented as well.

**Keywords:** GNSS, SBAS, irregularities in ionospheric plasma, HF heating experiments, Sura heater.