

## ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОГО ПЭС В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ЗЕМНОГО ШАРА

<sup>1</sup>А.А. Мыльникова, <sup>1,2</sup>Ю.В. Ясюкевич

## PECULIARITIES OF ESTIMATING ABSOLUTE TEC IN DIFFERENT REGIONS

<sup>1</sup>A.A. Mylnikova, <sup>1,2</sup>Yu.V. Yasyukevich

При восстановлении абсолютного вертикального полного электронного содержания (ПЭС), с использованием данных GPS/GLONASS, большое влияние на точность оказывает функция преобразования наклонного ПЭС в вертикальное (mapping/projection function). В настоящей работе проведен анализ функции преобразования для ряда точек Земного шара, включая регион Иркутска. Анализ проведен с использованием данных со станций GPS/GLONASS входящих в международную сеть IGS, а также моделирования на основе IRI-2012. Поправка  $\alpha$ , которую необходимо вводить для преобразования наклонного ПЭС в вертикальное, составляет ~0.97 для Иркутска, 0.94 – для Арктических широт, ~0.87 для экваториальных широт.

When we evaluate absolute vertical total electron content (TEC), a mapping function influence a lot on the accuracy. We analyzed the mapping functions for a number of points of the globe, including Irkutsk region. The analysis was performed using the GPS/GLONASS stations of international IGS network, as well as simulating based on IRI-2012. The correction factor  $\alpha$ , which must be entered to convert slant TEC to vertical TEC, is ~0.97 for the Irkutsk, 0.94 – for the Arctic region, ~0.87 for equatorial latitudes.

### Введение

Развитие глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) существенно расширило диагностические возможности радиозондирования ионосферы. Двухчастотные измерения ГНСС позволили на регулярной основе получать информацию о полном электронном содержании (ПЭС) в ионосфере [Афраймович, 2006]. ПЭС может определяться с использованием двухчастотных кодовых и фазовых измерений псевдодалности. ПЭС определенное по разности фазовых измерений, является относительной величиной, так как содержит константу фазовой неоднозначности. ПЭС, вычисленное по групповым измерениям, является абсолютным, однако сильно зашумлено – до сотен процентов на низких углах места [Куницын и др., 2007]. Фазовые измерения ПЭС используются для большого числа исследовательских задач [Afraimovich et al, 2013]. В то же время для ряда прикладных задач требуется информация об абсолютной величине ПЭС. Поэтому, для устранения фазовой неоднозначности используются совместно групповые и фазовые измерения. Значительной проблемой при этом становится систематическая ошибка, обусловленная различием времени распространения сигнала разных частот в радиочастотных трактах приемо-передающего оборудования – дифференциальные кодовые задержки (ДКЗ, DCB – Differential code bias) [Mylnikova et al, 2015]. Учет ДКЗ, осуществляется с применением тех или иных моделей измерений [Schaer, 1999; Yasyukevich et al., 2015], как правило, включающих вертикальное ПЭС. При этом необходимо осуществлять проецирование «вертикальных» оцениваемых параметров модели (прежде всего вертикального ПЭС) на текущие «наклонные» измерения. В этой связи функция преобразования (проекционный оператор) играет значительную роль и необходимо аккуратно подходить к ее выбору, чтобы избежать артефактов в получаемых рядах данных.

Целью настоящей работы является оценка функции преобразования, используемой в работах [Schaer, 1999; Yasyukevich et al., 2015] в различных регионах земного шара.

### Влияние наклонного фактора на точность определения ПЭС

Для указанных выше задач, используется следующий проекционный оператор [Schaer, 1999; Yasyukevich et al, 2015]:

$$S_i^j = \left[ \cos \left\{ \arcsin \left( \frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin \left[ \alpha (90 - \theta_i^j) \right] \right) \right\} \right]^{-1},$$

где  $R_E$  – радиус Земли,  $h_{\max}$  – высота тонкого сферического слоя (450 км),  $\theta_i^j$  – угол пролета спутника,  $\alpha$  – коэффициент (<1) введенный для улучшения точности восстановления ПЭС [Schaer, 1999]. Изначально коэффициент  $\alpha$  вводился для учета зависимости функции преобразования от высоты тонкого сферического слоя модельной ионосферы. Необходимость ввода коэффициента обусловлена тем, что обычный проекционный оператор на низких углах пролета спутника меняется быстрее, чем реальное наклонное ПЭС, вследствие этого происходит недооценка абсолютного вертикального ПЭС.

На рис. 1 представлено сравнение реальных измерений наклонного ПЭС (сплошная черная кривая), вычисленного по фазовым измерениям (с устраненной фазовой неоднозначностью и ДКЗ), и ПЭС, полученного путем проецирования вертикального ПЭС на наклонные лучи, с использованием выражения (1) при разных  $\alpha$ . Сравнение проводилось для трех регионов (среднеширотного, высокоширотного и экваториального). Для анализа использовались среднеширотная станция IRKJ (104.3° E, 52.2° N), арктическая станция THU2 (–70° W, 76.5° N) и экваториальная станция NTUS (103.6° E, 1.34° N). На рисунке видно, что наклонное ПЭС, полученное из вертикального с использованием выражения (1) при  $\alpha=1$  на низких углах пролета спутника, как и было отмечено выше, растет гораздо быстрее, чем реальное ПЭС. При введении коэффициента  $\alpha$  меньшего единицы, рост на низких углах замедляется.

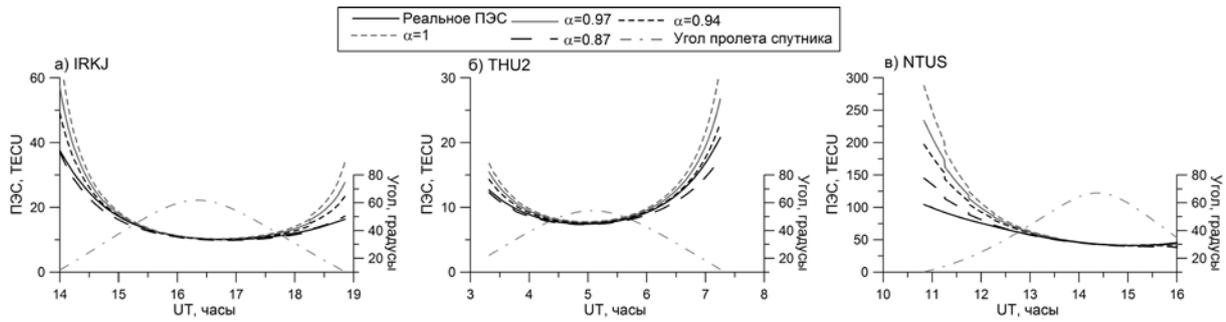


Рис. 1. ПЭС, вычисленное по фазовым измерениям (черная линия), и проецированное на наклонные лучи вертикальное ПЭС с использованием различных коэффициентов  $\alpha$  (1). Штрихпунктирной серой кривой показан угол пролета спутника.

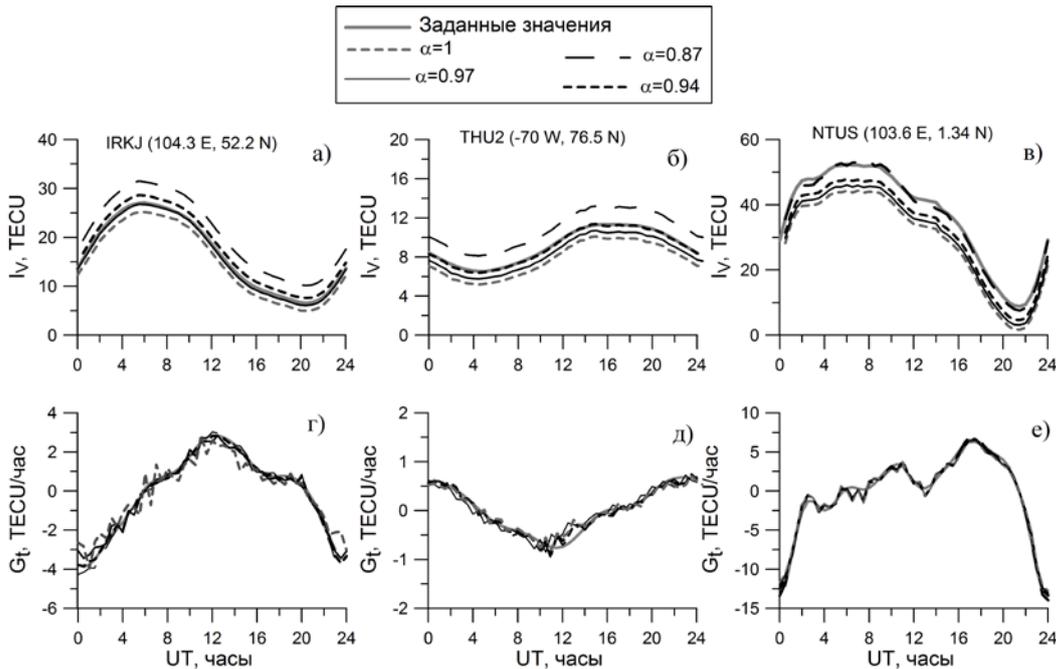


Рис. 2. Абсолютное вертикальное ПЭС (а–в) и временная производная ПЭС (г–е) восстановленные по смоделированным данным измерений GPS/ГЛОНАСС для станций IRKJ (а, г), THU2(б, д) и NTUS (в, е).

При этом наш анализ показывает, что в зависимости от широты станции необходимо использовать разный коэффициент  $\alpha$ , так как изменение наклонного ПЭС в зависимости от угла пролета спутника происходит с разной скоростью в разных регионах Земли. На рис. 1 видно, что для Арктической станции THU2 использование коэффициента  $\alpha=0.87$  на низких углах пролета спутника приводит к росту ПЭС более медленному, чем происходит рост реального наклонного ПЭС; а для экваториальной станции NTUS, при  $\alpha=0.87$ , рост проецированного вертикального ПЭС лучше соответствует росту реального ПЭС.

Для 3-х различных регионов (высокоширотного, среднеширотного, экваториального) было проведено моделирование восстановления абсолютного вертикального ПЭС и градиентов ПЭС с использованием различных коэффициентов  $\alpha$  на основе международной справочной модели IRI-2012. Моделирование проводилось для 10 апреля 2012 г., геомагнитная обстановка в этот день была спокойная ( $K_p=3$ ). Для этого для реальных станций, реальных углов «спутник-приемник» моделировались групповые и фазовые измерения ПЭС с учетом характерных шумов и срывов измерений. После чего на основе ал-

горитма, представленного в [Yasyukevich et al., 2015] определялась динамика вертикального ПЭС, градиентов и производных ПЭС и осуществлялось сравнение с исходными аналогичными параметрами, заданными моделью.

Результаты можно видеть на рис. 2, где представлено абсолютное вертикальное ПЭС (а, б, в) и временная производная ПЭС (г, д, е) восстановленные по смоделированным данным измерений GPS/ГЛОНАСС и заданные моделью значения ПЭС для станций IRKJ (а, г), THU2(б, д) и NTUS (в, е), с использованием различных коэффициентов  $\alpha$ . Для среднеширотного региона (рис. 2, а) при использовании проекционного оператора с коэффициентом  $\alpha=1$ , восстановленное абсолютное ПЭС отличается от заданного моделью в среднем на  $\Delta I=1.7$  TECU. При  $\alpha=0.97$  достигается наибольшая точность восстановления абсолютного ПЭС для станции IRKJ, отличие от заданных значений в среднем составляет  $\Delta I=0.1$  TECU. Для арктической станции THU2 (рис. 2, б) разница ПЭС минимальна при  $\alpha=0.94$  и составляет  $\Delta I=0.08$  TECU, для станции NTUS (рис. 2, в) –  $\alpha=0.87$ ,  $\Delta I=0.46$  TECU. Что находится в хорошем согласии со сделанными выше выводами (см. рис. 1) полученными по экспериментальным данным. При восстановле-

нии временной производной ПЭС (рис. 2, з, д, е) и пространственных градиентов существенных отличий при введении разных коэффициентов  $\alpha$  не наблюдается.

#### Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что в функции преобразования вертикального ПЭС в наклонный необходимо учитывать в том числе и широту станции. Для средних широт поправочный коэффициент  $\alpha=0.97$ , для экваториальных –  $\alpha=0.87$ , для арктических –  $\alpha=0.94$ . При использовании отличных от (1) функций преобразования поправочный коэффициент также должен вводиться тем или иным, но отличающимся, от представленного здесь, методом.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-05-00979 и при частичной поддержке Программы стратегического развития ИГУ (P212-ОУ-033)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли Иркутск: изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.

Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы М.: Физматлит, 2007. 336 с.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. A review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather Space Climate. 2013. V. 3. A27.

Mylnikova A.A., Yasyukevich Yu.V., Kunitsyn V.E., Padokhin A.M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases // Results in Physics. 2015. V. 5. P. 9–10.

Schaer S. Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System // Dissertation, Astronomical Institute, University of Berne, Berne, Switzerland, 25 March 1999. P. 205.

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // Results in Physics. 2015. V. 5. P. 32–33.

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

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия