

## ИССЛЕДОВАНИЕ УРОВНЯ ВОЗМУЩЕННОСТИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В СРЕДНЕШИРОТНОМ И АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНАХ ПО ДАННЫМ GPS

<sup>1</sup>Н.П. Перевалова, <sup>1</sup>И.К. Едемский, <sup>1,2</sup>О.В. Тимофеева,  
<sup>1,2</sup>Д.Д. Каташевцева, <sup>1</sup>А.С. Полякова

### STUDY OF THE LEVEL OF TOTAL ELECTRON CONTENT DISTURBANCE IN THE MIDDLE-LATITUDE AND ARCTIC REGIONS FROM GPS DATA

<sup>1</sup>N.P. Perevalova, <sup>1</sup>I.K. Edemsky, <sup>1,2</sup>O.V. Timofeyeva,  
<sup>1,2</sup>D.D. Katashevceva, <sup>1</sup>A.S. Polyakova

В работе проведено сравнение уровня возмущенности полного электронного содержания (ПЭС) в среднеширотных и высокоширотных областях ионосферы в 2013 г. с поведением геомагнитных индексов  $AE$ ,  $D_{st}$ ,  $K_p$ . Для характеристики уровня возмущенности ПЭС использовался специальный индекс WTEC, рассчитанный по данным станций ORDA (Усолье-Сибирское), MOND (Монды), NRIL (Норильск). Выявлено, что в высоких широтах поведение WTEC хорошо коррелирует с вариациями  $AE$  и менее с поведением индекса  $D_{st}$ . В средних широтах поведение WTEC хорошо согласуется с вариациями  $D_{st}$ . Минимальный уровень возмущенности ПЭС не зависит от сезона в арктическом регионе. В средних широтах значение минимального уровня возмущенности летом выше, чем зимой.

We have compared the level of disturbance of the total electron content (TEC) in the ionospheric middle-latitude and high-latitude regions in 2013 with the behavior of  $AE$ ,  $D_{st}$ ,  $K_p$  geomagnetic indexes. The level of TEC disturbance has been characterized by a special index WTEC calculated, using data of three GPS stations, namely, ORDA (Usolye-Sibirskoye), MOND (Mondy), NRIL (Norilsk). We have revealed that at high latitudes the WTEC behavior correlates well with the  $AE$  variations. Correlation between WTEC and  $D_{st}$  behavior is much less. At the middle latitudes, the behavior of WTEC agrees well with the  $D_{st}$  variations. The minimum level of TEC disturbance doesn't depend on the season in the Arctic region. At the middle latitudes, the minimum level value is higher in summer than in winter.

#### Введение

Одним из эффективных методов изучения ионосферы являются современные глобальные навигационные спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС с развитыми сетями наземных приемников. За счет пространственного распределения лучей приемник-спутник в течение суток, даже одна станция GPS/ГЛОНАСС обеспечивает контроль за вариациями полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере в радиусе 500–1000 км. Однако серьезным ограничением GPS-технологии является малая длительность непрерывного ряда ПЭС, ограниченная временем наблюдения одного спутника (около 2–6 ч). Эта проблема затрудняет изучение долговременных связей вариаций ПЭС с процессами в магнитосфере Земли и воздействиями со стороны солнечного ветра. Для решения этой проблемы в ИСЗФ СО РАН разработан метод, позволяющий получить многодневные непрерывные ряды усредненной интенсивности вариаций ПЭС, отфильтрованных в выбранном диапазоне периодов, по данным измерений отдельной GPS-станции (индекс возмущенности WTEC) [Berngardt et al., 2014a, b]. В настоящей работе данный метод применен для сравнения поведения ПЭС в средне- и высокоширотных областях с изменениями индексов геомагнитной активности.

#### 1. Данные измерений

В работе использовались ряды вариаций ПЭС за 2013 г., полученные по данным среднеширотных станций ORDA, MOND, входящих в состав Сибир-

ской сети приемников GPS/ГЛОНАСС, создаваемой ИСЗФ СО РАН, а также высокоширотной GPS-станции NRIL, принадлежащей Геофизической службе РАН (ГС РАН) и расположенной на Комплексной магнитоионосферной станции ИСЗФ СО РАН вблизи Норильска. Общий уровень вариаций ПЭС оценивался с помощью индекса возмущенности WTEC [Berngardt et al., 2014a, b]. Рассматривались колебания ПЭС в двух диапазонах периодов: 01–10 мин и 01–40 мин, которые соответствуют средне- и крупномасштабным ионосферным возмущениям. Поведение уровня возмущенности ПЭС сравнивалось с поведением геомагнитных индексов  $AE$ ,  $K_p$ ,  $D_{st}$  [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>].

#### 2. Результаты и выводы

Анализ данных показал, что в высокоширотной ионосфере суточные вариации WTEC сильнее проявляются для среднемасштабных возмущений ПЭС (рис. 1, 2). Суточные вариации наиболее выражены в марте-апреле и в сентябре-октябре. Уровень минимальной интенсивности возмущений ПЭС в арктическом регионе не зависит от сезона: в 2013 г. он составлял 0.013 и 0.089 TECU для возмущений с периодами 10 и 40 мин, соответственно.

В средних широтах суточные вариации WTEC имеют сезонные особенности (рис. 1, 2). Летом возмущения более интенсивны в начале и в конце дня, во все другие сезоны интенсивность возмущений выше в середине дня. Средний минимальный уровень интенсивности возмущений ПЭС имеет сезонные колебания: зимой он составляет около 0.006 TECU для сред-

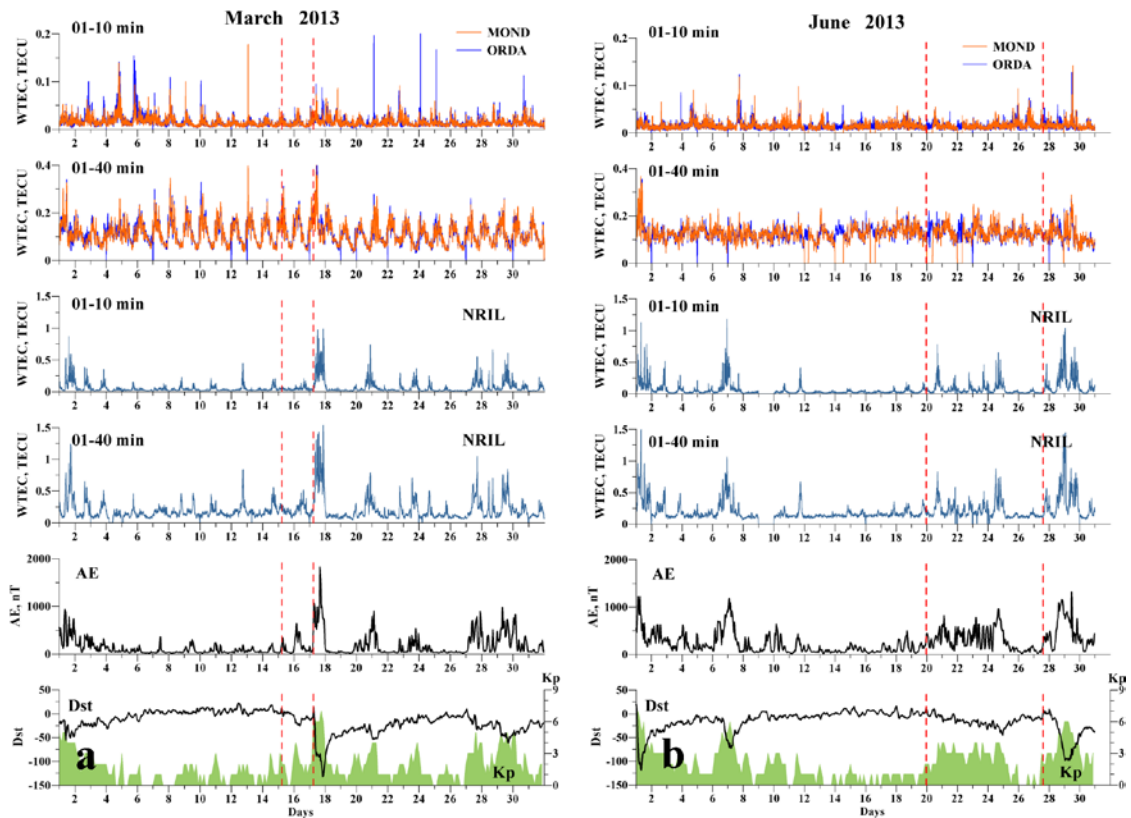


Рис. 1. Вариации индекса WTEC для возмущений с периодами 01–10 мин и 01–40 мин для станций ORDA, MOND, NRIL, а также магнитных индексов AE,  $D_{st}$  и  $K_p$  в марте (а) и июне (б) 2013 г. Вертикальными пунктирными линиями отмечены внезапные начала геомагнитных бурь.

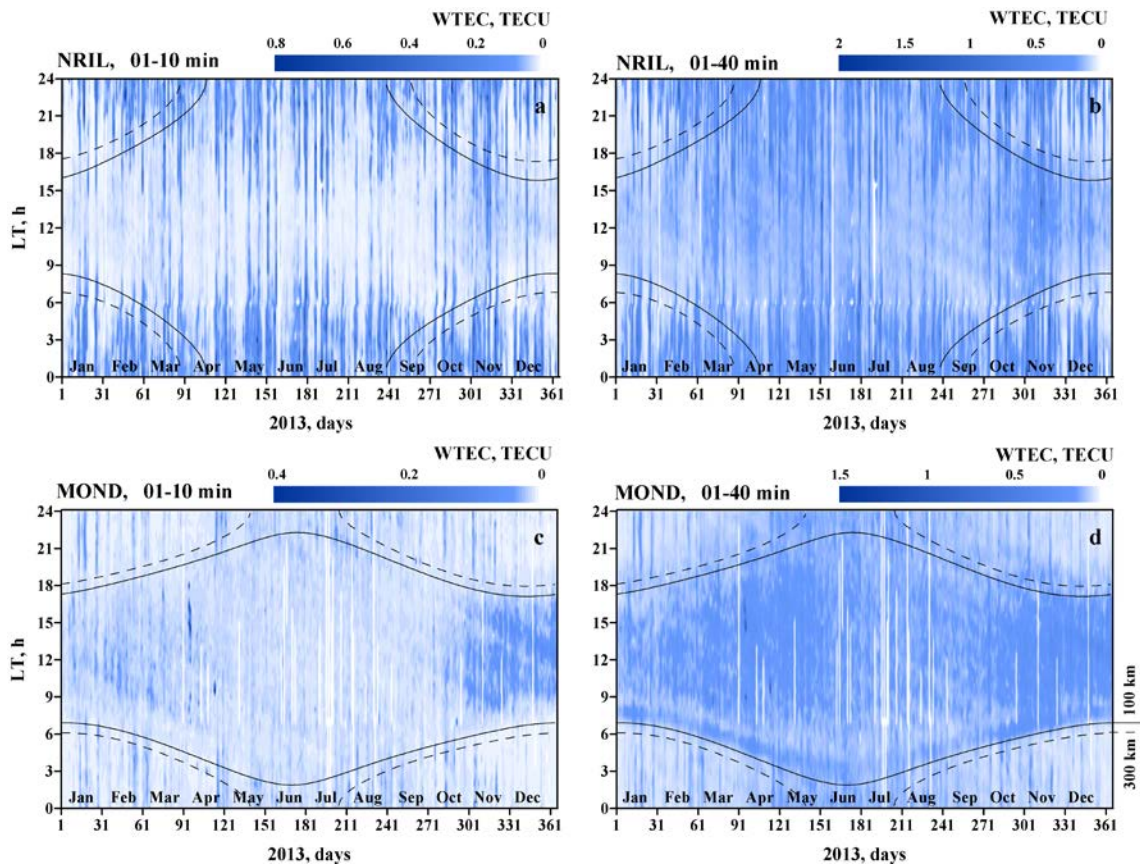


Рис. 2. Интенсивности суточных колебаний индекса возмущенности WTEC в течение 2013 г. для двух периодов фильтрации (01–10 и 01–40 мин) в высоких и средних широтах. Линиями отмечено время появления солнечного терминатора на высотах 300 км (пунктир) и 100 км (сплошная линия).

немасштабных возмущений и 0.03 TECU для крупномасштабных; летом эти значения поднимаются до 0.01 TECU и 0.07 TECU, соответственно.

На рис. 2 черными линиями показано время появления солнечного терминатора (СТ) на высотах 100 и 300 км. Из рис. 2, с–d видно, что в средних широтах (станция MOND) СТ порождает интенсивные крупномасштабные возмущения. Среднемасштабные возмущения, вызванные СТ, не наблюдаются. Эти результаты подтверждаются и на других среднеширотных станциях. Можно сделать вывод, что СТ генерирует гравитационные волны ( $T > 10$  мин [Hocke, Schlegel, 1996]) и не создает акустические ( $T < 10$  мин [Hocke, Schlegel, 1996]). В арктическом регионе (станция NRIL, рис. 2, а–b) волновые возмущения WTEC, обусловленные СТ, отсутствуют.

В арктическом регионе поведение WTEC хорошо согласуется с изменением геомагнитного индекса  $AE$ , характеризующего геомагнитную обстановку в высоких широтах. Во время сильных магнитных бурь, WTEC коррелирует также с поведением индексов  $D_{st}$  и  $K_p$ . В отсутствие сильных бурь корреляция индекса WTEC с  $D_{st}$  и  $K_p$  мала, т.к. эти индексы отражают, главным образом, возмущения магнитного поля в экваториальных и средних широтах.

В средних широтах отклик индекса WTEC на изменение магнитного поля менее выражен, чем в высоких широтах. Некоторые корреляции WTEC с поведением геомагнитного индекса  $D_{st}$  наблюдаются во время сильных магнитных бурь. В это время интенсивность крупномасштабных возмущений ПЭС днем возрастает примерно в два раза. Среднемасштабные возмущения ПЭС не имеют существенного отклика на изменение магнитного поля.

### Заключение

Из проведенного анализа общего уровня возмущенности ПЭС в двух диапазонах периодов (01–10 мин и 01–40 мин) по данным среднеширотных GPS-станций ORDA, MOND и высокоширотной GPS-станции NRIL можно сделать следующие выводы.

В арктическом регионе средний минимальный уровень интенсивности средне- и крупномасштабных возмущений ПЭС составляет 0.013 TECU и 0.089 TECU, соответственно; величина минимального уровня интенсивности возмущений ПЭС не зависит от сезона; поведение индекса WTEC хорошо коррелирует с вариациями индекса  $AE$  и менее – с поведением индексов  $D_{st}$ ,  $K_p$ ; волновые возмущения WTEC, обусловленные СТ, отсутствуют.

В средних широтах средний минимальный уровень интенсивности возмущений ПЭС меняется в течение года; суточные вариации WTEC ярко выражены в течение всего года и имеют некоторые сезонные особенности; СТ генерирует гравитационные волны ( $T > 10$  мин) и не создает акустические ( $T < 10$  мин).

Авторы выражают благодарность Геофизической службе РАН (ГС РАН) за предоставленные данные GPS-станции NRIL. Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-37-00027).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Bergardt O.I., Voeykov S.V., Ratovsky K.G. Using a single GPS/GLONASS receiver for estimating the level of ionospheric disturbance // XXXI URSI General Assembly and Scientific Symposium. Beijing, China. August 16–23, 2014: abstracts. 2014a. GP2.31.

Bergardt O.I., Voeykov S.V., Ratovsky K.G. Using a single GPS/GLONASS receiver for estimating the level of ionospheric disturbance // The 40<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly. 2–10 August 2014, Moscow, Russia: abstracts. M., 2014b. P. C0.2-0015-14.

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14, n 5. P. 917–940.

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия  
<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия