

**ДИНАМИКА ВОЗМУЩЕННОСТИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
В ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТАХ ПО ДАННЫМ GPS****DYNAMICS OF DISTURBANCE LEVEL OF TOTAL ELECTRON CONTENT
AT HIGH AND MIDDLE LATITUDES ACCORDING TO GPS DATA****Н.П. Перевалова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pereval@iszf.irk.ru***И.К. Едемский***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ilya@iszf.irk.ru***О.В. Тимофеева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, olga.timofeeva.1994@yandex.ru***Д.Д. Каташевцева***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, dasyadk@gmail.com***А.С. Полякова***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, annpol@iszf.irk.ru***N.P. Perevalova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pereval@iszf.irk.ru***I.K. Edemsky***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ilya@iszf.irk.ru***O.V. Timofeeva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, olga.timofeeva.1994@yandex.ru***D.D. Katashevtseva***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, dasyadk@gmail.com***A.S. Polyakova***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, annpol@iszf.irk.ru*

Аннотация. Проведено исследование уровня возмущенности полного электронного содержания (ПЭС) в среднеширотных и высокоширотных областях ионосферы в течение 2013 г. Ряды вариаций ПЭС рассчитывались по двухчастотным фазовым измерениям на всех радиолучах для GPS-станций MOND (Монды), NRIL (Норильск). Рассматривались колебания ПЭС в двух диапазонах периодов: 10 и 40 мин, которые соответствуют средне- и крупномасштабным ионосферным возмущениям. Для характеристики общего уровня возмущенности ПЭС использовался специальный индекс W_{TEC} , который позволяет получать многодневные непрерывные ряды усредненной интенсивности вариаций ПЭС. Выявлено, что в высоких широтах поведение W_{TEC} хорошо согласуется с вариациями AE и хуже — с поведением индекса D_{st} ; минимальный уровень возмущенности ПЭС не зависит от сезона; суточные вариации W_{TEC} более выражены для среднemasштабных ионосферных возмущений, чем для крупномасштабных. В средних широтах поведение W_{TEC} хорошо согласуется с вариациями D_{st} и K_p только во время сильных магнитных бурь; значение минимального уровня возмущенности летом выше, чем зимой; суточные вариации W_{TEC} в средних широтах ярко выражены в течение года. В средних широтах солнечный терминатор генерирует гравитационные волны, в Арктическом регионе возмущения, вызванные солнечным терминатором, не наблюдаются.

Ключевые слова: GPS, ионосфера, полное электронное содержание, Арктический регион, геомагнитные вариации.

Abstract. We study the level of total electron content (TEC) disturbance in ionospheric mid-latitude and high-latitude regions during 2013. TEC behavior is calculated using data from two GPS stations: MOND (Mondy) and NRIL (Norilsk). TEC variations are calculated from two-frequency phase measurements for all radio rays. We analyze the TEC variations in two time ranges: 10 and 40 min. These ranges correspond to middle- and large-scale ionospheric disturbances respectively. The TEC disturbance level is characterized using the special index W_{TEC} . W_{TEC} allows us to receive multi-day continuous series of average TEC variation intensity. We reveal that at high latitudes W_{TEC} variations agree well with AE ones. The correlation between W_{TEC} and D_{st} variations is much less. The minimum level of TEC disturbance is independent of the season in the Arctic region; diurnal W_{TEC} variations are more pronounced for medium-scale ionospheric disturbances than for large-scale ones. At mid-latitudes, the W_{TEC} behavior agrees well with the D_{st} and K_p variations only during strong magnetic storms. The minimum level of TEC disturbance is higher in summer than in winter. At mid-latitudes, the sunset terminator generates gravitational waves. In the Arctic region, terminator-generated waves are not observed.

Keywords: GPS, ionosphere, total electron content, Arctic region, geomagnetic variations.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из эффективных методов изучения ионосферы являются современные глобальные навигационные спутниковые системы GPS и ГЛОНАСС с развитыми сетями наземных приемников. Зондирование ионосферы радиосигналами GPS/ГЛОНАСС позволяет изучать неоднородности ионосферной плазмы. В последние годы большое внимание уделяется исследованию морфологии ионосферных возмущений различных масштабов в отдельных регионах земного шара [Tsugawa, Saito, 2004; Kotake et al., 2006; Tsugawa et al., 2007a, b; Otsuka et al., 2011, 2013]. Установлены общие характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ, периоды 10–60 мин) в Европе, Японии и Северной Америке. Дневные ПИВ в этих регионах часто возникают в зимний период и в равноденствие. Учитывая преимущественное направление (на юг и юго-восток) дневных ПИВ, авторы работ [Kotake et al., 2006; Tsugawa et al., 2007a, b; Otsuka et al., 2011, 2013] высказали предположение, что эти возмущения вызваны гравитационными волнами, а ночные ПИВ, в среднем распространяющиеся на юго-запад, могут быть связаны с электродинамическими силами. В Японии выявлены общие характеристики ПИВ (периоды более 60 мин) [Tsugawa, Saito, 2004]. Выделены три типа: затухающие и нарастающие ПИВ в возмущенный период и затухающие ПИВ в спокойный период. Определены средние скорости затухания, периоды, длины волн, горизонтальные скорости и направления перемещения для ПИВ каждого типа.

Основная часть результатов по морфологии ионосферных возмущений получена по данным плотных сетей приемников GPS. Однако для таких исследований могут использоваться и отдельные станции GPS, так как даже одна станция обеспечивает контроль вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере в радиусе 500–1000 км за счет пространственного распределения лучей приемник – спутник GPS в течение суток. При этом серьезным ограничением технологии GPS-зондирования ионосферы является малая длительность непрерывного ряда ПЭС, ограниченная временем наблюдения одного спутника (около 2–6 ч). Эта проблема затрудняет изучение долговременных вариаций ПЭС и их связей 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, фильтрованных в выбранном диапазоне периодов, по данным измерений отдельной GPS-станции (индекс возмущенности W_{TEC}) [Berngardt et al., 2014a, b; Воейков и др., 2016]. В настоящей работе данный метод был применен для сравнения поведения вариаций ПЭС в средне- и высокоширотных областях с изменениями индексов геомагнитной активности.

ДАнные ИЗМЕРЕНИЙ И МЕТОДЫ ИХ ОБРАБОТКИ

В работе использовались ряды вариаций ПЭС за 2013 г., полученные по данным среднеширотной станции MOND, входящей в состав Сибирской сети приемников GPS/ГЛОНАСС, созданной в ИСЗФ СО РАН, а также высокоширотной GPS-станции NRIL, принадлежащей Геофизической службе РАН (ГС РАН) и расположенной на Норильской комплексной магнитно-ионосферной станции ИСЗФ СО РАН. Временное разрешение данных составляло 1 с.

Временные ряды вариаций ПЭС $I(t)$ рассчитывались на основе двухчастотных фазовых измерений на всех радиолучах приемник GPS – спутник GPS для выбранной GPS-станции и для углов места на спутник $>5^\circ$. Алгоритм определения ПЭС по фазовым измерениям приемника GPS на двух частотах хорошо известен и широко используется в последние 20 лет [Hofmann-Wellenhof et al., 1992; Афраймович, Первалова, 2006]:

$$I = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2) + const + \sigma], \quad (1)$$

где $L_1 \lambda_1$, $L_2 \lambda_2$ — приращения фазового пути радиосигнала, вызванные задержкой фазы в ионосфере; L_1 , L_2 — фазовые измерения GPS-приемника на частотах f_1 и f_2 соответственно; $const$ — неоднозначность фазовых измерений; σ — ошибка измерения фазы. Фазовые измерения позволяют рассчитывать не абсолютное значение, а вариации ПЭС, так как начальное значение ПЭС ($const$) остается неизвестным. Для определения $const$ применяются различные методики [Hofmann-Wellenhof et al., 1992]. При изучении ионосферных возмущений из рядов $I(t)$ удаляется тренд (фильтрация данных), в результате чего $const$ просто исключается. В то же время измерения фазы в системе GPS производятся с высокой степенью точности, так что ошибка в определении вариаций ПЭС по фазовым измерениям на двух частотах не превышает 10^{14} м^{-2} (или 0.01 TECU) [Hofmann-Wellenhof et al., 1992; Афраймович, Первалова, 2006]. Это позволяет выделять и изучать достаточно слабые возмущения ПЭС, вызванные как естественными, так и техногенными источниками. Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit): $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ электронов/м}^2$.

Общий уровень возмущенности вариаций ПЭС оценивался с помощью индекса W_{TEC} . Метод расчета индекса W_{TEC} имел несколько модификаций [Ишин и др., 2009; Berngardt et al., 2014a, b; Воейков и др., 2016]. В нашей работе мы использовали последний вариант, который авторы метода описали в статье [Воейков и др., 2016]. Ниже дано краткое изложение этого варианта.

Исходными данными для определения индекса W_{TEC} являются ряды вариаций «наклонного» ПЭС $I_i(t)$ вдоль лучей с GPS-приемника на i -й спутник

GPS, а также ряды $\theta_i(t)$ углов места i -го спутника GPS. Ряды $I_i(t)$ подвергаются фильтрации методом скользящего среднего в заданном диапазоне периодов, в результате получают фильтрованные ряды $dI_i(t)$. Ряды «наклонных» фильтрованных вариаций ПЭС $dI_i(t)$ преобразуются в эквивалентные «вертикальные» значения $dI_{v,i}(t)$ [Воейков и др., 2016]:

$$dI_{v,i}(t) = dI_i(t)\sin(\theta_i(t)). \quad (2)$$

Затем для каждого ряда $dI_{v,i}(t)$ определяется интенсивность $A_i(t)$ колебаний ПЭС. С этой целью вариации $dI_{v,i}(t)$ берутся по модулю и сглаживаются скользящим средним [Воейков и др., 2016]:

$$A_i(t) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |dI_{v,i}(t+\tau)| d\tau, \quad (3)$$

где T — длительность окна сглаживания, которая обычно выбирается равной периоду фильтрации исходного ряда ПЭС.

После этого для каждого момента времени рассчитывается интенсивность вариаций ПЭС $W_{\text{ТЕС}}(t)$, усредненная по всем радиолучам приемник–спутник для выбранного приемника GPS. В методе используется процедура взвешенного усреднения рядов $A_i(t)$, чтобы избежать резких перепадов в усредненных данных в моменты времени, соответствующие началу и окончанию наблюдения одного спутника [Воейков и др., 2016]:

$$W_{\text{ТЕС}}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N A_i(t)S_i(t)}{\sum_{i=1}^N S_i(t)}, \quad (4)$$

где N — число спутников, $S_i(t)$ — весовая функция для i -го спутника, которая строится для каждого ряда $A_i(t)$ исходя из требования обращения в ноль на концах ряда функции $S_i(t)$ и ее производной. В качестве весовой функции используется [Воейков и др., 2016]

$$S_i(t) = \sin^2(\pi(t-t_{0,i})/\Delta T_i), \quad (5)$$

где ΔT_i — длительность соответствующего ряда интенсивности $A_i(t)$, а $t_{0,i}$ — его начало. Функция $S_i(t)$ равна 1 в середине ряда и монотонно спадает к 0 на концах ряда.

В результате описанной процедуры получается длительный непрерывный ряд усредненных значений интенсивности вариаций ПЭС, фильтрованных в выбранном диапазоне периодов. Длительность ряда $W_{\text{ТЕС}}(t)$ произвольна и может составлять от нескольких часов до многих суток. Временное разрешение ряда $W_{\text{ТЕС}}(t)$ определяется временным разрешением работы приемника. Согласно формулам (3) и (4), $W_{\text{ТЕС}}$ представляет собой усредненное значение модуля амплитуды колебаний ПЭС. Поэтому размерность $W_{\text{ТЕС}}$ совпадает с размерностью ПЭС, т. е. единицей измерения $W_{\text{ТЕС}}$ является TECU. Пределы изменения $W_{\text{ТЕС}}$ определяются пределами изменения амплитуды колебаний ПЭС, которые очень сильно зависят от периода колебаний, т. е. от масштаба ионосферных неоднородностей. Согласно данным многолетних исследований (см. список ли-

тературы в [Афраймович, Перевалова, 2006]), для среднемасштабных ПИВ (периоды 1–10 мин) модуль амплитуды колебаний ПЭС (а следовательно, и $W_{\text{ТЕС}}$) может меняться в пределах от 0 до 3 TECU; для крупномасштабных ПИВ (периоды более 10 мин) модуль амплитуды (и $W_{\text{ТЕС}}$) варьирует в пределах от 0 до 10 TECU.

В настоящей работе мы рассматривали колебания ПЭС в двух диапазонах периодов: 1–10 и 1–40 мин, которые соответствуют среднемасштабным и крупномасштабным ПИВ. Поведение уровня возмущенности ПЭС сравнивалось с поведением геомагнитных индексов AE , K_p , D_{st} , данные о которых получены на сайте Международного центра данных в Киото [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Индексы отражают интенсивность и характер поведения магнитного поля Земли. Низкоширотный индекс D_{st} содержит информацию о планетарных возмущениях. Он вычисляется на основе измерений магнитного поля на четырех приэкваториальных станциях, и в первом приближении D_{st} -вариацию можно считать полем кольцевого тока [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Высокоширотный индекс AE характеризует интенсивность тока в авроральной зоне и является индикатором суббуревой активности. Индекс AE вычисляется по данным обсерваторий, расположенных в авроральных и субавроральных широтах [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>]. Индекс K_p является планетарным индексом и вычисляется по данным среднеширотных геомагнитных обсерваторий [<http://www.swpc.noaa.gov>].

УРОВЕНЬ ВОЗМУЩЕННОСТИ ПЭС В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Для сравнительного анализа уровня возмущенности ПЭС и магнитного поля Земли были построены временные вариации $W_{\text{ТЕС}}$ для возмущений с периодами 1–10 и 1–40 мин и магнитных индексов AE , D_{st} , K_p за каждый месяц 2013 г. для высокоширотной станции NRIL. Примеры поведения индексов $W_{\text{ТЕС}}$, AE , D_{st} , K_p в марте, июне, сентябре и декабре 2013 г. показаны на рис. 1.

Как видно из рис. 1, а, 15 марта 2013 г. зафиксировано внезапное начало бури (SSC), при этом значения $W_{\text{ТЕС}}$ были малы, значение AE повысилось лишь до ~250 нТл, в вариациях D_{st} и K_p буря не проявилась. Во время наиболее сильной бури месяца 17 марта значения индекса $W_{\text{ТЕС}}$ существенно возросли до ~1 и ~1.5 TECU для колебаний с периодами 10 и 40 мин соответственно. В этот же день магнитный индекс AE повысился до отметки ~1750 нТл, D_{st} понизился до значения –125 нТл, что говорит о хорошей согласованности поведения магнитных индексов и $W_{\text{ТЕС}}$. Помимо этого можно выделить возмущения AE 1–2, 20–21, 22–24, и 27–30 марта, сопровождавшиеся возрастанием индекса $W_{\text{ТЕС}}$.

Сильная магнитная буря была зарегистрирована 1 июня 2013 г. (рис. 1, б) с $K_p=7$, $D_{st}\approx-125$ нТл, $AE\approx 1250$ нТл (SSC 31 мая). В это время $W_{\text{ТЕС}}$ повысился до ~1.2 и 2 TECU для колебаний с периодами 10 и 40 мин соответственно. С 6 по 8 июня также наблюдались заметные возмущения магнитного поля:

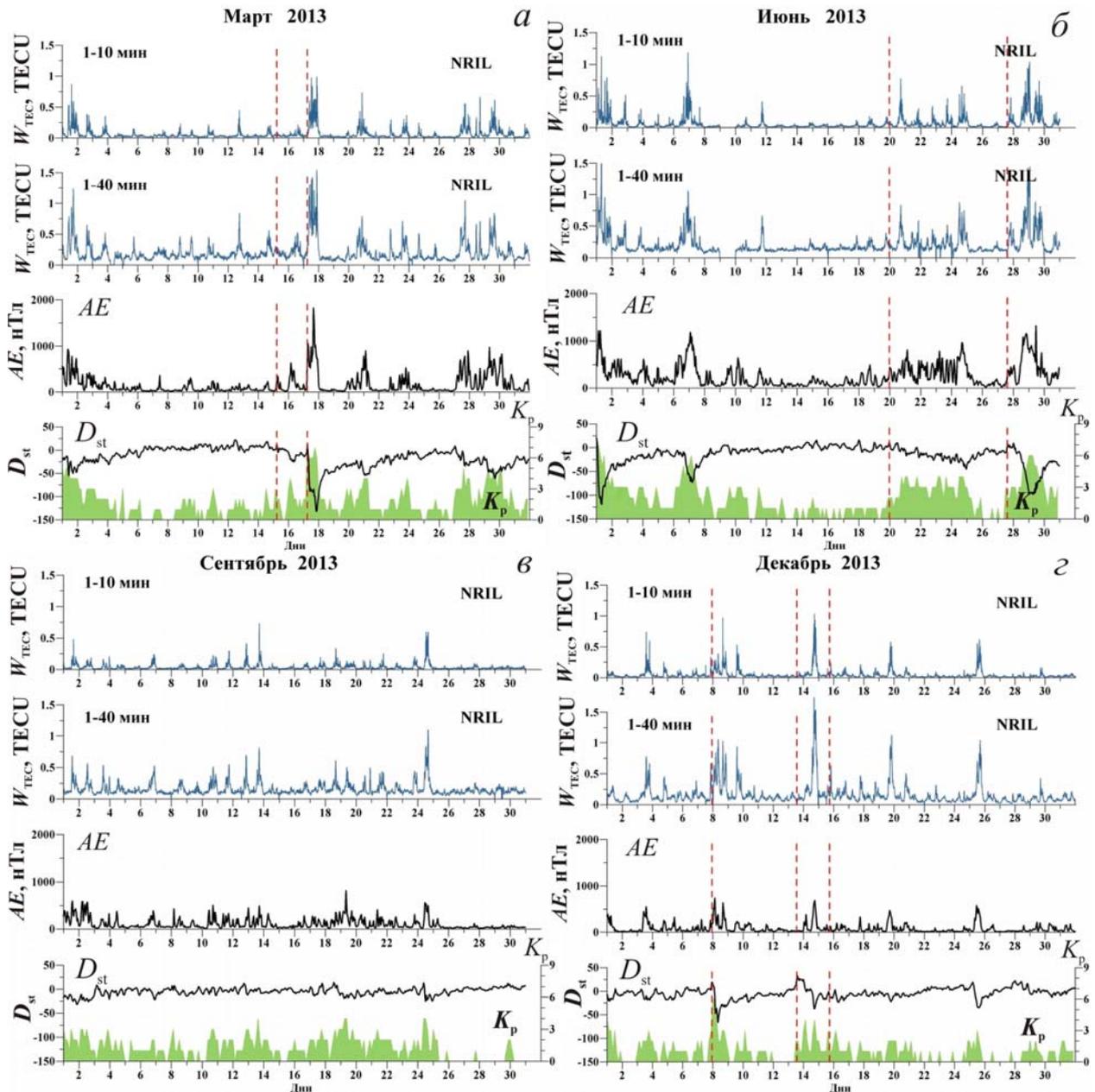


Рис. 1. Вариации индекса W_{TEC} для возмущений с периодами 1–10 и 1–40 мин для станции NRIL, а также вариации магнитных индексов AE , D_{st} и K_p в марте (а), июне (б), сентябре (в) и декабре (г) 2013 г. Вертикальными штриховыми линиями отмечены внезапные начала геомагнитных бурь

AE возрос до ~ 1250 нТл, D_{st} составлял -75 нТл и $K_p=6$. При этом W_{TEC} возрос до ~ 1.2 TECU (периоды 10 мин) и ~ 1 TECU (периоды 40 мин). В период 20–26 июня (SSC 19 июня) наблюдались значительные колебания индекса AE (AE достигал значений ~ 1000 нТл). В это время наблюдалась хорошая согласованность в поведении индексов W_{TEC} и AE . Индекс D_{st} при этом менялся незначительно. Сильная магнитная буря была зарегистрирована 28–29 июня (SSC 27 июня) с $D_{st} \sim -100$ нТл и $K_p=6$. Она нашла отражение в усилении индексов AE до ~ 1200 нТл, W_{TEC} до ~ 1 и ~ 1.5 TECU для возмущений с периодами 10 и 40 мин соответственно.

В сентябре 2013 г. (рис. 1, в) состояние магнитосферы было спокойным: K_p был меньше 4, AE в

среднем не превышал 600 нТл. Значения индекса W_{TEC} были малы, но периодически наблюдались увеличения амплитуды вариаций W_{TEC} до 0.5–0.7 TECU, совпадавшие по времени с небольшими возмущениями индекса AE . Можно также отметить выраженные суточные вариации W_{TEC} в течение всего месяца.

Согласованный рост индексов AE и W_{TEC} наблюдался 3 декабря 2013 г. (рис. 1, г), при этом AE равнялся приблизительно 500 нТл, а W_{TEC} составлял ~ 0.75 TECU. Во время слабых магнитных бурь 7–9 декабря, 13–14 декабря и 25 декабря, проявившихся в индексах D_{st} , K_p , AE , наблюдалось возрастание индекса W_{TEC} примерно до 0.5–1 TECU (для периодов 10 мин) и 1–1.75 TECU (для периодов 40 мин).

Как следует из вышесказанного, в Арктическом регионе поведение W_{TEC} хорошо согласуется с изменением индекса AE , характеризующего геомагнитную обстановку в высоких широтах. Во время магнитных бурь, имеющих планетарный характер, наблюдается также связь между поведением индексов W_{TEC} , D_{st} и K_p . В отсутствие сильных бурь поведение W_{TEC} и индексов D_{st} , K_p мало согласовано, так как эти индексы отражают главным образом возмущения магнитного поля в экваториальных и средних широтах.

Уровень минимальной интенсивности возмущений ПЭС в Арктическом регионе близок погрешности определения ПЭС и не зависит от сезона: в 2013 г. он составлял 0.013 и 0.089 TECU для возмущений с периодами 10 и 40 мин соответственно.

На рис. 2 показаны интенсивности суточных вариаций W_{TEC} для периодов фильтрации 10 и 40 мин и геомагнитного индекса AE в течение 2013 г. Анализ показывает, что в высокоширотной ионосфере суточные вариации W_{TEC} сильнее проявляются для среднемасштабных возмущений ПЭС (рис. 1; 2, а), чем для крупномасштабных (рис. 1; 2, б). Суточные вариации интенсивности среднемасштабных возмущений наиболее выражены в марте–апреле и в сентябре–октябре. Поведение индекса AE не зависит от времени суток (рис. 2, в). Максимальные значения AE наблюдались в мае и июне 2013 г.

УРОВЕНЬ ВОЗМУЩЕННОСТИ ПЭС В СРЕДНИХ ШИРОТАХ

На рис. 3 показаны вариации индекса W_{TEC} для возмущений с периодами 1–10 и 1–40 мин для станции MOND, а также магнитных индексов AE , D_{st} , K_p в марте, июне, сентябре и декабре 2013 г.

Сравнение рис. 1 и 3 показывает, что средний уровень возмущенности W_{TEC} в средних широтах ниже, чем в высоких, примерно в три раза для возмущений с периодом 10 мин и примерно в два раза для возмущений с периодом 40 мин. Средний минимальный уровень интенсивности возмущений ПЭС в средних широтах, так же как в высоких, близок погрешности определения ПЭС. Для крупномасштабных возмущений можно выделить небольшие сезонные колебания уровня: зимой он составляет около 0.03 TECU; летом его значение поднимается до 0.07 TECU. Для среднемасштабных возмущений средний минимальный уровень интенсивности возмущений ПЭС близок 0.01 TECU.

В средних широтах согласованность поведения W_{TEC} с вариациями индексов магнитной активности (особенно с индексом AE) менее выражена, чем в высоких. Как видно из рис. 3, а, б согласованность наблюдается в поведении крупномасштабных возмущений W_{TEC} и магнитных индексов главным образом во время сильных магнитных бурь 17 марта, 1 июня и 28–29 июня, когда D_{st} опускался ниже ~100 нТл, а K_p был больше 6. Значения W_{TEC} для возмущений с периодами 40 мин в эти дни поднимались до ~0.4, ~0.35 и ~0.25 TECU соответственно, в то время как уровень среднемасштабных возмущений мало менялся. В целом интенсивность отклика W_{TEC} на сильную магнитную бурю в средних

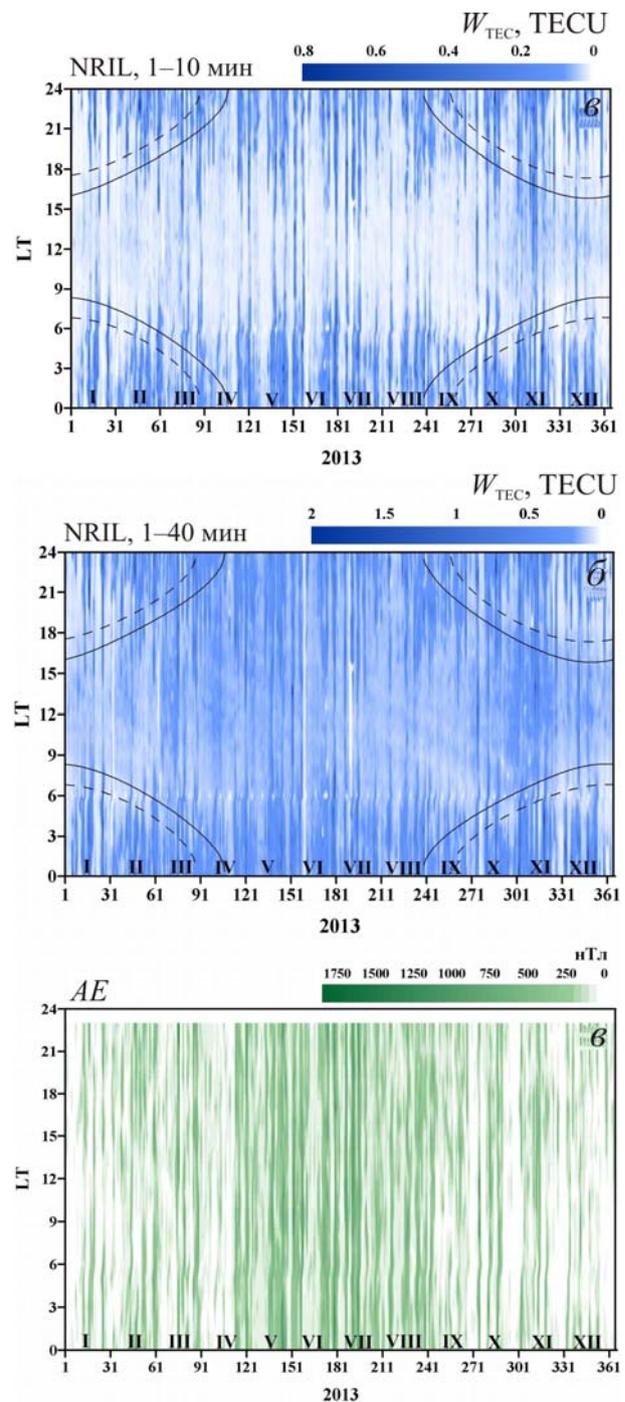


Рис. 2. Интенсивности суточных колебаний индекса возмущенности W_{TEC} для периодов фильтрации 1–10 мин (а) и 1–40 мин (б), а также геомагнитного индекса AE (в) в течение 2013 г. в высоких широтах (станция NRIL). Линиями отмечено время появления солнечного терминатора (СТ) на высотах 300 км (штриховая линия) и 100 км (сплошная линия). Римскими цифрами обозначены месяцы 2013 г.

широтах ниже, чем в высоких, в ~15 раз для возмущений с периодом 10 мин и в ~4 раза для возмущений с периодом 40 мин. Магнитные бури в средних широтах вызывают образование главным образом крупномасштабных возмущений.

В сентябре 2013 г. (рис. 3, в) в спокойной магнитной обстановке поведение W_{TEC} также было спокойным: W_{TEC} в среднем не превышал значений ~0.1 и ~0.2 TECU для колебаний с периодами 10 и 40 мин соответственно.

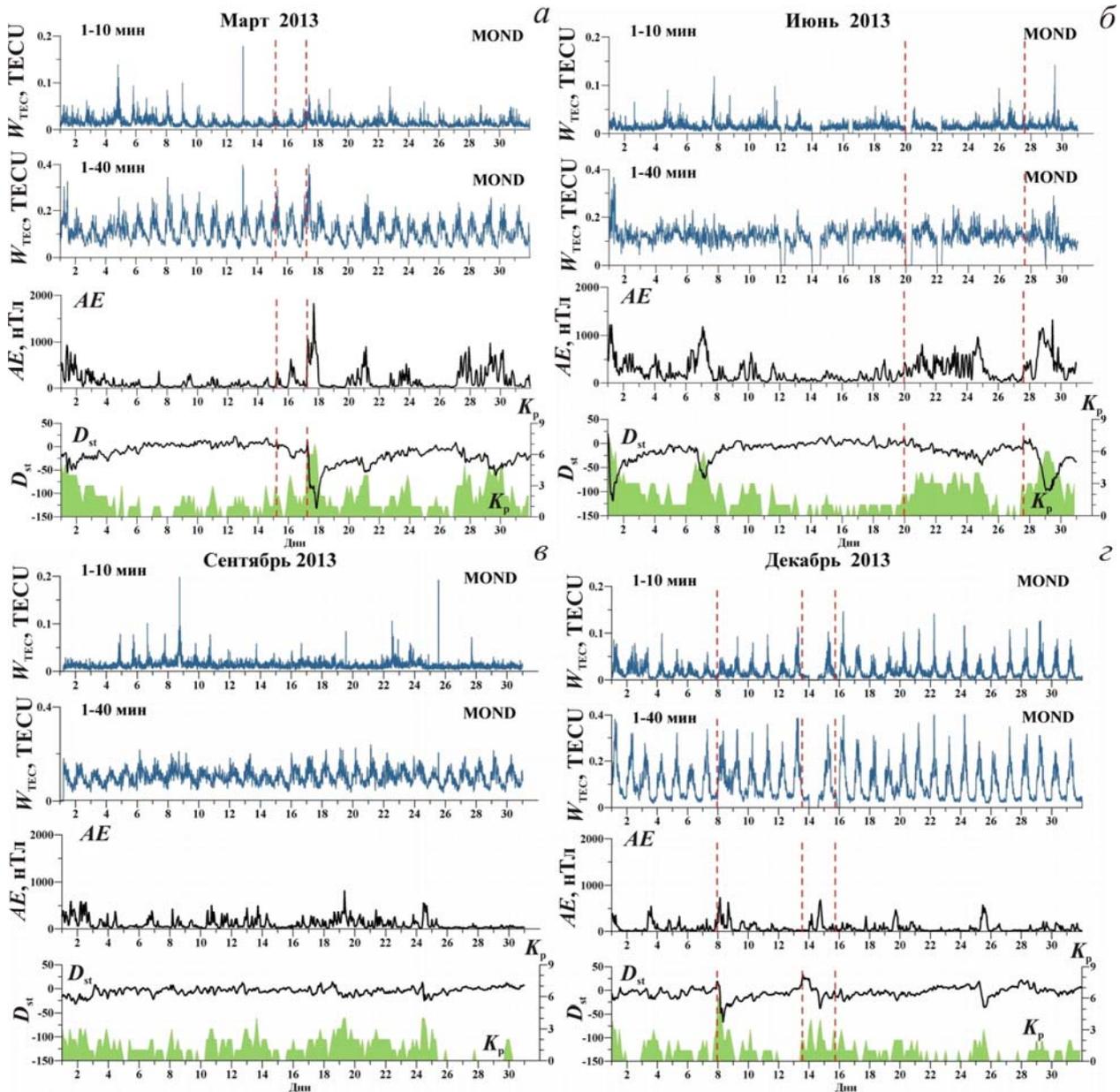


Рис. 3. Вариации индекса W_{TES} для возмущений с периодами 1–10 и 1–40 мин для станции MOND, а также магнитных индексов AE , D_{st} и K_p в марте (а), июне (б), сентябре (в) и декабре (г) 2013 г. Вертикальными штриховыми линиями отмечены внезапные начала геомагнитных бурь

В декабре вариации W_{TES} отличались большой амплитудой суточных вариаций, мало связанной с изменениями магнитного поля. Даже во время бурь 8 и 16 декабря 2013 г. ($D_{\text{st}} \sim -50$ нТл) уровень W_{TES} изменился незначительно.

Таким образом, в средних широтах отклик индекса W_{TES} на изменение магнитного поля менее выражен, чем в высоких. Согласованность поведения W_{TES} и геомагнитных индексов D_{st} и K_p наблюдается 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.

На рис. 4 показаны интенсивности суточных вариаций W_{TES} для периодов фильтрации 10 и 40 мин

в течение 2013 г. на станции MOND. Суточные вариации W_{TES} в средних широтах имеют сезонные особенности (рис. 3, 4). Летом возмущения более интенсивны в начале и конце дня, во все другие сезоны интенсивность возмущений выше в середине дня. Можно отметить увеличение интенсивности вариаций в светлое время суток с октября до конца года.

Черными линиями на рис. 4 показано время появления СТ на высотах 100 и 300 км. Из рис. 4, б видно, что в средних широтах (станция MOND) СТ порождает интенсивные крупномасштабные возмущения. Среднемасштабные возмущения, вызванные СТ, не наблюдаются (рис. 4, а). Эти результаты согласуются с данными [Afraimovich et al., 2009], где было показано, что в средних широтах ($30\text{--}40^\circ$ N) СТ генерирует возмущения с периодами $T > 15$ мин,

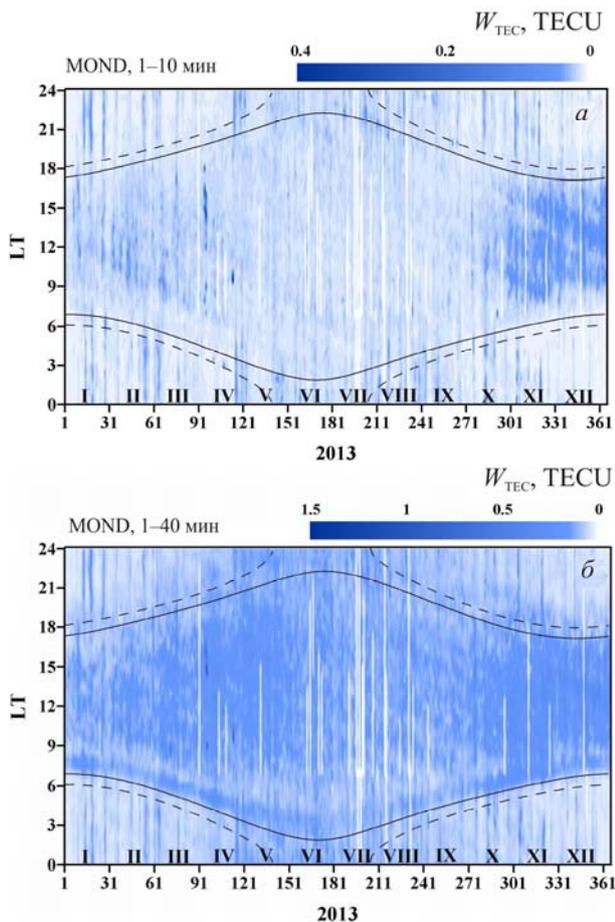


Рис. 4. Интенсивности суточных колебаний индекса возмущенности W_{TEC} в течение 2013 г. для периодов фильтрации 1–10 (а) и 1–40 мин (б) в средних широтах (станция MOND). Линиями отмечено время появления СТ на высотах 300 км (штриховая линия) и 100 км (сплошная линия). Римскими цифрами обозначены месяцы 2013 г.

а возмущения с $T < 10$ мин не наблюдаются. Учитывая это, 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) волновые возмущения W_{TEC} , обусловленные СТ, отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным среднеширотной GPS-станции MOND и высокоширотной GPS-станции NRIL проведен анализ общего уровня возмущенности ПЭС в диапазонах периодов 1–10 и 1–40 мин в 2013 г. Для характеристики общего уровня возмущенности ПЭС использовался специальный индекс W_{TEC} , который позволил получить многодневные непрерывные ряды усредненной интенсивности вариаций ПЭС. В результате анализа установлены следующие особенности поведения уровня возмущенности ПЭС.

В Арктическом регионе средний минимальный уровень интенсивности средне- и крупномасштабных возмущений ПЭС составляет 0.013 и 0.089 TECU соответственно. Величина минимального уровня интенсивности возмущений ПЭС не зависит от сезона. Суточные вариации W_{TEC} более выражены для среднемасштабных ионосферных возмущений (пе-

риоды ~10 мин), чем для крупномасштабных (периоды ~40 мин). Поведение индекса W_{TEC} хорошо согласуется с вариациями индекса AE и хуже — с поведением индексов D_{st} , K_p ; только в случае сильных магнитных бурь, имеющих планетарный характер, поведение W_{TEC} согласуется с поведением D_{st} . Волновые возмущения W_{TEC} , обусловленные СТ, отсутствуют.

В средних широтах средний минимальный уровень интенсивности крупномасштабных возмущений ПЭС меняется от 0.03 TECU зимой до 0.07 TECU летом. Для среднемасштабных возмущений он близок 0.01 TECU. Суточные вариации W_{TEC} ярко выражены в течение всего года и имеют сезонные особенности. Поведение W_{TEC} в средних широтах хорошо согласуется с вариациями D_{st} и K_p во время сильных магнитных бурь. В этой области широт СТ вызывает образование крупномасштабных возмущений (с периодами больше 15 мин), а среднемасштабные возмущения (с периодами менее 10 мин) не наблюдаются. Таким образом, СТ генерирует гравитационные волны и не создает акустические.

Авторы выражают глубокую благодарность С.В. Воейкову, О.И. Бернгардту за разработанный ими метод расчета индекса W_{TEC} , предоставленные описание метода и программу расчета W_{TEC} , а также за полезные обсуждения. Кроме того, 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

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Воейков С.В., Бернгардт О.И., Шестаков Н.В. Использование индекса возмущенности вертикальных вариаций ПЭС при исследовании ионосферных эффектов Челябинского метеорита // Геомагнетизм и аэронавигация. 2016. № 2. [Принята в печать].
- Ишин А.Б., Воейков С.В., Перевалова Н.П. и др. Вариации ионосферных параметров, наблюдавшиеся во время мощных ураганов 2005 г. вблизи атлантического побережья США // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 2. Вып. 6 С. 274–279.
- Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Voeykov S.V., et al. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator // Adv. Space Res. 2009. V. 44, N 7. P. 824–835.
- Berngardt O.I., Voeykov S.V., Ratovsky K.G. Using a single GPS/GLONASS receiver for estimating the level of ionospheric disturbance // General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI, 16–23 Aug. 2014. IEEE: 2014a. P. 1–3. DOI: 10.1109/URSIGASS.2014.6929809.
- Berngardt O.I., Voeykov S.V., Ratovsky K.G. Using a single GPS/GLONASS receiver for estimating the level of ionospheric disturbance // The 40th COSPAR Scientific Assembly. Moscow, Russia, August 2–10, 2014: Abstracts. M., 2014b. P. C0.2-0015-14.
- Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14, N 5. P. 917–940.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. New York: Springer-Verlag Wien. 1992. 327 p.

Kotake N., Otsuka Y., Tsugawa T., et al. Climatological study of GPS total electron content variations caused by medium-scale traveling ionospheric disturbances // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. A04306. DOI: 10.1029/2005JA011418.

Otsuka Y., Kotake N., Shiokawa K., et al. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with a GPS receiver network in Japan // *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series 2*. 2011. N 21. P. 291–299. DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1_21.

Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., et al. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe // *Ann. Geophys.* 2013. N 31. P. 163–172. DOI: 10.5194/angeo-31-163-2013.

Tsugawa T., Kotake N., Otsuka Y., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review // *GPS Solutions*. 2007a. N 11. P. 139–144. DOI: 10.1007/s10291-006-0045-5.

Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A. J., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America // *J. Geophys. Res.* 2007b. V. 34. L22101. DOI: 10.1029/2007GL031663.

Tsugawa T., Saito A. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan // *J. Geophys. Res.* 2004. V. 109. A06302. DOI: 10.1029/2003JA010302.

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed February 01, 2016).

REFERENCES

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-Monitoring Verkhnej Atmosfery Zemli* [GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere]. Irkutsk, SC RRS SB RAMS. 2006, 480 p. (in Russian).

Afraimovich E.L., Edemsky I.K., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Zhivet'ev I.V. Spatio-temporal structure of the wave packets generated by the solar terminator. *Adv. Space Res.* 2009, vol. 44, no. 7, pp. 824–835.

Berngardt O.I., Voeykov S.V., Ratovsky K.G. Using a single GPS/GLONASS receiver for estimating the level of ionospheric disturbance. General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS), 2014 XXXIth URSI, 16–23 Aug. 2014. IEEE. 2014a, pp.1–3. DOI: 10.1109/URSIGASS.2014.6929809.

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

Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances 1982–1995. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 14, no. 5, pp. 917–940.

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. New York, Springer-Verlag Wien. 1992. 327 p.

Ishin A.B., Voeykov S.V., Perevalova N.P., Zalizovsky A.V., Sopin A.A. Ionospheric parameters' variations registered during powerful hurricanes near the USA Atlantic coast in 2005. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Present Problems of Remote Probing Earth From Space]. 2009. vol. 6, no. 2. pp. 274–279 (in Russian).

Kotake N., Otsuka Y., Tsugawa T., Ogawa T., Saito A. Climatological study of GPS total electron content variations caused by medium-scale traveling ionospheric disturbances. *J. Geophys. Res.* 2006, vol. 111, A04306. DOI: 10.1029/2005JA011418.

Otsuka Y., Kotake N., Shiokawa K., Ogawa T., Tsugawa T., Saito A. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with a GPS receiver network in Japan. *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere, IAGA Special Sopron Book Series 2*. 2011. no. 21, pp. 291–299. DOI: 10.1007/978-94-007-0326-1_21.

Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Ann. Geophys.* 2013, no. 31, pp. 163–172. DOI: 10.5194/angeo-31-163-2013.

Tsugawa T., Kotake N., Otsuka Y., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS receiver network in Japan: a short review. *GPS Solutions*. 2007a, no. 11, pp. 139–144. DOI: 10.1007/s10291-006-0045-5.

Tsugawa T., Otsuka Y., Coster A. J., Saito A. Medium-scale traveling ionospheric disturbances detected with dense and wide TEC maps over North America. *J. Geophys. Res.* 2007b, vol. 34, L22101. DOI: 10.1029/2007GL031663.

Tsugawa T., Saito A. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan. *J. Geophys. Res.* 2004, vol. 109, A06302. DOI: 10.1029/2003JA010302.

Voeykov S.V., Bergardt O.I., Shestakov N.V. Using the index of disturbance of vertical TEC variations for studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite. *Geomagnetizm i Aeronomiya* [Geomagnetism and Aeronomy]. 2016, no. 2 (Accepted) (in Russian).

URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp> (accessed February 01, 2016).

Статья подготовлена по материалам Конференции молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» Международной Байкальской молодежной школы по фундаментальной физике.