

## НАБЛЮДЕНИЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ПОВЫШЕНИЙ ПЭС ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КАРТ

<sup>1</sup>И.К. Едемский, <sup>2</sup>И.И. Непомнящих

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский Национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия  
ilya@iszf.irk.ru

## INVESTIGATION INTO LOCALIZED TEC ENHANCEMENTS, USING GLOBAL IONOSPHERIC MAPS

<sup>1</sup>I.K. Edemsky, <sup>2</sup>I.I. Nepomnyashchikh

<sup>1</sup>Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

---

**Аннотация.** Рассматривается подход к анализу глобальных карт GIM, позволяющий выделять локализованные области повышения полного электронного содержания (ПЭС). Подход основан на определении значимых отклонений величины ПЭС от медианных значений и позволяет проводить анализ значительных объемов данных в автоматическом режиме. Представлена полученная в процессе такого анализа статистика наблюдений событий и динамика изменения их числа за период 2002–2016 г.

**Ключевые слова:** ПЭС, GIM, автоматический анализ.

**Abstract.** We present a method of global ionospheric maps (GIM) analysis allowing us to find localized areas of total electron content (TEC) enhancement. The method is based on definition of significant TEC deviations from the median values. The method makes possible to analyze large amount of data automatically. We present the results of such an analysis for the period 2000–2017 and show the dynamics of the events during the period.

**Keywords:** TEC, GIM, automatic analysis.

---

Глобальные карты ионосферы (global ionospheric map, GIM) являются удобным средством диагностики состояния ионосферы. Карты предоставляют данные о вертикальном полном электронном содержании (ПЭС) по миру с пространственным разрешением  $5^\circ$  по долготе и  $2.5^\circ$  по широте [Manuchi et al., 1998]. Приводимые в картах значения ПЭС вычисляются на основе измерений более чем на 100 ГНСС станциях мировой сети по определенному алгоритму. На сегодня карты GIM предоставляют несколько научных групп, использующих собственные алгоритмы интерполяции: CODE, ESA, JPL, UPC.

Данные GIM позволяют исследовать глобальную динамику ионосферы, анализировать суточные и сезонные изменения концентрации заряженных частиц. При сравнительно низком пространственном разрешении, карты могут быть использованы также для исследования локальных процессов в ионосфере. Так, например, в работе [Le et al., 2011] авторы сделали попытку обнаружения предвестников землетрясений посредством анализа данных GIM из отдельных узлов сетки. Авторы [Ясюкевич, Живетьев, 2015] по данным GIM показали существование областей, в которых электронная концентрация изменяется относительно независимо от глобальной динамики ионосферы.

Несмотря на используемую при построении интерполяцию измерений, на отдельных картах можно выделить области, где наблюдается увеличение ПЭС относительно типичных фоновых значений — области локализованных повышений ПЭС (ЛПП). На рис. 1 приведена карта для 12 UT 15.07.12. Поми-

мо области экваториальной аномалии, где концентрация ПЭС типично повышена, можно наблюдать ЛПП над Южной Африкой. Такие области могут возникать в результате действия множества источников, и анализ частоты их появления, определение мест наблюдения и типичных параметров дадут значимый вклад в понимание динамики ионосферы и ее взаимодействия с другими геосферами.

Данная статья посвящена разработке алгоритма автоматического анализа карт GIM с целью выявления существенных отклонений ПЭС от типичного суточного хода.

Локальное повышение ПЭС является выраженным отклонением величины от типичных для данных области и времени значений. Таким образом, метод автоматического выделения ЛПП сводится к алгоритму нахождения типичных величин ПЭС, вычислению отклонений значений заданной карты от типичных и оценке полученных разностей (рис. 2).

Мы рассмотрели два варианта определения типичного распределения ПЭС: усреднение и вычисление медианных значений. В дальнейшем алгоритмы, основанные на этих методах, будем называть MEAN (среднее) и MEDIAN (медиана) соответственно.

Экваториальная область является наиболее динамичной и, как следствие, содержит большее число неоднородностей в распределении ПЭС. Кроме того, ЛПП, наблюдаемые в средних широтах, представляют больший интерес, чем в приэкваториальных областях. Поэтому при анализе карт область магнитного экватора шириной порядка  $60^\circ$  исключается из рассмотрения (рис. 2, *d–e*).

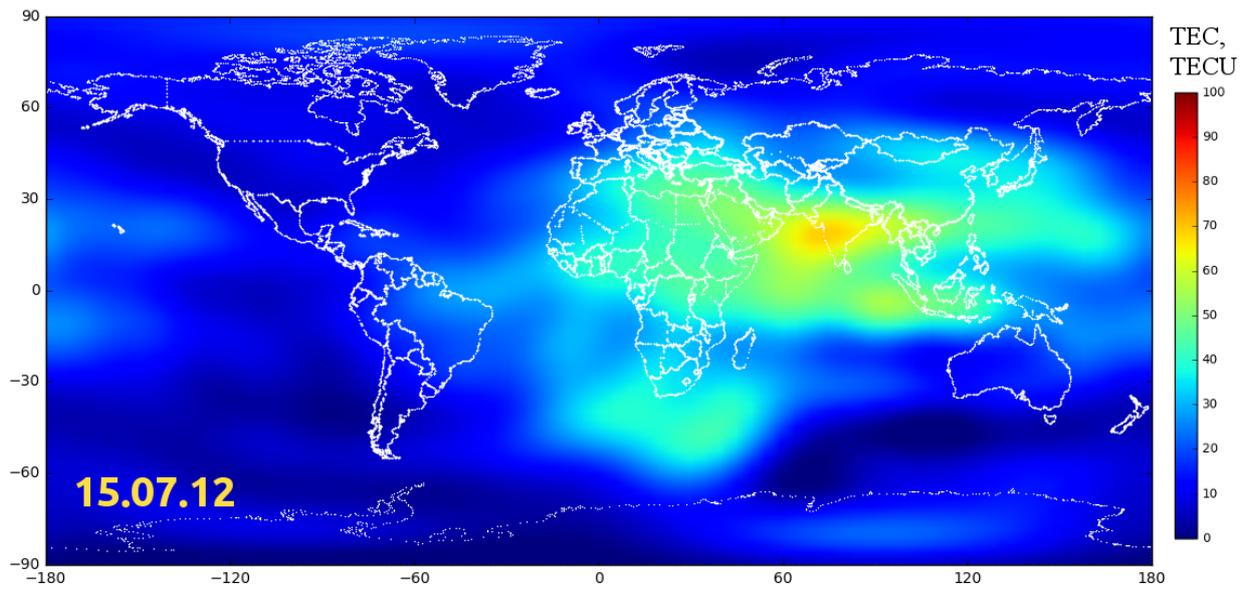


Рис. 1. Локализованное повышение ПЭС в средних широтах Южного полушария

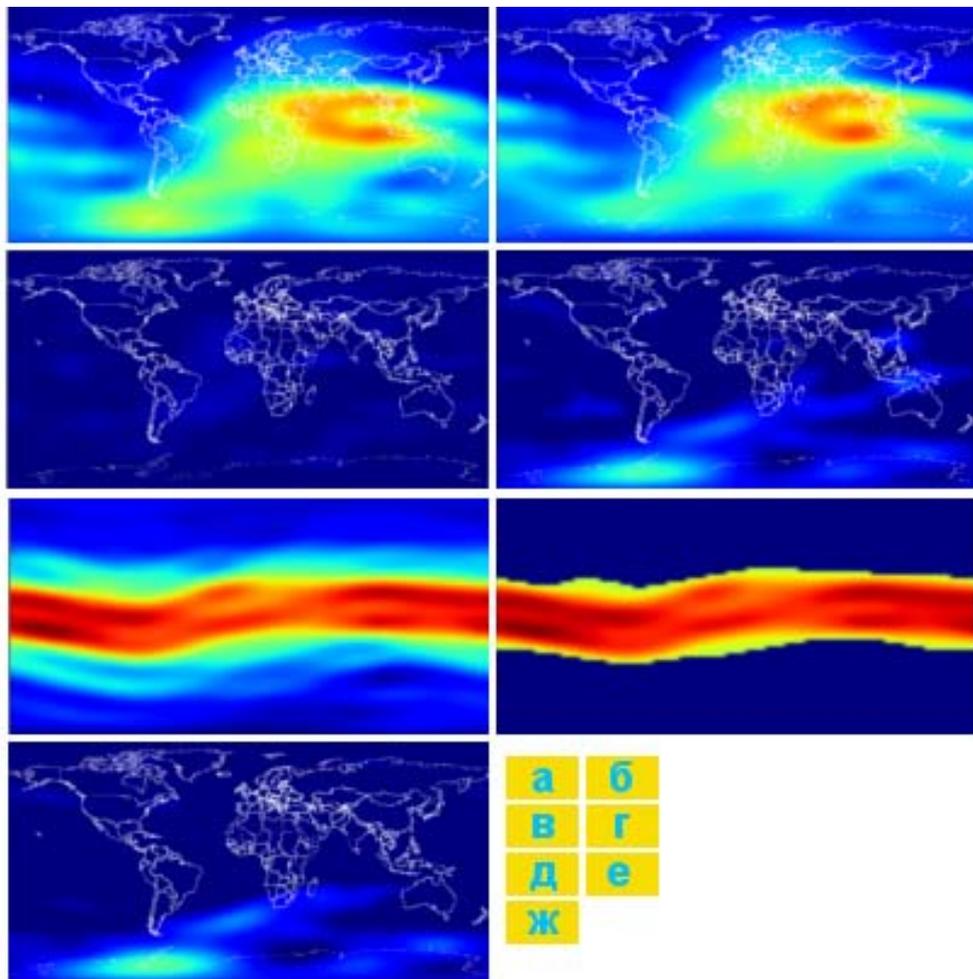


Рис. 2. Этапы работы алгоритма детектирования ЛПП на карте: *а* — исходная карта; *б* — карта типичных значений ПЭС в заданном окне дней; *в* — отклонение текущих значений от типичных; *г* — отклонение разности от типичных разностей в заданном окне; *д* — положение экваториальной аномалии в течение суток; *е* — область экваториальной аномалии с отсечкой по порогу; *ж* — итоговая карта после вычитания экваториальной области

Наблюдение локализованных повышений ПЭС по данным глобальных ионосферных карт

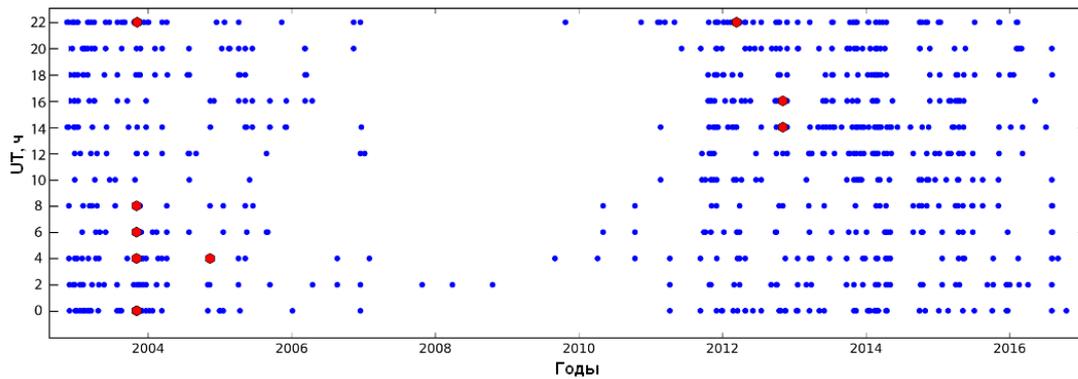


Рис. 3. Расхождение в числе ЛПП, зарегистрированных MEDIAN (синий) и MEAN (красный)

Сравнение алгоритмов MEAN и MEDIAN показало, что эффективность их работы различна. На рис. 3 представлено число случаев, когда алгоритм определил присутствие на карте ЛПП. Из рисунка исключены ЛПП, наблюдаемые обоими алгоритмами. Синими точками отмечены ЛПП, зарегистрированные с помощью MEDIAN и пропущенные MEAN, красными — наоборот. Типичные значения ПЭС определялись в пределах окна 5 дней. По оси OY отложено время UT, для которого брались карты GIM. Можно заключить, что алгоритм MEDIAN, основанный на определении медианных значений в заданном окне дней, показывает большую эффективность в поиске ЛПП. При этом число пропущенных им ЛПП составляет менее 1 % от общего числа зарегистрированных.

Мы оценили также процент ложных срабатываний алгоритмов, т. е. число случаев, когда ЛПП на карте не наблюдалась, а алгоритм показал ее наличие. На рис. 4 представлена зависимость от времени числа ЛПП  $N$ , зарегистрированных в период 2002–2016 гг. с применением алгоритма MEAN (зеленый) и MEDIAN (синий) с числом ложных срабатываний каждого алгоритма (светло-зеленый и голубой, соответственно). Число ложных срабатываний MEAN составляет в среднем 11 %, MEDIAN 3.5 %. Таким образом, алгоритм MEAN не только обеспечивает более эффективное детектирование ЛПП, но и имеет меньшее число ложных срабатываний, по сравнению с MEAN. Линией на рис. 4 показано отношение  $N_{MEAN}/N_{MEDIAN}$ . Видно, что медианный алгоритм определяет в среднем в 3–5 раз больше ЛПП, чем основанный на определении среднего.

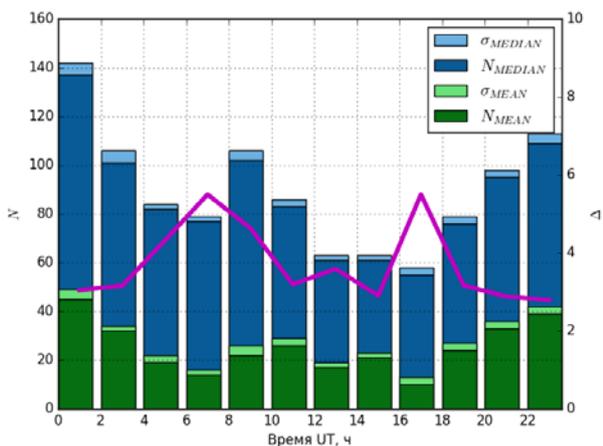


Рис. 4. Число ЛПП по MEDIAN (синий) и MEAN (зеленый)

Число регистрируемых на картах GIM ЛПП меняется от года к году. На рис. 5 приведено количество ЛПП за период 2002–2016 гг., определенное методами MEAN (зеленый) и MEDIAN (синий) при использовании окна в 5 дней. Оранжевая линия показывает вариации индекса радиационного Солнца F10.7. Можно заключить, что в периоды высокой солнечной активности число регистрируемых ЛПП значительно выше, чем в годы пониженной активности. В период минимума солнечной активности (2007–2009) ЛПП не регистрируются вообще.

Предложенный в работе алгоритм представляет интерес для решения задач поиска областей локального повышения значений в пространственных распределениях. В частности, анализа карт распределения параметров геосфер (ионосферы, атмосферы, океана и т. д.).

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (№ МК-1097.2017.5).

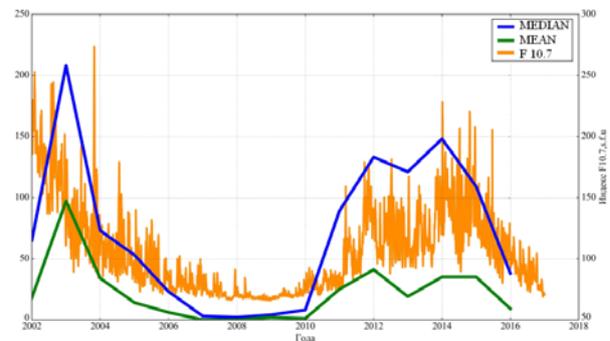


Рис. 5. Число ЛПП по MEDIAN (синий) и MEAN (зеленый) за период 2002–2016 в сравнении с индексом F10.7 (оранжевый)

Список литературы

Le H., Liu J. Y., Liu L. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002–2010 // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A02303. DOI: 10.1029/2010JA015781.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.

Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В. Использование технологии графов для ионосферных исследований // Солнечно-земная физика. 2015. Т 1, № 3. С. 21–27. DOI: 10.12737/10545.