

46. Yumoto K. and the MAGDAS Group (2007): Space weather activities at SERC for IHY: MAGDAS: Bull. Astr. Soc. India 35, 511-522
47. Yumoto, K., S. Ikemoto, M.G. Cardinal, M. Hayakawa, K. Hattori, J.Y. Liu, S. Saroso, Ruhimat M., M. Husni, D. Widarto, E. Ramos., D. McNamara, R.E. Otadoy, G. Yumul, R. Eborra and N. Servando (2009a): A new ULF wave analysis for seismo-electromagnetics using CPMN/MAGDAS data, *Physics and Chemistry of the Earth* (J. Phys. Chem. Earth), doi:10.1016/j.pce.2008.04.005, 34, 360-366.
48. Yumoto, K., and STPP Sub-committee (2009b); International heliophysical year activities in Japan, *Data Science Journal*, Vol. 8, 30 March 2009, pp. S14-S23.
49. Yumoto K., A. Ikeda, M. Shinohara, T. Uozumi, K. Nozaki, S. Watari, K. Kitamura, V. V. Bychkov, and B. M. Shevtsov (2009c): Electric and Magnetic Field Variations at Low and Equatorial Latitudes During Sc, DP2, and Pi2 Events, *Advances in Geosciences*, Vol. 14, Solar Terrestrial, Eds. Marc Duldig et al., World Sci. Publ. Comp., pp.197-212.
50. Yumoto, K. H. Kawano, and MAGDAS group (2009d); MAGDAS for geospace environment monitoring, , 26th ISTS-ISTS Special Issue of JSASS On-Line Journal, *Trans. JSASS Space Technology Japan*, Vol.7, No. ists26, pp. Tr_2-Tr_2_4.
51. Yumoto, K., G. Maeda, S. Abe, T. Uozumi, A. Fujimoto, A. Ikeda, T. Tokunaga, Y. Yamazaki, T. Ueno, Y. Hitayama, B. Rabiou, C.B.S. Uiso, P. Baki, K.M. Badi, L. B. Kolawole, T. Afullo, A. Macamo, H. Mweene, and MAGDAS/CPMN Group (2009e); Progress report on the global deployment of MAGDAS, *Sun and Geosphere*, in press.

ПРОЯВЛЕНИЕ МАГНИТО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ
MANIFESTATION OF FIELD-ANGLED IONOSPHERE PLASMA DISTURBANCES AT MID-LATITUDE

Э.Л. Афраймович, Э.И. Астафьева, Е.А. Косогооров, Ю.В. Ясюкевич
 Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, yasukevich@iszf.irk.ru;

Using technique of magnetic zenith scanning by GPS rays it was shown that unusual northward isolated ionosphere irregularities registered on 5th October 2001 above California are manifestation of field-angled plasma disturbances (FAD). FADs are characterized by positive deviation of the total electron content (TEC) value up to 4 TECU (10^{16} el/m²). Corresponding TEC variations are isolated impulses with duration of ~40 min. We estimate the influence of such irregularities on differential GPS. Some problems connected with radio signal parameters change may arise when up-to-date very long base interferometers operate, for example, LOFAR or SKA.

1. Введение

Крупномасштабным ионосферным неоднородностям, вытянутым по магнитному полю посвящено множество работ. В литературе рассматривается два типа таких неоднородностей – баблы (bubbles, пузыри) и блобы (blobs) [1-5]. Однако в большинстве работ данные о пространственной геометрии магнитоориентированных неоднородностей (МОН) отсутствуют. Для примера, авторы [1] установили, что их наблюдения представляют проявление баблы используя только следующие критерии: время появления (после заката), наличие фазовых сбоев, уменьшение полного электронного содержания (ПЭС) и плотности электронной концентрации на спутнике DMSP. Однако упомянутые выше критерии недостаточны для идентификации пузыря. Необходимо получить более прямое доказательство вытянутости структуры вдоль магнитной силовой линии (как, например, в работе [2]).

Основное число работ по исследованию баблов и блобов было осуществлено на основе непосредственных измерений электронной концентрации. Только в отдельных работах наряду с измерениями электронной концентрации привлечены измерения ПЭС [1, 2]. Целью настоящей работы является описание метода GPS детектирования среднеширотных магнитоориентированных возмущений и неоднородностей и оценка их влияния на радиотехнические системы на примере необычного явления, имевшего место 5 октября 2001 г. над Калифорнией [6].

2. Метод детектирования среднеширотных магнитоориентированных неоднородностей

Если изолированная неоднородность вытянута вдоль магнитной силовой линии, то при пересечении ее лучами «спутник-приемник» под разными углами мы должны увидеть следующую картину: при приближении луча к области магнитного зенита (т.е. когда луч параллелен магнитному полю) ПЭС будет возрастать (убывать для баблов). При этом мы считаем, что наклонение магнитного поля с высотой меняется достаточно слабо (по крайней мере, на высотах, вносящих определяющий вклад в вариации ПЭС) и линия магнитного поля практически прямая. Тогда во временной области при прохождении области магнитного зенита мы будем видеть «горб» ПЭС.

Стандартный метод GPS позволяет детектировать волновые возмущения на основе фазовых

измерений наклонного ПЭС вдоль луча зрения между приемной станцией и спутником GPS [7]. Для того чтобы устранить регулярные изменения ионосферы, а также тренды, обусловленные орбитальным движением спутника, мы вычисляем вариации ПЭС $dI(t)$ путем фильтрации исходных рядов $I(t)$ в выбранном диапазоне периодов (например, 2-60 мин.). Далее нам необходимо выбрать вариации ПЭС, имеющие вид «горба». Стоит отметить, что при фильтрации такие неоднородности будут иметь вид N-волны. Мы использовали разработанную в ИСЗФ методику детектирования изолированных ионосферных неоднородностей типа спайков [6].

Наша основная идея заключается в том, чтобы проверить соответствие направления луча «спутник GPS – приемник» и направления вектора магнитного поля на высоте максимума ионосферного F2 слоя h_{max} , и на основе этого отобразить ионосферные возмущения, расположенные вдоль магнитной силовой линии. Необходимо помнить про ограничения накладываемые геометрией зондирования - далеко не все траектории проходят через область магнитного зенита, поэтому не для всех спутников неоднородность будет одинаково хорошо проявляться.

На первом шаге мы определяем координаты подионосферных точек S_i [7] на высоте h_{max} в географической системе координат. Далее мы рассчитываем направление магнитной силовой линии на высоте h_{max} для подионосферной точки S_i с использованием международной справочной модели IGRF-10 и вычисляем угол между векторами \vec{r} и \vec{B} .

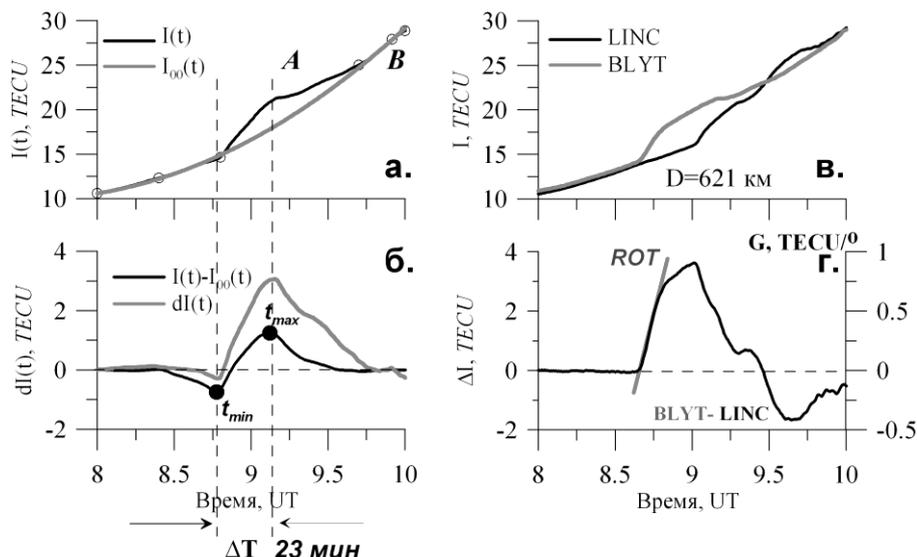
Дополнительно мы анализируем скорость перемещения неоднородностей, направление волнового фронта на основе метода SADM-GPS [7], а также полудлительность МОН, абсолютную и относительную амплитуду возмущения. Данный анализ является дополнительным, и мы лишь вкратце останавливаемся на нем, отсылая читателя к работе [6].

3. МОН над Калифорнией 5 октября 2001 г.

В этот день между 08:00 и 18:00 UT на ряде станций GPS, расположенных в Калифорнии, США (220-260°E; 28-42°N), было зарегистрировано большое число изолированных ионосферных возмущений (ИИВ), проявляющихся в вариациях ПЭС в форме отдельного аperiodического возмущения ПЭС длительностью порядка 20-40 мин. Согласно данным Интернет для данного региона США и рассматриваемого временного интервала не было мощных естественных или антропогенных событий способных вызывать столь значительные вариации ПЭС. Общее число станций GPS в Калифорнии, используемых при анализе - 242, общее число лучей «спутник GPS-приемник» - ~1035.

Типичные вариации ПЭС 5 октября 2001, полученные по данным GPS станции AGMT, представлены на рис. 1 (а, б). ИИВ проявляется в вариациях ПЭС как отдельное аperiodическое возмущение. Черной кривой на рис. 1а и 1б приведены, соответственно, исходный ряд ПЭС $I(t)$ и вариации ПЭС отфильтрованные в диапазоне периодов 2-60 мин $dI(t)$. t_{min} и t_{max} – время начала регистрации возмущения ПЭС и время регистрации максимума возмущения ПЭС. Полудлительность ИИВ определяется как $\Delta T = t_{min} - t_{max}$. Абсолютное значение амплитуды ИИВ достаточно сложно определить, так как его длительность близка к постоянной времени суточных вариаций. Вариации ПЭС, отфильтрованные в диапазоне 2-60 мин., характеризуются кажущимся уменьшением ПЭС относительно фона. Однако, как видно из рис. 1а, возмущение ПЭС характеризуется превышением ПЭС над фоновым уровнем (см. аппроксимацию невозмущенного ПЭС $I(t)_{00}$ – серая кривая). Разность между исходным рядом ПЭС и его невозмущенной аппроксимацией $dI(t)_{00} = I(t) - I(t)_{00}$ представляет собой более корректную форму вариаций ПЭС при прохождении ИИВ (рис. 1б, толстая серая линия). Стоит отметить, что наибольшее отклонение ПЭС относительно момента времени t_{min} для отфильтрованных вариаций меньше, чем для разностной вариации $dI(t)_{00}$ (для данной станции 1.93 и 3.34 TECU, соответственно).

5 октября 2001 г. (день 278)
AGMT, 34.6 N, 243.6 E, PRN05



Ри. 1 - Вариации ПЭС 5 октября 2001 по данным GPS станции AGMT, PRN 05: (а) – исходный ряд ПЭС (черная кривая) $I(t)$, аппроксимация невозмущенного ПЭС $I(t)_{00}$ (серая толстая кривая проведенная через окружности); (б) – Вариации ПЭС $dI(t)$ отфильтрованные в диапазоне периодов 2-60 мин (черная кривая); разность между исходным рядом ПЭС и невозмущенным приближением $dI(t)_{00} = I(t) - I(t)_{00}$ (толстая серая кривая). t_{min} и t_{max} - время минимума и максимума отклонения ПЭС при прохождении ИИВ. (в) – исходные ряды ПЭС I_1 и I_2 для двух разнесенных станций GPS 1 (LINC) и 2 (BLYT) с длиной базы $D=621$ км 5 октября 2001 г. (г) – разность рядов ПЭС, представленных на панели (в) $\Delta I = I_1 - I_2$ (толстая черная линия). Шкала для соответствующих вариаций градиента ПЭС представлена справа. Наклонная серая линия отмечает область резкой границы временной зависимости ΔI со значительным наклоном ROT .

На рис. 2 представлено распределение значений широт станций GPS, для времени t_{min} . Буквы **A**, **B**, **C**, и **D** отмечают «следы» ИИВ. Абсолютная амплитуда отклонения ПЭС при прохождении ИИВ dI для следа **A** составляет ~ 3 TECU. Фоновое значение ПЭС I_0 , вычисленное по картам ПЭС IONEX (<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>), составляет ~ 15 TECU. Следовательно, относительная амплитуда ИИВ dI/I_0 достигает 20%, что на порядок превышает амплитуду типичных фоновых флуктуаций.

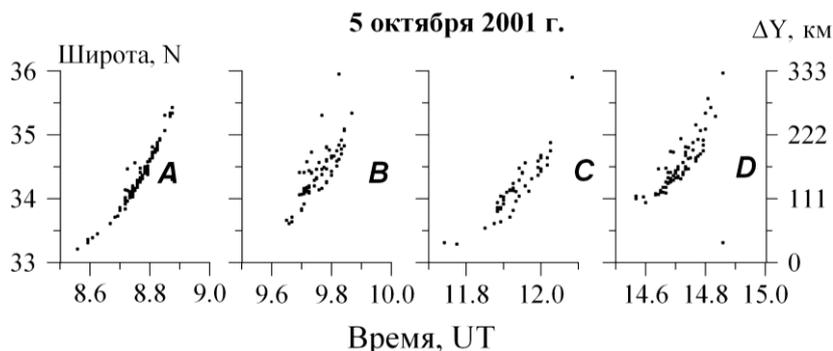


Рис. 2 - Распределение значений подионосферных точек лучей «спутник GPS – приемник», соответствующих времени t_{min} , для всех МОН зарегистрированных в этот день всеми станциями GPS над рассматриваемым регионом Калифорнии. Буквы **A**, **B**, **C** и **D** отмечают отдельные «следы» МОН

С использованием метода SADM-GPS для GPS решеток в работе [6] для выбранного интервала времени были определены средние значения азимута $\langle \alpha \rangle$ и угла места $\langle \theta \rangle$ волнового вектора \mathbf{K} и горизонтальной скорости $\langle V \rangle$ возмущения. Соответствующие значения для параметров ИИВ, а также номер спутника PRN и число решеток GPS M (общее число решеток GPS составляло 280-660) для каждого следа **A**, **B**, **C**, **D** представлены в таблице 1. Анализ показал четко выраженное направление перемещение ИИВ в северном направлении (рис. 2). Горизонтальная компонента вектора скорости составляла 70-180 м/с. Угол места волнового вектора \bar{K} при этом имеет небольшое положительное значение $\sim 22-24^\circ$ (Таблица 1, строка 8).

На рис. 1г представлен градиент ПЭС $\Delta I = I_1 - I_2$ между двумя разнесенными станциями GPS для следа А. Исходные ряды ПЭС I_1 и I_2 для двух разнесенных станций GPS 1 (LINC) и 2 (BLIT) с длиной базы $D=621$ км представлены на рис. 1в. Как можно видеть, дифференциальное отклонение ПЭС ΔI двух разнесенных станций близко по форме к разности между исходным рядом ПЭС и невозмущенной аппроксимацией $dI(t)_{00} = I(t) - I(t)_{00}$ (рис. 1б).

При прохождении ИИВ, значения пространственного градиента ПЭС $G(t)$ и производной ПЭС по времени ROT достаточно велики. Шкала для соответствующих вариаций градиента ПЭС G нанесена на рис. 1г справа. Наклонная кривая отмечает резкое возрастание ΔI со временем и имеет значительный наклон ROT порядка 0.33 TECU/мин. Величина параметров G и ROT превышает фоновые значения на порядок и сравнима со значениями G и ROT во время сильных геомагнитных бурь [7]. Таблица 1 содержит данные параметры для каждого следа А, В, С и D.

Таблица 1. Средние параметры магнитоориентированных неоднородностей 5 октября 2001 г.

№	«След»	А	В	С	D
	Параметр				
1	PRN	5	30	6	3
2	ΔT , мин.	23	19	18	11
3	$dI(t)_{00}$, TECU	3.06	2.8	2.6	2.1
4	$\Delta I/I_0$, %	17	19	21	8
5	M	660	280	376	280
6	V, м/с	171	184	158	73
7	$\langle \alpha \rangle$, °	0	5	5	0
8	$\langle \theta \rangle$, °	22	27	24	20
9	γ , °	6	13	22	36
10	D_{\perp} , км	70	66	71	23

Наиболее вероятное значение угла γ между векторами \vec{B} и \vec{r} для максимальной амплитуды ИИВ представлено в строке 9. Максимальная амплитуда регистрируется при минимальном γ . Это соотносится с моделью неоднородности, вытянутой по магнитному полю и мы можем интерпретировать регистрируемое ИИВ как блоб. Поперечный размер неоднородности D_{\perp} составляет ~70 км (строка 10 Таблицы 1). Таким образом, поперечный размер МОН в вертикальной плоскости существенно меньше его горизонтального размера.

5. Заключение и обсуждение

На протяжении последних тридцати лет большое число различных видов структур в ночном F-слое были исследованы с использованием различных инструментов. Так как данные структуры характеризуются резкими градиентами, а также мелкомасштабными структурами электронной плотности, то они могут служить угрозой для систем связи и навигации.

В данной работе предложен новый метод детектирования среднеширотных МОН. Метод основан на сканировании области магнитного зенита лучами GPS. Возможность метода продемонстрирована на примере регистрации необычных среднеширотных ИИВ над Калифорнией 5 октября 2001 г. [6]. В данном случае плазменные блобы с положительным отклонением относительно фонового ПЭС регистрируются на 43° MLAT, что соответствует высоте ~6000 км над магнитным экватором в апексе.

Основная проблема связана с отличием направления перемещения неоднородностей полученным нами (северное) от обычного направления перемещения МОН (восточное). Мы можем предположить, что наблюдаемый в рассматриваемом нами случае блоб поднимается до очень большой высоты над магнитным экватором. Поэтому мы будем видеть только движение на север, характеризующее «всплытие» блоба. Таким образом, то направление, которое видим мы и то, что наблюдали в [5] – несколько разные вещи.

Когда неоднородность вытянута вдоль магнитного поля и поднимается над экватором, волновой фронт возмущения должен быть перпендикулярен магнитной силовой линии. Наклонение магнитного поля для точки 243 E, 36 N составляет ~ 61° . Тогда угол места нормали магнитной силовой линии составляет ~ 29° . Ранее мы установили, что угол места волнового вектора имеет значение ~ $22-24^{\circ}$. Это является дополнительным свидетельством, что наблюдаемое возмущение представляет собой проявление МОН.

Резкие градиенты ПЭС, обусловленные МОН, могут увеличить дифференциальную ошибку между наземной базовой станцией и бортовым приемником. Подобные проблемы могут возникнуть при работе VLBI. В этом случае эффекты МОН приведут к различному фазовому запаздыванию и нарушению когерентности интерференционной картины.

В работе [8] впервые был обнаружен квазистационарный эффект магнитного зенита, который приводит к уменьшению электронной концентрации и формированию неоднородностей, простирающихся вдоль линии магнитного поля, вследствие влияния мощного высокочастотного излучения. Однако крайне важно сравнить эти результаты со статистикой естественных МОН.

Благодарности

Авторы благодарят Потехина А.П. и Медведева А.В. за интерес к работе. Мы выражаем благодарность научным группам SOPAC и CORS за данные GPS. Работа поддержана Фундаментальной исследовательской программой физического отделения РАН (Проект IV.12 “Современные проблемы радиофизики”), грантом РФФИ 10-05-00113-а.

Литература

1. Ma G., Maruyama T. A super bubble detected by dense GPS network at east Asian longitudes // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L21103.
2. Huang C.-S., Foster J.C., Sahai Y. Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasmapause // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A05315.
3. Hysell D.L. An overview and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread F // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 2000. V. 62. P. 1037–1056.
4. Yokoyama T. Su S.-Yi, Fukao S. Plasma blobs and irregularities concurrently observed by ROCSAT-1 and Equatorial Atmosphere Radar // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A05311.
5. Kintner P. M., Ledvina B. M., de Paula E. R., Kantor I. J. Size, shape, orientation, speed, and duration of GPS equatorial anomaly scintillations // Radio Sci. 2004. V. 39. RS2012.
6. Afraimovich E.L., Astafieva E.I., Voyeikov S.V. Isolated ionospheric disturbances as deduced from global GPS network // Ann. Geophys. 2004. V. 22, N 1. P. 47-62.
7. Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Иркутск: Изд-во ГУ НЦ ВВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
8. Терещенко Е.Д., Милченко А.Н., Фролов В.Л., Юрик Р.Ю. Наблюдение эффекта магнитного зенита с использованием сигналов спутников GPS/ГЛОНАСС // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934-938.

ОТЛИЧИЕ СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ПЭС ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ КАРТ GIM РАЗЛИЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЙ, РЕГИОНАЛЬНЫХ СЕВЕРОАМЕРИКАНСКИХ КАРТ US- TEC И МОДЕЛИ IRI

DIFFERENCE OF TEC DAILY VARIATIONS DEDUCED FROM GLOBAL IONOSPHERE MAPS OF DIFFERENT LABORATORIES, REGIONAL NORTH-AMERICAN TEC MAPS US-TEC AND IRI MODEL

Ю.В. Ясюкевич, К.Г. Ратовский, А.С. Полякова, А.А. Шейфлер
Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, yasukevich@iszf.irk.ru

Nowadays ionosphere total electron content (TEC) mapping technique is widely adopted. On the basis of this data it is possible to study daily variations for ionosphere physics purposes. Global ionosphere maps (GIM) allow us to evaluate the amplitude of daily variations, maximal and minimal TEC value, rate of ionization increasing near the solar terminator in different regions of the Earth. Moreover there is regional North-American ionosphere maps. However, GIM and US-TEC are calculated by different laboratories on the basis of different assumptions. Any assumption results in some errors and so it is interesting to compare TEC daily variations from GIM and US-TEC. In the report we compare amplitude and half-width of daily variations, rate of ionization increasing for different level of solar and geomagnetic activity. Results are compared with IRI-2007 model data.

1. Введение

В настоящее время развитие средств радиозондирования ионосферы и моделирования предоставляет возможность непрерывного и глобального мониторинга полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли. В качестве экспериментальных измерений над территорией земной поверхности могут использоваться данные глобальных и региональных наземных сетей приемников навигационных систем (GPS, GLONASS, в ближайшие годы войдет в строй европейская система GALLILEO), а также вычисленные по этим данным глобальные (Global Ionosphere Maps - GIM) [1, 2] и региональные карты ПЭС [3]. Общепринятой единицей измерения полного электронного содержания является TECU (total electron content unit; 1 TECU=10¹⁶ эл/м²). Начиная с 1991 г. над территорией океана появилась возможность исследовать ионосферу на основе данных спутниковых высотометров (Torax/Poseidon, Jason-1, Jason-2, <http://www.avisio.oceanobs.com/>). Кроме того, существует ряд ионосферных моделей, которые позволяют рассчитать профиль электронной концентрации и ПЭС