

Н.П. Перевалова¹, Э.Л. Афраимович¹, С.В. Воейков¹, И.В. Живетьев²

Влияние суточного вращения Земли на распространение крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

²Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, пос. Паратунка

Поступила в редакцию 6.08.2007 г.

По данным измерений полного электронного содержания (ПЭС) на глобальной сети приемников GPS исследована связь динамических характеристик крупномасштабного возмущения ПЭС с перемещением ионизации, обусловленным суточным вращением Земли. Рассматривалось возмущение ПЭС, возникшее в период магнитосферной бури 29.10.2003. Возмущение носило характер крупномасштабной волны уединенного типа с кольцевой формой волнового фронта, центр которого находился в районе геомагнитного полюса, а скорость и направление распространения возмущения имели ярко выраженную долготную зависимость.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили исследования структуры и динамики верхней атмосферы Земли по данным измерений полного электронного содержания (ПЭС), которое регистрируется при зондировании сигналами спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Плотность приемников сети GPS гораздо выше, чем плотность всех существовавших до настоящего времени сетей ионосферных детекторов. С учетом того, что в каждый момент времени в зоне радиовидимости отдельного приемника GPS находится 5–8 навигационных спутников, ионосфера Земли сейчас просвечивается одновременно тысячами лучей «приемник–спутник». Это делает сеть GPS уникальным инструментом для исследования верхней атмосферы.

В работах [1–3] предприняты попытки, используя потенциал глобальной сети приемников GPS и методы GPS-интерферометрии, разработанные в ИСЗФ СО РАН [4], определить пространственные параметры и характеристики движения крупномасштабного перемещающегося ионосферного возмущения (КМ ПИВ), образовавшегося во время внезапного начала (SSC) магнитной бури 29.10.2003 в авроральной зоне. Геомагнитная буря 29 октября 2003 г. последовала за сильнейшей вспышкой на Солнце класса X17.2 28.10.2003. Буря имела выраженное внезапное начало SSC в 06:11 UT и сопровождалась возрастанием индекса K_p до высшего значения 9 ($D_{st} = -308$ нТл). Продолжая начатые в [1–3] исследования, мы приводим результаты определения динамических характеристик КМ ПИВ и их возможную связь с перемещением ионизации, связанным с суточным вращением Земли.

Методика измерений

Исходными данными для наших исследований являются временные ряды $I_0(t)$ вариаций «наклонного» ПЭС, измеряемые с помощью двухчастотных

приемников GPS, а также соответствующие им ряды значений углов места $\theta_S(t)$ и азимутов $\alpha_S(t)$ лучей «приемник–ИСЗ». При изучении глобальной картины отклика ионосферы на магнитную бурю 29.10.2003 использовались данные мировой сети приемников GPS, расположенных в пяти секторах северного полушария: Западно-американском, Восточно-американском, Европейском, Азиатском и Дальневосточном. На рис. 1 секторы регистрации вариаций ПЭС обозначены областями **A**, **B**, **C**, **D**, **E**, а положение станций GPS показано точками. Жирной пунктирной линией отмечено положение южной границы аврорального овала на момент 05:26 UT 29.10.2003 (<http://www.sec.noaa.gov/rmap>), крестом – северный магнитный полюс (NMP). Квадратами показано расположение магнитовариационных станций, данные которых использовались для контроля геомагнитной обстановки и временной привязки.

При определении параметров КМ ПИВ выбирались непрерывные ряды измерений длительностью не менее 3 с с высоким качеством данных (т.е. отсутствием сбоев фазовых измерений ПЭС). Для нормировки амплитуды возмущений использовалось преобразование «наклонного» ПЭС $I_0(t)$ в эквивалентное «вертикальное» значение $I(t)$ [5]. Общепринятой единицей измерения ПЭС является TECU (Total Electron Content Unit), равная 10^{16} м⁻².

С целью выделения КМ ПИВ из рядов измерений ПЭС отфильтровывались вариации ПЭС $dI(t)$ в диапазоне периодов 30–90 мин. Расчет горизонтальной скорости V_h и азимута α перемещения КМ ПИВ проводился с помощью алгоритма SADM-GPS [4]. Алгоритм основан на расчете пространственных и временных градиентов электронной концентрации по измерениям ПЭС на трех разнесенных в пространстве станциях GPS (GPS-решетке). В каждом секторе использовались все возможные наборы решеток, базы которых не превышали половину ожидаемой длины волны КМ ПИВ.

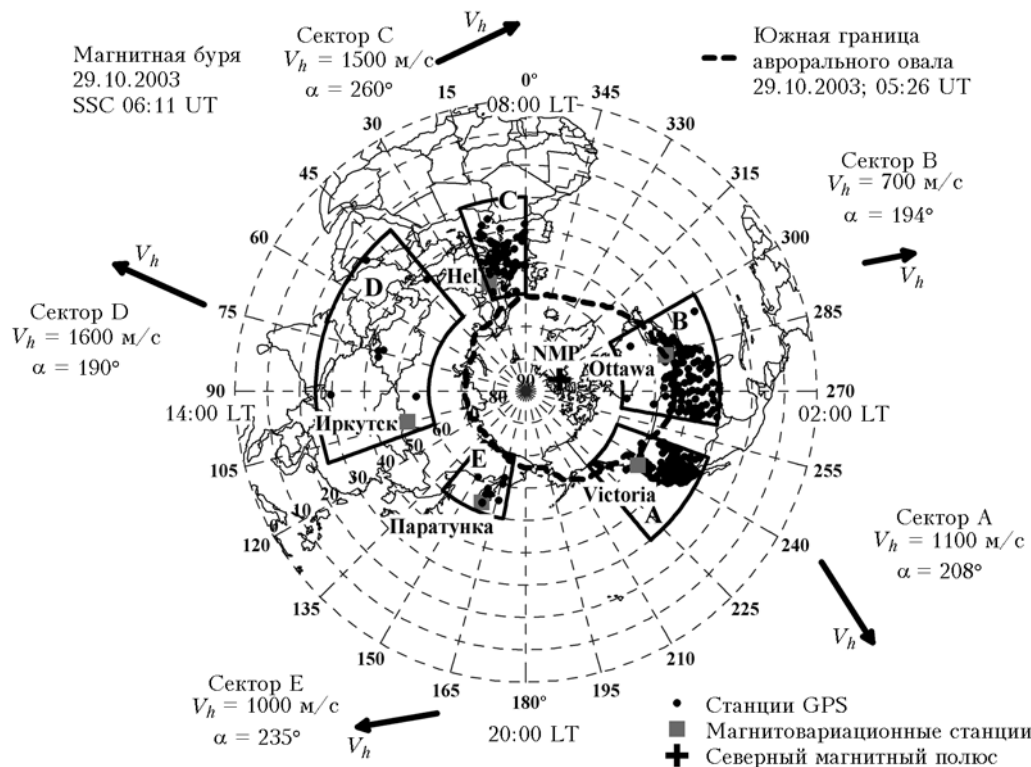


Рис. 1. Геометрия измерений во время магнитной бури 29 октября 2003 г.

Движение КМ ПИВ в авральной зоне

Во всех секторах после SSC зафиксировано волнообразное возмущение ПЭС с периодом 40–60 мин. Как установлено в [2, 3], возмущение носит характер уединенной волны и имеет кольцевую форму. Центр кольца находится в районе геомагнитного полюса. Сопоставление с данными магнитовариационных станций показало, что возмущение появляется во время резкого изменения временной производной напряженности магнитного поля Земли.

Рассчитанные с помощью алгоритма SADMGPS средние значения скорости и направления перемещения зарегистрированного КМ ПИВ в каждом секторе приведены на рис. 1 и в таблице. Кроме того, в таблице приведены средние для региона значения амплитуды ΔI и периода T возмущения,

а также число обработанных рядов ПЭС. Жирными черными стрелками на рис. 1 показано направление горизонтальной скорости КМ ПИВ, отражающее примерные траектории распространения возмущения в различных регионах.

Анализ полученных данных показывает, что скорость и направление распространения возмущения имеют ярко выраженную долготную зависимость. Наименьшая скорость регистрируется в ночном полушарии, что скорее всего связано с низкой плотностью плазмы в ночной ионосфере. Сравнение с данными глобальных карт вертикального ПЭС (GIM, <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>) подтверждает это предположение: наименьшая скорость ПИВ (700 м/с) зарегистрирована в области, где значения ПЭС минимальны, а наибольшая (1600 м/с) — на дневной стороне, где значения ПЭС максимальны (рис. 2).

Параметры КМ ПИВ в различных секторах

Сектор, регион	V_h , м/с	СКО V_h , м/с	α , град	СКО α , град	Число рядов	ΔI , TECU	T , мин
А, Западно-американский	1090	364	208	7	120	0,4	48
В, Восточно-американский	684	310	194	30	80	1,3	48
С, Европейский	1508	540	259	46	4/86	1,2	60
Д, Азиатский	1640	397	194	93	7/23	2,2	54
Е, Дальневосточный	1013	350	235	32	11	2,5	60

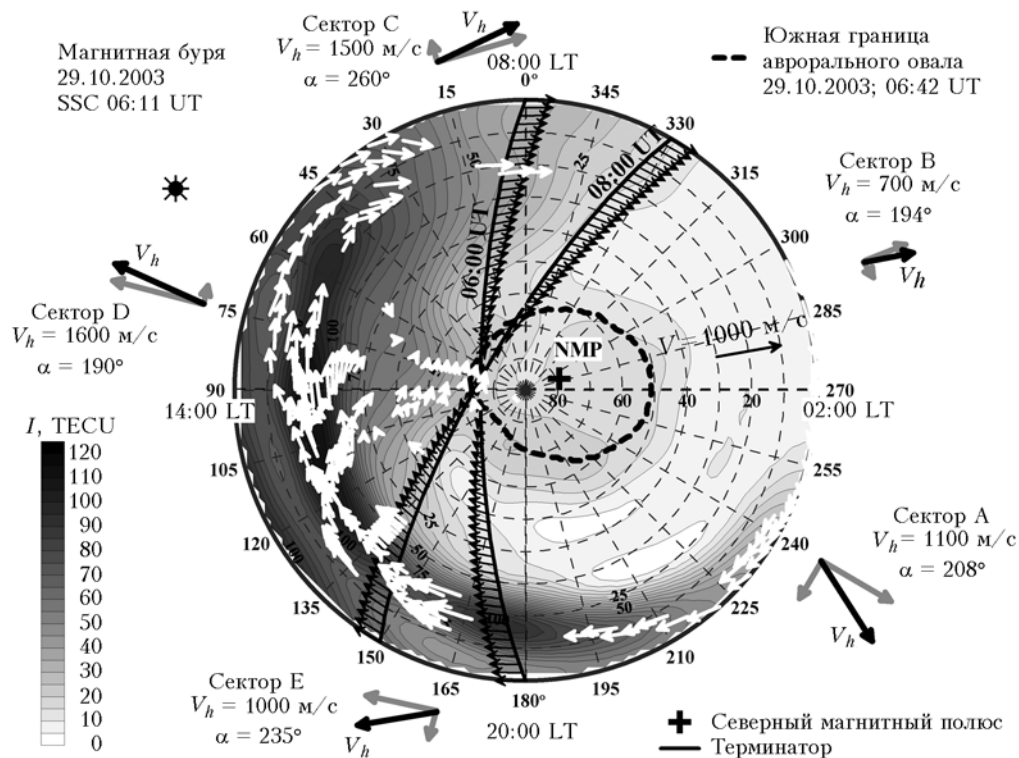


Рис. 2. Сопоставление движения изолиний ПЭС (белые стрелки) с движением КМ ПИВ (черные стрелки по периметру рисунка)

Серыми стрелками на рис. 2 изображены зональная и меридиональная компоненты горизонтальной скорости КМ ПИВ.

В целом возмущение распространяется в экваториальном направлении. В то же время явно прослеживается эффект «закручивания» направления распространения в сторону, противоположную вращению Земли. «Закручивание» обусловлено значительной величиной зональной компоненты скорости КМ ПИВ, направленной на запад (см. рис. 2). В утреннем и вечернем секторах зональная компонента скорости превышает меридиональную. В ночном и дневном секторах направление распространения близко к меридиональному.

Движение изолиний ПЭС

Мы предположили, что на характер движения КМ ПИВ оказывает влияние перемещение фоновой ионизации. С целью проверки этой гипотезы по картам ГИМ были рассчитаны скорость и направление перемещения изолиний ПЭС. Для этого на каждой изолинии выбирались пять реперных точек, прослеживалась траектория их движения и рассчитывалась скорость смещения. В качестве реперных точек служили: самая восточная (с максимальной долготой λ_{\max}), самая западная (с минимальной долготой λ_{\min}), самая северная (с максимальной широтой φ_{\max}), самая южная (с минимальной широтой φ_{\min}) точки изолинии, а также центр тяжести контура. Координаты центра тяжести (долгота λ_C , широта φ_C) рассчитывались как координаты центра

тяжести плоской фигуры, ограниченной выбранной изолинией [6]:

$$\lambda_C = \frac{1}{S} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \lambda [f_1(\lambda) - f_2(\lambda)] d\lambda,$$

$$\varphi_C = \frac{1}{2S} \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [f_1^2(\lambda) - f_2^2(\lambda)] d\lambda,$$

где $f_1(\lambda)$ и $f_2(\lambda)$ – «верхняя» и «нижняя» части изолинии, ограниченные крайними восточной и западной точками; S – площадь фигуры внутри изолинии. Для расчетов выбирались изолинии, которые пересекались с любым меридианом не более чем в двух точках (т.е. не имели изгибов в виде «язычков» и т.п.).

Карты распределения скоростей перемещения изолиний ПЭС (белые стрелки) в спокойных (а, б) и возмущенных (в, г) условиях приведены на рис. 3.

Черной линией со стрелками показаны положение и скорости движения терминатора на поверхности Земли. Масштаб значения скоростей $V = 1000$ м/с задан черной стрелкой. Перемещение изолиний ПЭС происходит вдоль параллели: азимут во всех случаях близок к 270° (СКО определения азимута – 40°). Скорость движения изолиний зависит от широты. На низких ($10-30^\circ$) широтах она варьируется от 350 до 600 м/с, а на широтах $60-75^\circ$ уменьшается до 50–100 м/с. Аналогичный характер изменения скорости присущ для терминатора: на экваторе скорость терминатора составляет 463 м/с,

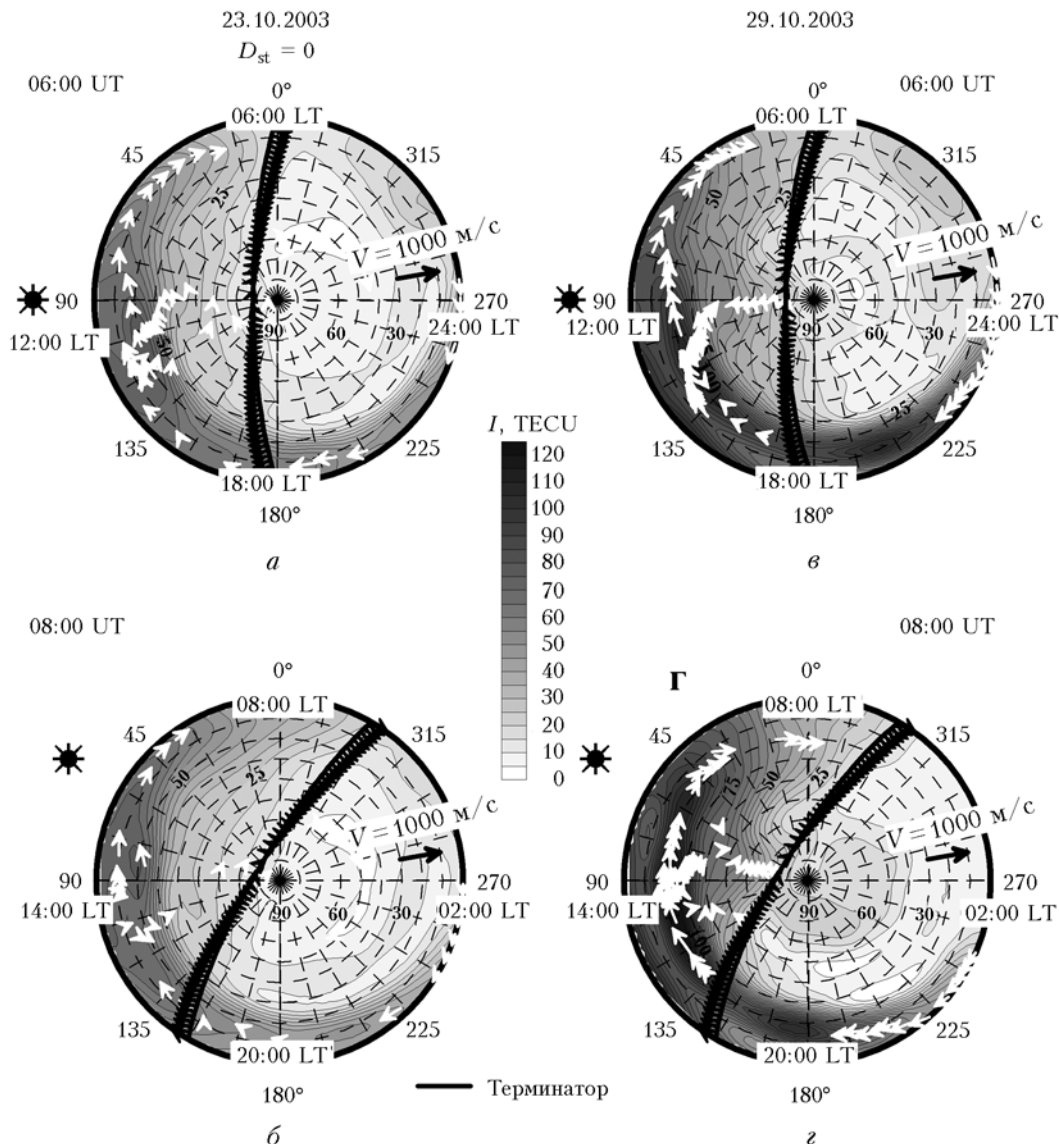


Рис. 3. Движение изолиний ПЭС (белые стрелки) в спокойных (а, б) и возмущенных (в, г) условиях

на широте $77,5^\circ$ — 100 м/с. Не обнаружено заметных отличий в характере движения изолиний ПЭС в спокойный день 23.10.2003 и во время бури 29.10.2003. Во время бури наблюдается лишь незначительное (около 30%) увеличение модуля скорости в низких широтах. Таким образом, согласно нашим расчетам перемещение изолиний ПЭС определяется суточным вращением Земли.

Обсуждение результатов

Отклонение от экваториального направления КМ ПИВ, образовавшихся в результате геомагнитных бурь, отмечалось неоднократно. «Закручивание» волнового фронта КМ ПИВ к западу было зарегистрировано при исследовании эффектов магнитной бури 25 сентября 1998 г. по данным цепочки североамериканских станций [4]. При этом направление волнового вектора менялось вдоль по фронту волны от 245° на долготе 16:00 LT до 177° на долготе 19:00 LT. Чем ближе к ночному местно-

му времени, тем более направление распространения соответствовало экваториальному. Кроме того, в [4] сообщалось о регистрации крупномасштабного возмущения ПЭС в южном полушарии, которое перемещалось в целом в сторону экватора, но с существенным (около 30°) отклонением к западу. Эти результаты полностью соответствуют данным, полученным в настоящей работе.

Во всех работах, где приводятся численные значения азимута КМ ПИВ, отмечается отклонение азимута на 10 – 20° к западу [7–10]. Большинство авторов связывают это с влиянием силы Кориолиса на распространение акустико-гравитационных волн в атмосфере. Совсем другой механизм был предложен в [11]. Согласно данной работе «закручивание» фронта КМ ПИВ есть эффект интенсивных плазменных потоков, выброшенных из вращающихся полярных каспов. Вопрос о причинах отклонения перемещения КМ ПИВ от экваториального еще далек от своего разрешения.

Сопоставление рассчитанного нами движения изолиний ПЭС с движением КМ ПИВ (см. рис. 2) показывает, что долготное перемещение максимума ионизации в течение суток может оказывать влияние на зональный перенос волнового возмущения ПЭС. Эффект особенно силен вблизи терминатора, где изменения электронной концентрации наиболее выражены. Зональный перенос проявляется в смещении центра кольцевого фронта КМ ПИВ относительно магнитного полюса. Наблюдается также циклическое перемещение кольцевого возмущения ПИВ как целого вслед за перемещением фоновой ионизации.

Заключение

По данным измерений ПЭС на глобальной сети приемников GPS в период магнитосферной бури 29.10.2003 исследовано влияние суточного перемещения фоновой ионизации на динамические характеристики крупномасштабного волнового возмущения ПЭС. Показано, что скорость и направление распространения возмущения имели ярко выраженную долготную зависимость. Наименьшая скорость (700 м/с) зарегистрирована в ночном полушарии, где значения ПЭС минимальны, а наибольшая (1600 м/с) – на дневной стороне, где значения ПЭС максимальны. Зарегистрирован эффект «закручивания» направления распространения аврорального КМ ПИВ в сторону, противоположную вращению Земли. «Закручивание» обусловлено значительной величиной зональной компоненты скорости КМ ПИВ, направленной на запад. В ночном и дневном секторах направление распространения было близко к меридиональному, а в утреннем и вечернем секторах зональная компонента скорости превышала меридиональную.

Сопоставление с картами GIM показало, что зональный перенос волнового возмущения, возможно, обусловлен долготным перемещением максимума ионизации, связанным с суточным вращением Земли.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории геодинимических исследований КОМПС ГС РАН за предоставление первичных данных Камчатской региональной сети наземных двухчастотных приемников GPS, а также сотрудникам Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC) за пре-

доставление первичных данных глобальной сети наземных двухчастотных приемников GPS.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 05-05-64634 и 06-05-64577), а также интеграционного проекта СО РАН № 3.24.

1. *Афраимович Э.Л., Воейков С.В.* Экспериментальное доказательство существования уединенной внутренней гравитационной волны в атмосфере Земли во время мощной магнитной бури 30.10.2003 г. // Докл. РАН. 2004. Т. 399. № 5. С. 683–686.
2. *Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Zhivet'ev I.V.* The ionosphere response to the sudden storm commencement on October 29, 2003 from GPS networks data // Proc. of URSI GA 2005. GP1G01.1(0246).
3. *Perevalova N.P., Afraimovich E.L., Voeykov S.V., Zhivet'ev I.V.* Generation of annular large-scale traveling ionospheric disturbances in auroral zone // Physics of Auroral Phenomena: Proc. of the 30th Annual Seminar, Apatity, 27 February–2 March 2007. Apatity, Print. Kola Science Centre RAS. 2007 (in press).
4. *Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Palamarchouk K.S., Perevalova N.P., Pirog O.M.* Determining parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays // J. Atmos. and Sol.-Terr. Phys. 2000. V. 62. N 7. P. 553–565.
5. *Klobuchar J.A.* Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users // IEEE Transactions on Aerosp. and Electron. Syst. 1986. V. 23. N 3. P. 325–331.
6. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике. М.: Наука, 1973. 832 с.
7. *Maeda S., Handa S.* Transmission of large-scale TIDs in the ionospheric F2-region // J. Atmos. and Terr. Phys. 1980. V. 42. N 9/10. P. 853–859.
8. *Balthazor R.L., Moffett R.J.* Morphology of large-scale traveling atmospheric disturbances in the polar thermosphere // J. Geophys. Res. A. 1999. V. 104. N 1. P. 15–24.
9. *Hall G.E., Cecile J.-F., MacDougall J.W., St.-Maurice J.P., Moorcroft D.R.* Finding gravity wave source positions using the Super Dual Auroral Radar Network // J. Geophys. Res. A. 1999. V. 104. N 1. P. 67–78.
10. *Шарадзе З.С., Квавадзе Н.Д., Луадзе З.Л., Мосацвили Н.В.* Перемещающиеся ионосферные возмущения и явление F-рассеяния в ионосфере средних широт // Геомагнетизм и аэронавигация. 1986. Т. 26. № 1. С. 144–147.
11. *Foster J.C., Turunen T., Pollari P., Kohl H., Wickwar V.B.* Multi-radar mapping of auroral convection // Adv. Space Res. 1989. V. 9. N 5. P. (5)19–(5)27.

N.P. Perevalova, E.L. Afraimovich, S.V. Voeykov, I.V. Zhivet'ev. Influence of the Earth's diurnal rotation on the propagation of large-scale disturbances in the upper atmosphere.

Influence of the Earth's diurnal rotation on dynamic parameters of large-scale disturbance of Total Electron Content (TEC) was investigated. For this purpose, the TEC data from the international GPS network were used. We have examined TEC disturbance generated in the Northern hemisphere during the strong magnetic storm on October 29, 2003. This disturbance is characterized as a large-scale wave of a solitary type with the annular front shape whose apparent center is located near the geomagnetic pole. It was shown that the velocity and travel direction of the disturbance had a strongly pronounced longitudinal dependence.