

УДК 550.388

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ДВИЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ,  
ВОЗНИКАЮЩИХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ,  
В ГЕОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ**

**В.С. Батозская, Д.С. Трынкова, Н.П. Первалова**

**INVESTIGATION INTO IONOSPHERIC DISTURBANCE PROPAGATION DURING MAGNETIC  
STORMS IN THE GEOMAGNETIC REFERENCE SYSTEM**

**V.S. Batozskaya, D.S. Trynkova, N.P. Perevalova**

Проведен сравнительный анализ характера движения (направление, скорость перемещения) авроральных ионосферных возмущений в географической и геомагнитной системах координат. На основе данных фазовых измерений двухчастотных приемников GPS построены пространственные распределения интенсивности вариаций полного электронного содержания (ПЭС) во время магнитной бури 11 сентября 2005 г. В географической и геомагнитной системах координат выполнена оценка формы волнового фронта, длины волны и скорости перемещения крупномасштабного ионосферного возмущения, образовавшегося вокруг аврорального овала после внезапного начала магнитной бури. Проведено моделирование движения точек относительно географической и геомагнитной систем координат в различных долготных секторах. Показано, что в географической системе координат скорость точки, движущейся вдоль геомагнитного меридиана, будет иметь две компоненты: вдоль географического меридиана (меридиональная составляющая,  $V_T$ ) и вдоль географической параллели (зональная составляющая,  $V_\phi$ ). На геомагнитных долготах  $0^\circ$  и  $180^\circ$   $V_\phi = 0$ , а на геомагнитных долготах  $90^\circ$  и  $270^\circ$   $V_\phi$  принимает максимальное значение. Кроме того,  $V_\phi$  направлена на восток на геомагнитных долготах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и на запад на геомагнитных долготах от  $180^\circ$  до  $360^\circ$ . Величина  $V_\phi$  уменьшается от полярных широт к экватору. Значение меридиональной компоненты  $V_T$  возрастает с уменьшением широты.

We compared auroral ionospheric disturbance propagation in the geographical and geomagnetic reference systems. Phase measurements of the total electron content (TEC) by double frequency GPS receivers were used to map TEC variation during the magnetic storm on 11 September 2005. In the geographical and geomagnetic reference systems, we estimated wavefront shape, wave length and propagation velocity of large-scale ionospheric disturbance generated around the auroral oval after the sudden storm commencement. Point motion in the geographical and geomagnetic reference systems for different longitudinal sectors was simulated. It is shown that if the point travels along the geomagnetic meridian, its velocity in the geographical reference system has two projections: along the geographic meridian (meridional component,  $V_T$ ) and along the geographical parallel (zonal component,  $V_\phi$ ).  $V_\phi$  is equal to 0 at the geomagnetic longitudes of  $0^\circ$  and  $180^\circ$ .  $V_\phi$  peaks at the geomagnetic longitudes of  $90^\circ$  and  $270^\circ$ . Within the geomagnetic longitudes of  $0-180^\circ$   $V_\phi$  is eastward directed, and within the geomagnetic longitudes of  $180-360^\circ$   $V_\phi$  is westward directed. The  $V_\phi$  value decreases and the  $V_T$  value increases towards the equatorial latitudes.

### 1. Введение

При изучении отклика ионосферы на магнитные бури особое внимание уделяется крупномасштабным перемещающимся ионосферным возмущениям (КМ ПИВ) с характерными временными периодами 1–2 ч и длинами волн 1000–2000 км [1]. Считается, что области генерации КМ ПИВ находятся в авроральных зонах Северного или Южного полушарий. Вариации плотности тока в авроральной электроосфере во время магнитных бурь способны эффективно генерировать в ионосфере волновые возмущения, которые распространяются из высоких широт на средние и низкие с фазовыми скоростями 600–900 м/с. Широко разветвленная сеть приемников GPS позволяет восстановить пространственную структуру и временную динамику КМ ПИВ, возникающих во время магнитосферных бурь в авроральной зоне.

Целью настоящей работы является сравнительный анализ характера движения (направления, скорости перемещения) авроральных ионосферных возмущений в географической и геомагнитной системах координат. Для анализа использовались данные измерений вариаций полного электронного содержания (ПЭС) на мировой сети приемников спутниковой навигационной системы GPS.

### 2. Моделирование движения точек в геомагнитной и географической системах координат

В ионосферных исследованиях чаще всего ис-

пользуют географическую и геомагнитную системы координат. Для того чтобы выяснить, как движется в географической системе координат точка, имеющая определенные составляющие скорости по широте и долготе в геомагнитной системе координат, было проведено моделирование. Предполагалось, что точка двигалась вдоль геомагнитного меридиана со скоростью  $V_T=600$  м/с. Выбранное значение  $V_T$  соответствует средней скорости перемещения ионосферных возмущений во время магнитных бурь по данным работ [2, 3]. Проведено моделирование движения пяти точек вдоль меридианов со значениями долготы  $15^\circ$ ,  $105^\circ$ ,  $165^\circ$ ,  $240^\circ$ ,  $285^\circ$ . Последовательные положения точек, двигавшихся вдоль геомагнитных меридианов, показаны на рис. 1. Расстояние между последовательными положениями составляет  $5^\circ$ . При скорости  $V_T=600$  м/с точка проходит это расстояние примерно за 15 мин.

Полученное расположение тех же точек в географической системе координат приведено на рис. 2. Как показал расчет, в географической системе координат скорость точки имеет две компоненты: вдоль географического меридиана (меридиональная составляющая,  $V_T$ ) и вдоль географической параллели (зональная составляющая,  $V_\phi$ ). Меридиональная составляющая отражает изменение широты движущейся точки, а зональная составляющая – изменение ее долготы. В таблице приведены рассчитанные

Модельные значения компонент скорости.

$lat_M, \circ$	$lon_M, \circ$	$lat_G, \circ$	$lon_G, \circ$	$\Delta lat, \circ$	$\Delta lon, \circ$	$\Delta lat, км$	$\Delta lon, км$	$V_r, м/с$	$V_\phi, м/с$	$V, м/с$
80	15	68.68	298.10	-4.95	1.60	-550.33	64.75	-611.5	72.0	615.7
75	15	63.72	299.70							
35	15	23.84	304.40	-4.99	0.29	-554.11	30.30	-615.7	33.7	616.6
30	15	18.85	304.70							
80	105	76.90	-21.23	-3.18	15.32	-353.97	386.0	-393.3	428.9	581.9
75	105	73.71	-5.91							
35	105	37.18	27.73	-4.86	1.42	-539.57	126.59	-599.5	140.7	615.8
30	105	32.32	29.16							
75	165	85.12	59.03	-4.47	18.97	-497.16	179.56	-552.4	199.5	587.3
70	165	80.64	78.01							
35	165	46.03	93.21	-4.98	0.49	-553.66	37.97	-615.2	42.2	616.6
30	165	41.05	93.70							
80	240	79.21	237.49	-2.727	-20.143	-302.69	-419.08	-336.3	-465.7	574.4
75	240	76.49	217.35							
35	240	40.07	178.97	-4.88	-1.378	-541.68	-117.26	-601.9	-130.3	615.8
30	240	35.19	177.59							
80	285	72.95	256.09	-4.019	-9.168	-446.10	-298.85	-495.7	-332.1	596.6
75	285	68.93	246.92							
35	285	31.31	223.151	-4.877	-1.257	-541.34	-119.4	-601.5	-132.7	616.0
30	285	26.44	221.894							

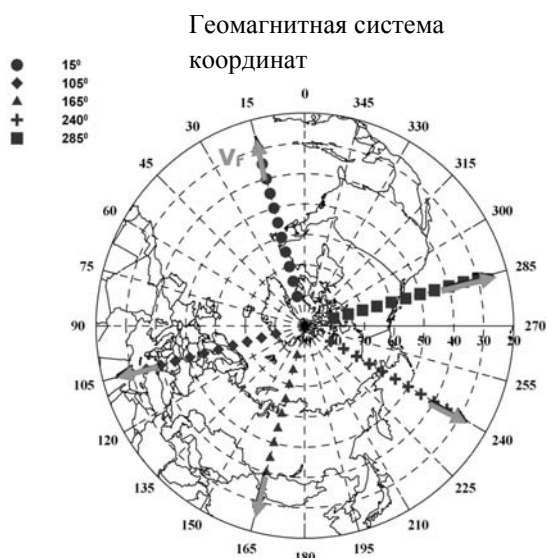


Рис. 1. Модель движения точек вдоль пяти геомагнитных меридианов (15°, 105°, 165°, 240°, 285°) в геомагнитной системе координат.

значения компонент скорости  $V_r$  и  $V_\phi$  для двух смещений (от 80° N до 75° N и от 35° N до 30° N) пяти точек, движущихся вдоль геомагнитных меридианов 15°, 105°, 165°, 240°, 285°. В таблице указаны:  $lat_M, lon_M$  – геомагнитная широта и долгота точки соответственно;  $lat_G, lon_G$  – географическая широта и долгота точки соответственно;  $\Delta lat, \Delta lon$  – изменение географической широты и долготы между последовательными положениями точки;  $V_r, V_\phi$  – меридиональная и зональная компоненты скорости в географической системе координат;  $V$  – модуль скорости движения точки в географической системе координат.

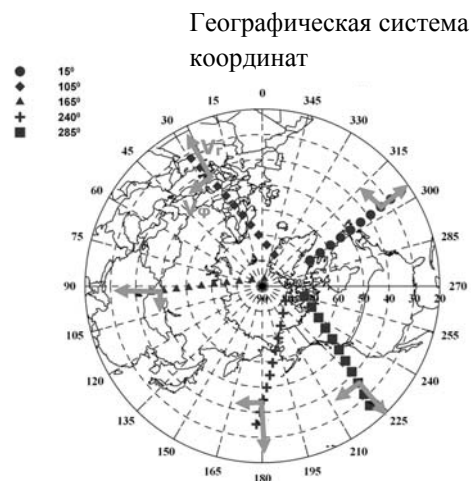


Рис. 2. Перемещение точек, двигающихся вдоль пяти геомагнитных меридианов (15°, 105°, 165°, 240°, 285°), в географической системе координат.

Северный географический полюс находится на нулевом геомагнитном меридиане, следовательно, на меридианах с геомагнитной долготой 0° и 180° зональная компонента скорости  $V_\phi$  в географических координатах должна быть равна нулю, а на меридианах с геомагнитной долготой 90° и 270°, наоборот, принимать свое максимальное значение. Это прослеживается в данных, приведенных в таблице. На геомагнитной долготе 15° (близкой к 0°) зональная компонента скорости  $V_\phi$  существенно меньше, чем на геомагнитной долготе 105° (близкой к 90°). Кроме того, меридиональная компонента скорости  $V_r$  на геомагнитной долготе 15° очень слабо меняется с широтой и близка к меридиональной скорости в геомагнитной системе координат. На других долготах величина ме-

ридональной компоненты  $V_r$  имеет тенденцию возрастать с уменьшением широты от ~400 до ~600 м/с.

На геомагнитных долготах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  зональная компонента скорости  $V_\phi$  направлена на восток (положительные значения  $V_\phi$  в таблице). На геомагнитных долготах от  $180^\circ$  до  $360^\circ$  зональная компонента скорости направлена на запад (отрицательные значения  $V_\phi$  в таблице). Величина зональной компоненты скорости  $V_\phi$  уменьшается от полярных широт к экватору.

Если КМ ПИВ, возникающие в авроральной зоне после внезапного начала магнитных бурь, перемещаются вдоль геомагнитных меридианов, можно ожидать, что скорость распространения этих возмущений, рассчитанная в географической системе координат, будет обладать описанными выше особенностями.

### 3. Методы обработки данных GPS

При изучении отклика ионосферы на магнитные бури с помощью GPS исходными данными являются ряды  $I_0(t)$  вариаций «наклонного» ПЭС, а также ряды значений азимута  $\alpha_S(t)$  и угла места  $\theta_S(t)$  лучей «приемник–спутник GPS» [1]. Используются доступные данные GPS-приемников, входящих в международную сеть и размещенных в пяти секторах Северного полушария: западно-американском (А), восточно-американском (В), европейском (С), азиатском (D) и дальневосточном (Е) (рис. 3). Для исследований отбираются непрерывные ряды  $I(t)$  длительностью не менее трех часов. По известным значениям  $\alpha_S(t)$ ,  $\theta_S(t)$  рассчитываются координаты ионосферных точек (точек пересечения лучей «приемник–спутник» со сферой, расположенной на высоте  $h_{\max}$  главного максимума ионизации). Как правило, полагают  $h_{\max}=300$  км [1]. Для нормировки амплитуды возмущений ПЭС исходные ряды «наклонного» ПЭС  $I_0(t)$  преобразуются в эквивалентное «вертикальное» значение  $I(t)$ . Ряды  $I(t)$  подвергаются сглаживанию с временным окном 20 мин (для удаления высокочастотных колебаний) и удалению линейного тренда с временным окном 60 мин. Таким образом, ряды ПЭС отфильтровываются в диапазоне периодов 20–60 мин для выделения крупномасштабных возмущений.

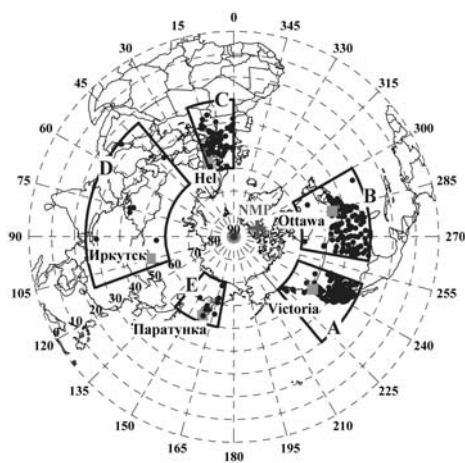


Рис. 3. Геометрия GPS-измерений во время магнитной бури 11 сентября 2005 г. Точками обозначено положение станций GPS, квадратами – магнитных обсерваторий; NMP – северный магнитный полюс.

Для изучения глобальной картины отклика ионосферы на внезапное начало магнитной бури (Storm Sudden Commencement, SSC) в ИСЗФ СО РАН предложен специальный метод картирования возмущений ПЭС. С этой целью в каждом отфильтрованном ряду ПЭС выделяются минимумы и максимумы вариаций ПЭС с амплитудой выше некоторого заданного уровня  $A_0$  (как правило, выбирают  $A_0=1$  TECU). Определяется время их регистрации ( $t_{\min}$ ,  $t_{\max}$ ) и координаты ионосферных точек, где они были зарегистрированы. Затем на карту наносятся положения ионосферных точек, в которых зафиксированы минимумы и максимумы вариаций ПЭС. Таким образом, получают картину глобального распределения интенсивности вариаций ПЭС. Анализ этого распределения в различные моменты времени позволяет не только оценить форму волнового фронта возмущений ПЭС в авроральной зоне, но и проследить их динамику.

### 4. Возмущения ПЭС во время магнитной бури 11 сентября 2005 г.

Буря 11 сентября 2005 г. имела выраженное внезапное начало SSC в 01:14 UT. После SSC по данным измерений ПЭС на глобальной сети приемников GPS в пяти долготных секторах Северного полушария (рис. 3) зафиксировано волнообразное возмущение ПЭС с периодом 40–60 мин. Средняя амплитуда возмущения составляла 1.3 TECU. Возмущение перемещалось в сторону экватора [3].

Для изучения пространственной структуры и динамики КМ ПИВ 11.09.2005 с помощью описанного выше метода картирования построены пространственные распределения интенсивности вариаций ПЭС в различные моменты времени в географической и геомагнитной системах координат. Интенсивность бури 11 сентября была не очень высокой, поэтому пороговое значение для амплитуды ПЭС было выбрано равным 0.7 TECU.

На рис. 4 представлено пространственное распределение минимумов и максимумов вариаций ПЭС

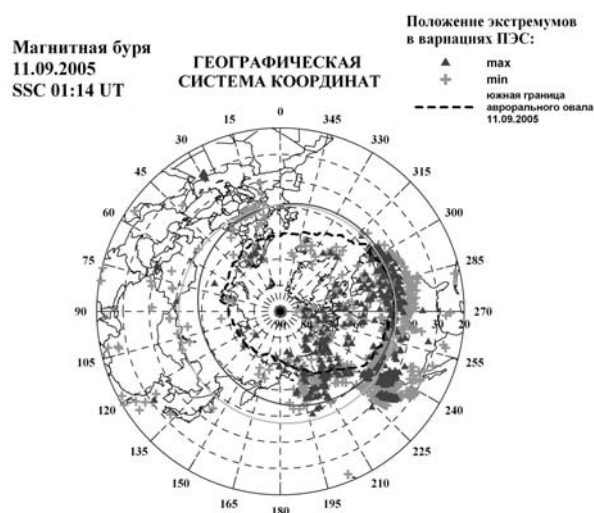


Рис. 4. Пространственное распределение интенсивности вариаций ПЭС 11 сентября 2005 г. для 04:00 UT в полярной географической системе координат. Пунктиром

отмечена южная граница аврорального овала в 01:52 UT. 11 сентября 2005 г. для 04:00 UT в полярной географической системе координат. Пунктиром отмечена южная граница аврорального овала в 01:52 UT. Наблюдаются два гребня волны ионосферного возмущения. Положение волнового фронта КМ ПИВ (толстые сплошные линии на рис. 4) получено аппроксимацией распределения максимумов и минимумов ПЭС эллипсом. По расстоянию между гребнями была определена длина волны КМ ПИВ, которая оказалась равной  $L \approx 980$  км и  $L \approx 1085$  км, соответственно для минимумов и максимумов. По смещению гребня в разные моменты времени можно определить скорость перемещения КМ ПИВ. Оценка показала, что  $V \approx 83$  м/с для минимумов и  $V \approx 67$  м/с для максимумов.

На рис. 5 показано распределение минимумов и максимумов интенсивности вариаций ПЭС 11 сентября 2005 г. для 04:00 UT в полярной геомагнитной системе координат. Положение волнового фронта КМ ПИВ, полученное аппроксимацией распределения максимумов и минимумов ПЭС эллипсом, показано толстыми сплошными линиями. Рассчитанная длина волны КМ ПИВ составила  $L \approx 996$  км, а скорость перемещения КМ ПИВ  $V \approx 91$  м/с (расчет проводился по распределениям минимумов ПЭС).

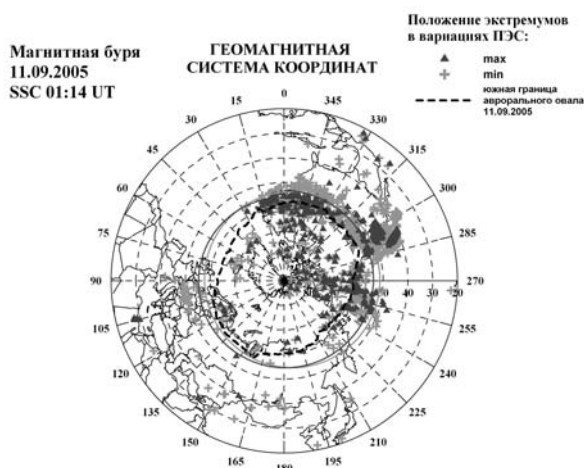


Рис. 5. Пространственное распределение интенсивности вариаций ПЭС 11 сентября 2005 г. для 04:00 UT в полярной геомагнитной системе координат. Пунктиром отмечена южная граница аврорального овала в 01:52 UT.

Сравнивая полученные данные, можно сделать вывод, что длина волны и скорость перемещения КМ ПИВ в полярной географической и геомагнитной системах координат практически совпадают.

## 5. Выводы

Проведено моделирование движения точек в геомагнитной и географической системах координат. Показано, что в географической системе координат точка,двигающаяся вдоль геомагнитного меридиана, имеет две компоненты скорости: меридиональную ( $V_r$ ) и зональную ( $V_\phi$ ). Величина  $V_\phi$  уменьшается от полярных широт к экватору. На меридианах с геомагнитной долготой  $0^\circ$  и  $180^\circ$   $V_\phi = 0$ . На геомагнитных долготах от  $0^\circ$  до  $180^\circ$   $V_\phi$  направлена на восток, а на геомагнитных долготах от  $180^\circ$  до  $360^\circ$  – на запад.

Построены пространственные распределения интенсивности вариаций ПЭС в географической и геомагнитной системах координат во время магнитной бури 11 сентября 2005 г. Оценка параметров КМ ПИВ в географической системе координат показала, что длина волны  $L \approx 980$  км для минимумов и  $L \approx 1085$  км для максимумов ПЭС; скорость перемещения  $V \approx 83$  м/с для минимумов и  $V \approx 67$  м/с для максимумов ПЭС. Рассчитаны значения длины волны ( $L \approx 996$  км) и скорости перемещения ( $V \approx 91$  м/с) КМ ПИВ в геомагнитной системе координат.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айфраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ СО РАН, 2006. 480 с.
2. Первалова Н.П., Афраймович Э.Л., Воейков С.В., Живетьев И.В. Влияние суточного вращения Земли на распространение крупномасштабных возмущений в верхней атмосфере // Оптика атмосферы и океана. 2007. Т. 20, № 12. С. 1059–1063.
3. Первалова Н.П., Воейков С.В. Кольцевые ионосферные возмущения в авроральной зоне по данным глобальной сети приемников GPS // XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» РРВ-22, Труды симпозиума. Т. I. Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. С. 93–96.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск  
Иркутский государственный университет, Иркутск