

Сравнение результатов методики TauAbsTEC с данными Глобальных Ионосферных Карт

Мыльникова А. А.¹, Ясюкевич Ю. В.^{1,2}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова 126а, а/я 291

²Иркутский государственный университет, 664003, г. Иркутск, бул. Гагарина, 20
email: manna@iszf.irk.ru

Введение

С помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) по двухчастотным кодовым и фазовым измерениям псевдодалности определяется полное электронное содержание (ПЭС) в ионосфере [1]. Для решения многих задач в физике ионосферы используется наклонное ПЭС – вдоль луча спутник–приемник. Важной задачей также является восстановление абсолютного вертикального ПЭС.

Ранее нами разработана методика определения абсолютного вертикального ПЭС по данным приемников ГЛОНАСС/GPS и на её основе создан программный комплекс TauAbsTEC [2]. В работе будет проведено тестирование методики, используя данные ПЭС глобальных ионосферных карт (GIM) за полный 2009 год (минимум солнечной активности) и 2014 год (максимум солнечной активности).

Алгоритм определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ

Разработанный алгоритм имеет следующую структуру:

1. Вычисление ПЭС по данным ГНСС.

ПЭС вычисляется по фазовым и групповым измерениям на двух частотах GPS ($f_1=1575.42$ МГц, $f_2=1227.6$ МГц) и ГЛОНАСС ($f_{k1} = 1602 + K \cdot 0.5625, f_{k2} = 1246 + K \cdot 0.4375$, где K номер несущих частот) [3, 1].

1. Разделение рядов данных на непрерывные интервалы по времени.
2. Детектирование и устранение влияния выбросов и срывов сопровождения сигнала в данных ПЭС.
3. Устранение неоднозначности фазовых измерений.
4. Оценка вертикального ПЭС, градиентов, ДКЗ и других параметров на основе модели измерений ПЭС.

Для определения абсолютного вертикального ПЭС и ДКЗ необходимо задать модель измерений ПЭС, где одними из параметров являются вертикальное ПЭС I_V и погрешность ПЭС вследствие ДКЗ - I_{BIAS} . Далее нужно провести оценку её параметров. Наряду с I_V и I_{BIAS} параметрами модели являются широтные и долготные градиенты, временная производная ПЭС.

Модель измерений ПЭС имеет следующий вид:

$$I_M = S_j^i \cdot \left\{ \begin{array}{l} I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \cdot \Delta\phi_j^i + G_{q_\phi} \cdot (\Delta\phi_j^i)^2 + \\ + G_l \cdot (\Delta l_j^i)^2 + G_t \cdot \Delta t_j^i + G_{q_t} \cdot (\Delta t_j^i)^2 \end{array} \right\} + I_{BIAS_j} \quad (1)$$

и является разложением вертикального ПЭС I_V в ряд Тейлора по пространству и времени.

В модели также задается функциональная зависимость вертикального ПЭС от угла места (θ_j^i) посредством проекционного оператора S_j^i , с учетом сферичности Земли:

$$S_j^i = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin [\alpha \cdot (90 - \theta_j^i)] \right) \right\} \right]^{-1} \quad (2)$$

где R_E – радиус Земли, h_{\max} – высота тонкого сферического слоя (450 км), θ_j^i – угол пролета спутника над горизонтом.

Далее определяются параметры модели посредством минимизации квадрата разности ПЭС, вычисленного по данным фазовых измерений с учетом фазовой неоднозначности, и модели ПЭС (1).

Для улучшения точности восстановления ПЭС в работе [4] в проекционном операторе вводится коэффициент α меньший единицы. Зависимость этого коэффициента устанавливается от выбранной высоты ионосферной точки. Нами было выявлено, что в зависимости от широты станции необходимо использовать разный коэффициент α , так как наклонное ПЭС в зависимости от угла пролета спутника меняется по-разному в разных регионах Земли [2].

Сравнение суточной динамики вертикального ПЭС

Для тестирования разработанной методики в работе проведено сравнение полученных с помощью TauAbsTEC данных I_V с картами GIM.

На первом этапе проведено сравнение суточной динамики I_V , над Иркутском (52.3° N., 104.3° E.), полученной с помощью программного комплекса TauAbsTEC и значений I_V карт GIM, публикуемых лабораторией CODE и JPL. Сравнение выполнено для нескольких дней 2009 года, минимум солнечной активности (количество солнечных пятен ~ 0) и для нескольких дней 2014 года, максимум солнечной активности (количество солнечных пятен около 110).

На рис. 1а и 1б представлены данные I_V полученные с помощью TauAbsTEC (сплошная черная линия), данные CODE (пунктирная серая линия) и JPL (штрих-пунктирная черная линия) для нескольких дней в начале и середине 2009 года (рис. 1а) и для нескольких дней в начале и середине 2014 года (рис. 1б).

Среднее значение разности между данными I_V , полученными с помощью TauAbsTEC и данными карт GIM, представлены в таблице 1.

Средняя разность между I_V полученным с помощью TauAbsTEC и данными JPL в два раза больше чем средняя разность с данными CODE. Расхождение I_V полученного с помощью TauAbsTEC с JPL в 2014 году увеличилось значительно по сравнению с 2009 (особенно для 170-172 дней), а расхождение с CODE в 2014 году изменилось незначительно.

Таблица 1

	2009 год		2014 год	
	6 – 8 день	170 – 172 день	6 – 8 день	170 – 172 день
ΔI_V JPL-TauAbsTEC	1.5 TECU	1.7 TECU	2.4 TECU	5 TECU
ΔI_V CODE-TauAbsTEC	0.7 TECU	2.2 TECU	1.2 TECU	2.4 TECU

Статистическое сравнение вертикального ПЭС

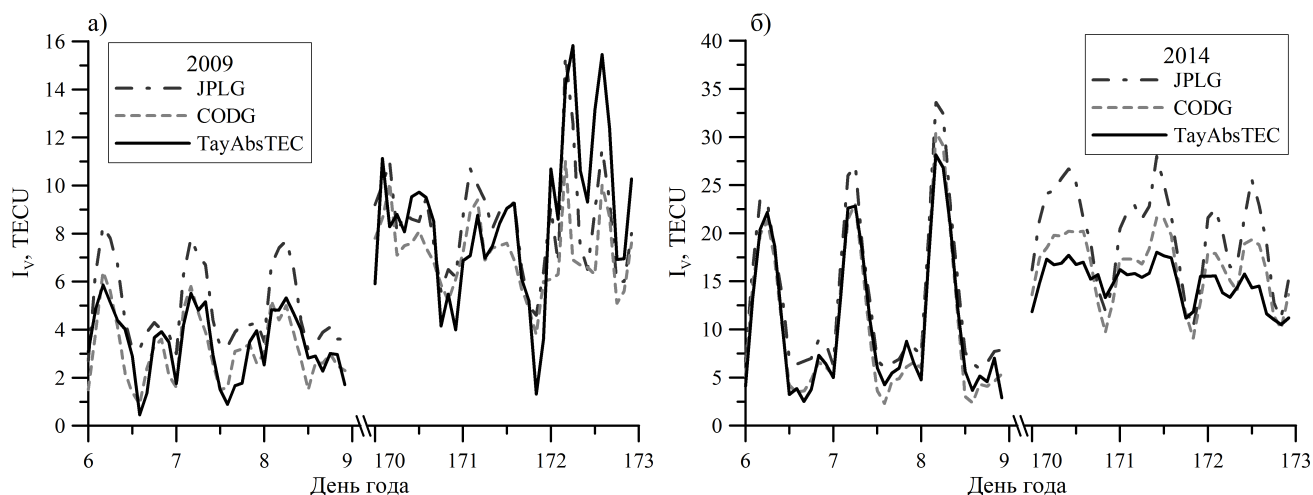


Рис. 1. I_V полученное с помощью программного комплекса TayAbsTEC (черная сплошная линия), данные CODE (пунктирная серая линия) и JPL (штрих-пунктирная черная линия) для: а) 6 - 8-го и 170 - 172-го дней 2009 года (минимум солнечной активности); б) для этих же дней 2014 года (максимум солнечной активности).

Далее в работе проведено статистическое сравнение разности между данными I_V , полученными с помощью разработанного программного комплекса TayAbsTEC и данными I_V из карт GIM, публикуемыми лабораторией JPL и CODE, для всего 2009 года (минимум солнечной активности) и для всего 2014 года (максимум солнечной активности), над Иркутском.

На рисунке 2а и 2б показаны нормированные гистограммы ΔI_V , разности между значениями I_V публикуемыми лабораторией а) CODE; б) JPL и I_V полученными с помощью TayAbsTEC для 2009 года (серый цвет), для 2014 года (черный цвет). Значения наиболее часто встречающихся значений (мода) разности представлены в таблице 2.

Значение моды распределения разности для года максимума солнечной активности (2014 год) для лаборатории CODE незначительно увеличилось, по сравнению с 2009 годом.

Значение моды распределения разности в гистограмме на рис. 2б для года максимума солнечной активности (2014 года) значительно увеличилась по сравнению с 2009 годом.

Таблица 2

	2009 год	2014 год
Мода JPL-TayAbsTEC	2 TECU	3.5 TECU
Мода CODE-TayAbsTEC	0 TECU	1 TECU

Заключение

Проведено тестирование разработанной ранее методики определения абсолютного вертикального ПЭС. Тестирование проводилось с использованием данных абсолютного ПЭС карт GIM, лабораторий CODE и JPL.

Распределение значений разности абсолютного вертикального ПЭС имеет вид распределения Гаусса, присутствует систематическая и случайная ошибка. Систематическая ошибка для разности значений вертикального ПЭС лаборатории CODE и полученных с помощью TayAbsTEC составляет ~ 1 TECU (0 TECU для 2009 года). Для разности с лабораторией JPL систематическая ошибка ~ 3.5 TECU (2 TECU для 2009 года). Такие систематические ошибки присутствуют и при сравнении между собой значений вертикального ПЭС с карт GIM разных лабораторий [5].

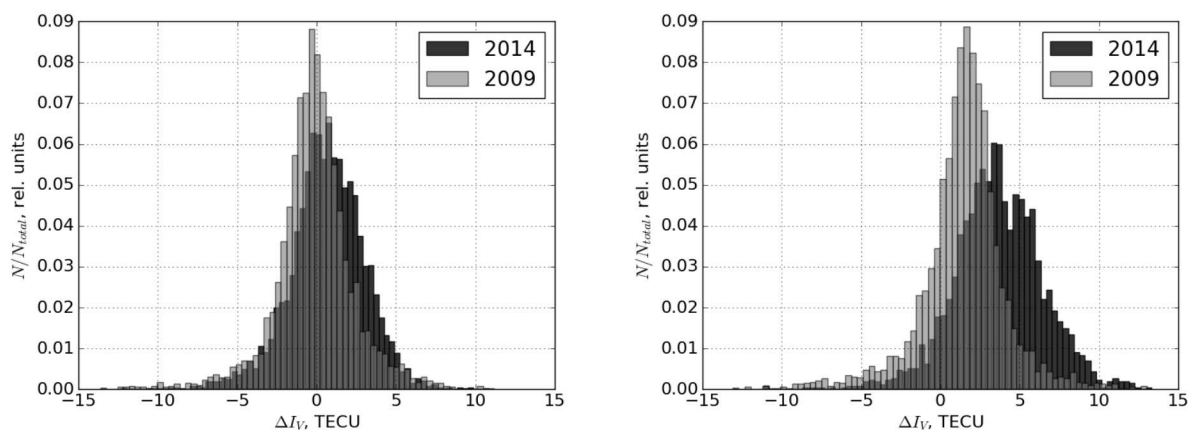


Рис. 2. Нормированная гистограмма ΔI_V разности значений вертикального ПЭС по данным GIM и TauAbsTEC. а) GIM лаборатории CODE, б) GIM лаборатории JPL. Серым цветом представлены данные для 2009 г., черным цветом – для 2014 г. (размер бина 0.45 TECU).

Разработанный программный комплекс можно использовать для расчета абсолютного вертикального ПЭС по данным локальных сетей приемников ГНСС.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 16-35-00051_мол_а и гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

Литература

1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. Ю.В. Ясюкевич, А.А. Мыльникова, В.Е. Куницын, А.М. Падохин влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия, Т. 55, № 6, Р. 790–796. 2015
3. B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, J. Collins Global Positioning System: Theory and Practice. New York. Springer–Verlag Wien, 1992. 327 p.
4. S. Schaer Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System // Dissertation, Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland, 25 March 1999.
5. Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Garcia-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S.C., Krankowski A. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. V. 83. № 3–4. P. 263–275. 2009.