

ДИНАМИКА КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АВРОРАЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ. РЕАКЦИЯ НА ВНЕЗАПНОЕ НАЧАЛО МАГНИТНОЙ БУРИ 29 ОКТЯБРЯ 2003 г.

¹И.В. Живетьев, ²Э.Л. Афраймович, ²В.В. Кирушкин

THE DYNAMICS OF LARGE-SCALE TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES OF AURORAL ORIGIN. RESPONSE ON THE SUDDEN STORM COMMENCEMENT OF THE MAGNETIC STORM ON OCTOBER 29, 2003.

¹I.V. Zhivet'ev, ²E.L. Afraimovich, ²V.V. Kirushkin

Для анализа характеристик крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМПИВ) во время большой магнитной бури 29 октября 2003 г. впервые использованы пять меридиональных цепочек GPS-станций, находящихся в различных областях Северного полушария. Показано, что момент начала возмущения полного электронного содержания запаздывает от момента внезапного начала бури на 10–30 мин в зависимости от региона регистрации. Возмущения носят характер крупномасштабных волн уединенного типа с длительностью порядка 1 ч, которые распространяются в экваториальном направлении от источника, расположенного в авроральной зоне, со скоростью от 700 до 1500 м/с.

For the analysis of large-scale traveling ionosphere disturbances (LSTIDs) during the large magnetic storm on 29th October 2003 are for the first time used four longitudinal chains of GPS stations that are situated in various regions of northern hemisphere. It is showed that the starting moment of the total electron content disturbance is late to the moment of the sudden storm commencing (SSC) of about 10–30 min depending on the registration region. Such disturbances are characterized as large-scale waves of a solitary type with the duration of about 1 hour, which are traveling equatorward from the source located in auroral zone with the velocity from 700 to 1500 m/sec.

Введение

Изучению крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений (КМПИВ) с характерным временным периодом 1–2 ч и длиной волны 1000–2000 км посвящено много работ, обзор которых можно найти в [7–9]. Считается установленным, что КМПИВ являются проявлением акустико-гравитационных волн (АГВ), области генерации которых находятся в авроральных зонах Северного и Южного полушарий. Однако до сих пор нет достаточно достоверных экспериментальных данных, позволяющих построить модель КМПИВ. Неудовлетворительны результаты измерений модуля скорости. Отдельные исследователи приводят заметно отличающиеся значения скорости перемещения КМПИВ: от 300 м/с до тысяч м/с. Данных о направлениях перемещения КМПИВ на средних широтах в литературе существенно меньше, чем данных о скорости. Считается, что в основном они движутся в сторону экватора. Между тем в ряде работ обнаружено отклонение направления перемещения КМПИВ от экваториального [4, 6–9]. Установлена заметная разница в направлении распространения КМПИВ: в ночных условиях преобладает юго-восточное направление ($169 \pm 20^\circ$), а в дневных – юго-западное ($198 \pm 25^\circ$) [4]. Таким образом, для формирования наиболее полной картины динамики КМПИВ необходимо большее количество статистических данных.

Новые возможности для детального изучения основных свойств КМПИВ предоставляет глобальная навигационная система GPS и созданная на ее основе мировая сеть двухчастотных многоканальных приемников GPS.

В ИСЗФ СО РАН разработана технология глобального детектирования и мониторинга возмущений полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере на основе обработки данных глобальной сети приемников навигационной системы GPS. Эта сеть исполь-

зуется как большая фазированная антенная решетка, или глобальный GPS-детектор, отличающийся от ранее известных средств радиозондирования ионосферы непрерывностью наблюдений, высокой чувствительностью и пространственно-временным разрешением, а также технологичностью обработки данных.

Целью настоящей работы является исследование основных свойств КМПИВ аврорального происхождения по данным GPS-станций во время большой магнитной бури 29 октября 2003 г.

Общие сведения об эксперименте

Одна из сильнейших магнитных бурь произошла 29 октября 2003 г. (момент SSC соответствует 06:11 UT, максимальное значение геомагнитных индексов составило: $D_{st} = -345$ нТл, $K_p = 9$).

С целью исследования динамики КМПИВ из всего перечня GPS-станций, данные которых предоставляются в Internet, были сформированы четыре «меридиональных цепочки»: европейская, азиатская, западно-американская и восточно-американская. Кроме того, в работе использованы данные камчатской региональной сети станций GPS [3]. Полученные пять цепочек GPS-станций расположены таким образом, что на момент SSC некоторые цепочки оказались в ночном, а другие в дневном секторах земного шара.

Геометрия эксперимента для 29 октября 2003 г. приведена на рис. 1. Точками отмечены GPS-станции, звездочками показано положение магнитовариационных станций, данные которых использовались для контроля геомагнитной обстановки и временной привязки. Вариации H -компоненты магнитного поля для этих станций приведены на рис. 2, где вертикальной пунктирной чертой отмечен момент SSC. На рис. 1 секторами А, В, С, D, Е отмечено положение цепочек GPS-станций.

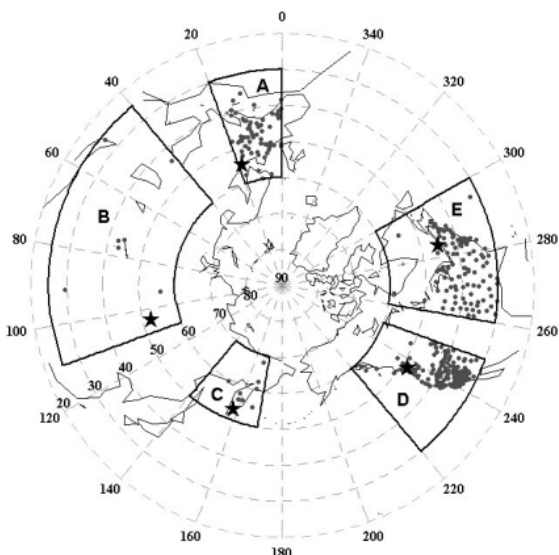


Рис. 1. Геометрия эксперимента во время большой магнитной бури 29 октября 2003 г. Точками обозначены GPS-станции, звездами - магнитовариационные станции. Области А, В, С, D, Е - секторы наблюдения КМПИБ (цепочки GPS-станций): европейский, азиатский, камчатский, западно- и восточно-американский соответственно.

Большая магнитная буря 29 октября 2003 г.

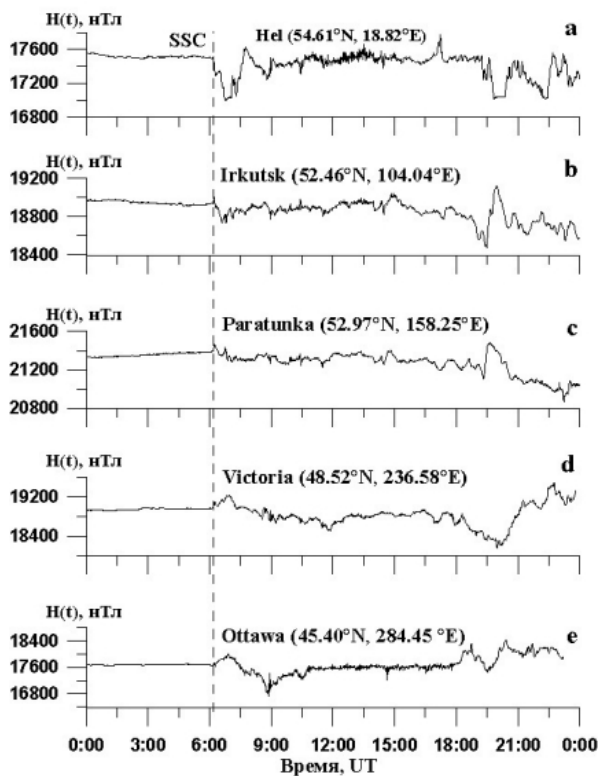


Рис. 2. Вариации Н-компоненты магнитного поля на станциях: а – Hel (54.61° N, 18.82° E); б – Иркутск (52.46° N, 104.04° E); в – Паратунка (52.97° N, 158.25° E); д – Victoria (48.52° N, 236.58° E); е – Ottawa (45.40° N, 284.45° E). Вертикальной пунктирной линией обозначен момент SSC.

Используемый в настоящей работе метод первичной обработки данных подробно описан в [6]. Относительное приращение «наклонного» ПЭС I определяется на основе измерений фазового пути двухчастотного навигационного радиосигнала GPS:

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

где $f_1 = 1575.42$ МГц, $f_2 = 1227.6$ МГц, (λ_1, λ_2) – частоты (длины волн) навигационных радиосигналов GPS; $L_1 \lambda_1$ и $L_2 \lambda_2$ – приращения фазового пути радиосигналов, обусловленные их распространением в ионосфере (L_1, L_2 – число полных оборотов фазы); const – некоторый неизвестный начальный фазовый путь; nL – ошибка в определении фазового пути.

Метод исследования и результаты

Эксперимент проводился в несколько этапов. Сначала ряды $I(t)$ измерений ПЭС подвергались процедуре удаления тренда с временным окном 60 мин. Из сформированных в результате этого рядов приращений ПЭС $dI(t)$ выбирались данные высокого качества, полученные для ИСЗ GPS, траектория которого характеризовалась наилучшими ракурсами условиями для регистрации КМПИБ.

Затем с использованием разработанного в [6] метода определялись скорость V и азимут α распространения КМПИБ. Метод основан на расчете пространственных и временных градиентов электронной концентрации по измерениям ПЭС на трех разнесенных в пространстве станциях GPS (GPS-решетке). Для каждого региона использовались все возможные наборы (до 343) решеток, базы которых не превышали половину длины волны КМПИБ. Результаты измерения скорости и азимута распространения КМПИБ в каждом секторе, а также СКО этих величин приведены в таблице.

На рис. 3 представлены зависимости формы вариаций приращений ПЭС $dI(t)$ от удаления D точки регистрации КМПИБ (GPS-станции) от некоторой условно выбранной точки отсчета. В каждом секторе наблюдения удаление рассчитывалось вдоль волнового вектора распространения КМПИБ. Вариации $dI(t)$ включены в функциональную зависимость $D(t)$. Масштаб $dI(t)$ в единицах TECU (10^{16} эл./м²) дан отдельным вертикальным отрезком. За момент регистрации КМПИБ принят момент t_{min} регистрации минимального значения вариаций $dI(t)$. Из рис. 3 видно, что вариации ПЭС подобны по форме (представляют собой уединенную волну с характерным периодом 30–60 мин [1, 2, 5]), но сдвинуты друг относительно друга по времени.

К сожалению, из-за сбоя измерений, обычно сопутствующих мощным магнитным бурям, часть GPS-данных оказалась непригодной для анализа, этим объясняется наличие пробелов в регистрации вариаций $dI(t)$ на рис. 3.

Результаты вычисления скорости и азимута распространения КМПИБ в каждом секторе наблюдения

Сектор	Скорость V_h , м/с	Скорость V_h , СКО	Азимут α , град.	Азимут α , СКО	Число GPS-решеток	Скорость V_a , м/с
A	1508	539.6	259.6	46.2	6	1738
B	1641.2	396.6	194	93.4	6	2419
C	1013.2	350.3	234.8	31.6	55	1085
D	1090.2	364.3	208	6.6	343	603
E	684.2	309.6	193.6	29.9	57	703

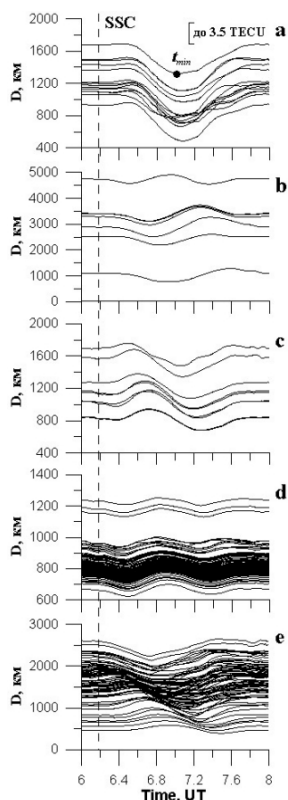


Рис. 3 Зависимость формы временных вариаций приращений ПЭС от удаления D точки регистрации КМПИБ (GPS-станции) от некоторой условно выбранной точки отсчета для различных секторов наблюдения: a – сектор А; b – сектор В; c – сектор С; d – сектор D; e – сектор E). Вертикальной пунктирной линией обозначен момент SSC.

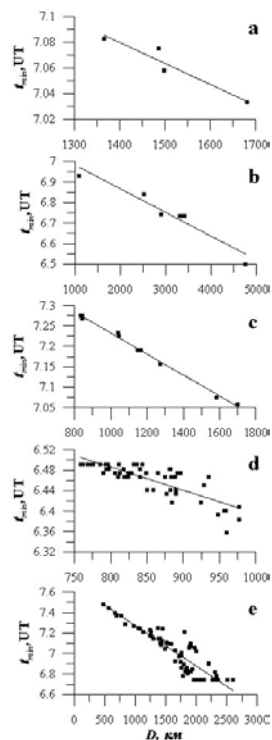


Рис. 4. Зависимость $t_{\min}(D)$ времени регистрации КМПИБ от удаления D регистрирующей GPS-станции от некоторой условно выбранной точки отсчета для различных секторов наблюдения: a – сектор А; b – сектор В; c – сектор С; d – сектор D; e – сектор E) Сплошные линии - аппроксимирующие прямые.

На рис. 4 для каждого сектора наблюдения точками представлена зависимость $t_{\min}(D)$ времени регистрации КМПИБ от удаления D регистрирующей GPS-станции от некоторой условно выбранной точки отсчета. По аналогии с рис.3, удаление рассчитывалось вдоль волнового вектора распространения КМПИБ. Сплошной линией показана линейная зависимость, аппроксимирующая $t_{\min}(D)$. Соответствующие значения скорости перемещения V_a , вычисленные по наклону аппроксимирующих прямых, приведены в таблице. Как можно видеть из таблицы, эти значения близки к значениям V , определенным с помощью GPS-решеток.

Обсуждение результатов

Совместный анализ временных зависимостей приращений ПЭС $dI(t)$ (рис. 3) и вариаций магнитного поля земли $H(t)$ на магнитовариационных станциях в соответствующих секторах наблюдения (рис. 2), показал, что момент начала возмущения ПЭС запаздывает от момента SSC на 10–30 мин в зависимости от региона регистрации КМПИБ. Регистрируемые возмущения носят характер крупномасштабных волн уединенного типа с длительностью порядка 1 ч.

Наибольшим значением скорости (до 1500 м/с) и амплитуды (до 3 TECU) характеризуются КМПИБ, зарегистрированные в утреннем, дневном и вечернем секторах Северного полушария (рис. 3, сектор А, сектор В и сектор С). Ночные секторы (рис. 3, сектор D, сектор E) характеризуются несколько меньшими значениями тех же величин (до 1000 м/с и до 1 TECU). При этом для дневных и ночных секторов не замечено большой разницы в значениях азимута распространения КМПИБ: во всех секторах возмущения распространяются в экваториальном направлении от источника, расположенного в авроральной зоне.

Открытым остается вопрос о влиянии особенностей глобального распространения термосферного ветра во время геомагнитных возмущений на скорость и направление перемещения КМПИБ [4].

Эта работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 03-05-64100 и 05-05-64634), интеграционного проекта СО РАН–ДВО РАН N 181, при финансовой поддержке Министерства промышленности, науки и технологий РФ, а также гранта N НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации. Мы благодарим сотрудников лаборатории геодинамических исследований КОМС-П ГС РАН за предоставление используемых в настоящей статье первичных данных Камчатской региональной сети наземных двухчастотных приемников GPS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афраймович Э.Л., Воейков С.В. Экспериментальное доказательство существования уединенной внутренней гравитационной волны в атмосфере Земли во время мощной магнитной бури 30 октября 2003 г. // Доклады Академии Наук. 2004. Т. 399, № 5. С. 683–686.

2. Деминова Г.Ф., Деминов М.Г., Ерухимов Л.М. и др. Об уединенной внутренней гравитационной волне в области F ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1982. Т. 22, № 2. С. 211–215.
3. Левин В.Е., Гордеев Е.И., Бахтиаров В.Ф., Касахара М. Предварительные результаты GPS-мониторинга на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 3–11.
4. Леонович Л.А., Афраймович Э.Л., Портнягина О.Ю. Скорости и направления перемещения крупномасштабных возмущений полного электронного содержания во время больших магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 2. С. 166–173.
5. Савина О.Н., Ерухимов Л.М. О возможности существования уединенной внутренней гравитационной волны в безграничной изотермической атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 1981. Т. 21, № 4. С. 679–682.
6. Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Leonovich L.A. et al. Determining parameters of large-scale traveling ionospheric disturbances of auroral origin using GPS-arrays // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2000. V. 62, N 7. P. 553–565.
7. Haykowitz L.A., Hunsucker R.D. A simultaneous observation of large-scale periodic TIDs in both hemispheres following an onset of auroral disturbances // Planet. Space Sci. 1987. V. 35, N 6. P. 785–791.
8. Hocke K., Schlegel K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995 // Ann. Geophys. 1996. V. 14. P. 917–940.
9. Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere. A review // Geophys. 1982. V. 20. P. 293–315.

¹*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатская обл., Паратунка*

²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*