

ГЛАВНЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ПРОВАЛ ПО ДАННЫМ GPS И ИОНОСФЕРНОЙ СТАНЦИИ ЯКУТСК 26 ДЕКАБРЯ 2002 г.

¹Э.Л. Афраимович, ¹О.М. Пирог, ²Е.Д. Бондарь

THE MAIN IONOSPHERIC TROUGH AS DEDUCED FROM DATA OF THE GPS AND YAKUTSK IONOSPHERIC STATION ON 26 DECEMBER, 2005

¹E.L. Afraimovich, ¹O.M. Pirog, ²E.D. Bondar

Приведены результаты исследования главного ионосферного провала (ГИП) при слабозмущенных геомагнитных условиях 26 декабря 2002 г. Используются данные четырех радиотрасс «приемник–спутник GPS» и ионосферной станции Якутск. Анализ выявил четкий эффект уменьшения полного электронного содержания для всех радиотрасс в момент прохождения ГИП. Ионосферная станция Якутск также показывает уменьшение электронной концентрации в максимуме слоя F2, соответствующее показаниям GPS во время пролета над ней. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с данными проведенных ранее измерений.

Results of studying the main ionospheric trough (MIT) under weak disturbed geomagnetic conditions on December 26, 2002, are presented. Data of four radio paths «receiver–GPS» satellite and Yakutsk ionospheric station, located along $\sim 125^\circ\text{E}$, have been used. An analysis has indicated that the total electron content pronouncedly decreased during the passage of MIT on all radio paths. It has been shown that the electron density at the F2 layer maximum also decreased in accordance with the corresponding indications of the GPS satellites above the ionospheric stations. The obtained results are in good agreement with the previous measurements.

Введение

Исследованию динамики и механизмов формирования главного ионосферного провала (ГИП) посвящено большое количество работ [1]. Интерес к этой проблеме обусловлен необычностью свойств и особым динамическим режимом ионосферной плазмы в пределах ГИП. Исследование ГИП имеет и практическую ценность для уточнения методики расчета радиотрасс на широтах субавроральной зоны, где наиболее часты и длительны срывы коротковолновой радиосвязи.

Впервые регулярное понижение электронной концентрации на высотах максимума области F в ее широтном распределении было обнаружено при зондировании сверху с ИСЗ «АЛУЭТТ-1» [2]. Основные морфологические характеристики ГИП были получены из спутниковых данных и с помощью наземных измерений станций некогерентного рассеяния радиоволн, станций вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы. Однако до сих пор нет достаточной ясности в понимании основных свойств ГИП (глубина, ширина провала, скорость перемещения минимума на различных стадиях развития геомагнитных бурь) и надежных экспериментальных оценок его параметров. Обзор некоторых из результатов исследования ГИП приведен в [1].

Существенным дополнением в экспериментальных исследованиях структуры и динамики ионосферы является использование возможностей радиозондирования ионосферы с помощью сигналов глобальной навигационной системы GPS на основе использования данных широко разветвленных сетей станций GPS. По состоянию на начало 2005 г. в мире существует более 2500 наземных станций, первичные данные которых с 30-секундным разрешением в стандартном формате RINEX централизованно поставляются на сервер SOPAC (<ftp://lox.ucsd.edu>), что предоставляет совершенно новые возможности дистанционной диагностики ионосферы [3]. Пересчитанные в значения полного

электронного содержания (ПЭС) данные RINEX широко используются в настоящее время для изучения регулярной ионосферы и возмущений естественного и техногенного происхождения.

В работе [4] представлена новая технология построения глобальных карт абсолютного «вертикального» значения ПЭС по данным международной сети GPS (технология Global Ionospheric Maps, GIM). Результаты обработки с временным разрешением 2 ч в стандартном формате IONEX представлены на сайте <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>. Цель данной работы – на примере ГИП, наблюдаемого в слабозмущенных геомагнитных условиях 26 декабря 2002 г. в районе Якутска, изучить новые возможности одновременных наблюдений ГИП с использованием данных ионосферных станций, а также RINEX- и IONEX-данных станций GPS.

Геометрия и геофизические условия эксперимента

Рисунок 1 иллюстрирует геометрию эксперимента 26 декабря 2002 г. Жирной точкой отмечено положение

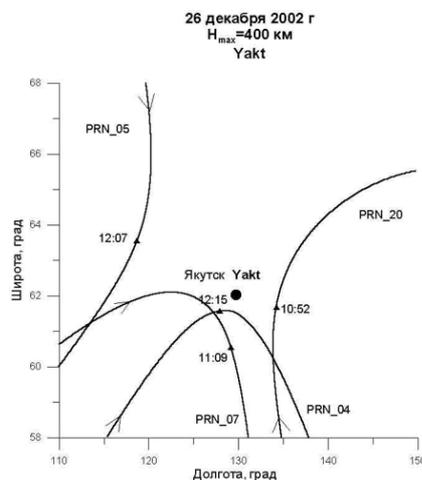


Рис. 1. Геометрия эксперимента.

ионосферной ст. Якутск, которое совпадает с положением ст. GPS Yak1. Для интервала времени 10–13 UT на ст. GPS Yak1 наблюдались четыре спутника (PRN04, PRN05, PRN07 и PRN20). Траектории подыоносферных точек для высоты 400 км показаны кривыми. Треугольники на траекториях – положения подыоносферных точек в момент достижения минимального значения ПЭС $I(t)$. Цифры возле треугольников – соответствующие моменты времени. Данный период характеризовался слабозмущенными геомагнитными условиями. Вариации D_{st} -индекса геомагнитной возмущенности колебались от -32 до -49 нТл, значения K_p менялись от -2 до $+3$ (<http://www.wdc.rl.ac.uk/cgi-bin/wdccl/secure/wdcdata>).

Определение ГИП по данным ионосферной станции Якутск

Значения электронной концентрации в регулярном слое F2 со временем уменьшаются (рис. 2, толстая кривая), в то же время растут высота максимума и действующая высота слоя F2 (тонкая и штриховая кривые соответственно). С 10:30 UT (~ 01:30 LT) провал располагается примерно над Якутском, о чем свидетельствует малое значение критической частоты слоя F2 ($f_0F2 \sim 2$ МГц).

Определение ГИП по данным GPS

Анализ RINEX-файлов. Исследование проводилось для четырех радиотрасс «станция GPS-спутник», расположенных в восточном секторе (прямоугольник $58-68^\circ$ N, $110-150^\circ$ E). Процедура обработки данных описана в работах [5, 6]. В данной работе все результаты получены для углов места $\Theta(t)$ больше 15° .

На рис. 3 представлены вариации ПЭС $I(t)$, полученные на станции GPS Yak1 для спутников PRN04 (а), PRN05 (б), PRN07 (в) и PRN20 (г), на графике – толстые кривые. Тонкими кривыми на панелях показаны вариации f_0F2 для ионосферной станции Якутск. Времена минимумов $I(t)$ указаны на рис. 1. Координаты подыоносферных точек для моментов

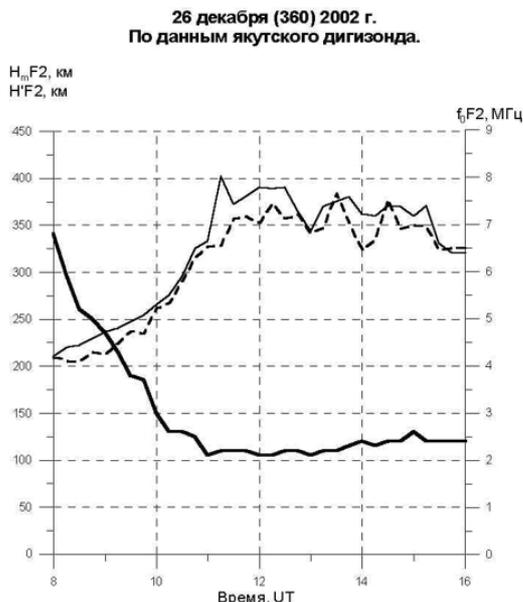


Рис. 2. Вариации параметров F2-слоя над ст. Якутск.

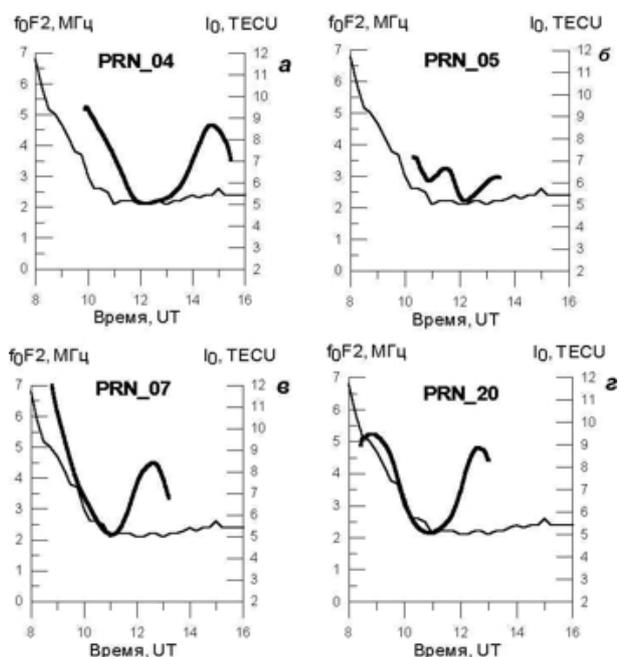


Рис. 3. Вариации абсолютного значения полного электронного содержания $I_0(t)$.

минимумов $I(t)$ для PRN04 – 61.57° N, 127.92° E; для PRN05 – 63.54° N, 118.67° E, для PRN07 – 60.54° N, 129.18° E, для PRN20 – 61.66° N, 134.20° E. Здесь можно отметить в целом хорошее подобие временного хода f_0F2 и $I(t)$, однако ширины минимумов f_0F2 и $I_0(t)$ заметно отличаются друг от друга. Возможно, это связано с тем, что на ход $I_0(t)$ накладываются пространственные вариации.

Анализ IONEX-файлов.

Для сравнения результатов вертикального зондирования более интересным является анализ данных абсолютного вертикального значения ПЭС I_0 в формате IONEX. На рис. 4 представлены широтные распределения I_0 в выбранные моменты UT для долготы 130° E. Точками на рисунке отмечены положения минимумов. Из рис. 4 видно, что минимум ПЭС

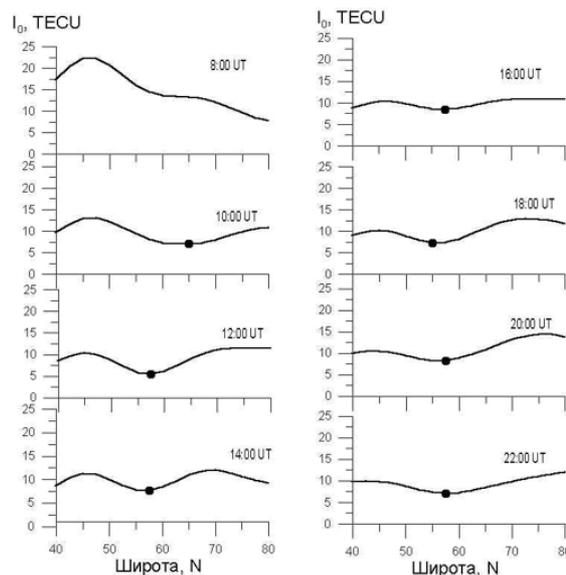


Рис. 4. Широтные распределения значений вертикального полного электронного содержания I_0 , полученных по IONEX-данным.

в разные часы UT перемещается по широте с севера на юг и в обратном направлении, что хорошо согласуется с данными якутского дигизонда. Для 10 UT минимум ПЭС вдоль долготы 130° E наблюдается на широте 65° N, для 12, 14 и 16 UT – 57.5° N, для 18 UT – 55° N, для 20 и 22 UT – 57.5° N. Исследование ГИП по данным IONEX осложняется низким временным разрешением. В то же время данные IONEX отражают суточный ход ПЭС, который необходимо учитывать при определении протяженных по широте структур (порядка 5–10°), передвигающихся на большие расстояния с севера на юг. Глобальные карты ПЭС, приведенные ранее в работе [6], также показывают минимум (менее 10 TECU) в ночные и ранние утренние часы на широтах 60–70° N, который сдвигается на более низкие широты при увеличении геомагнитной активности.

Заключение

Приведенные в данной работе данные соответствуют общей морфологической картине динамики ГИП. Однако вариации ПЭС в области провала показывают более плавный ход без четко выраженной полярной стенки ГИП, обычно наблюдаемой по наземным данным критических частот слоя F2 и по спутниковым данным измерений электронной концентрации в максимуме F2-области.

Ранее в работе [5] на основе анализа распределения ПЭС проведены исследования ГИП в спокойный день 2 октября 2000 г., где также получены сглаженные вариации ПЭС в районе ГИП. Этот эффект, возможно, связан с особенностью метода получения ПЭС, основанного на интегрировании вдоль луча.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 03-05-64100, 04-05-39008 и 05-05-64634) и гранта № НШ-272.2003.5 государственной поддержки ведущих научных школ Российской Федерации. Авторы благодарны А.Е. Степанову за предоставленные данные ионосферных измерений на дигизонде DPS-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гальперин Ю.И., Сивцева Л.Д., Филиппов В.М., Халипов В.Л. Субавроральная верхняя ионосфера. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
2. Muldrew D.B. F-Layer Ionization Trough Deduced from Alouette Data // J. Geophys. Res. 1965. V. 70, № 11. P. 2635–2650.
3. Davies K., Hartmann G.K. Studying the ionosphere with the Global Positioning System // Radio Sci. 1997. V. 32, N 4. P.1695–1703.
4. Mannucci A.J., Ho C.M., Yuan D.N. et al., A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 8. P. 565–582.
5. Афраймович Э.Л., Лесюта О.С., Перевалова Н.П., Пирог О.М., Смирнов В.Ф., Зикрач Э.К., Бондарь Е.Д. Исследование главного ионосферного провала по данным GPS- и ионосферных станций в районе Якутска // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45, № 2. С. 215–220.
6. Афраймович Э.Л., Косоголов Е.Л., Леонович Л.А., Пирог О.М. Глобальная картина крупномасштабных ионосферных возмущений во время магнитной бури 25 сентября 1998 г. по данным сети GPS // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002. Т. 42, № 4. С. 491–498.

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

²Институт космических исследований и аэронавигации СО РАН, Якутск