
ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО ОДНОЧАСТОТНЫМ СПУТНИКОВЫМ РАДИОНАВИГАЦИОННЫМ ДАНЫМ GPS/ГЛОНАСС

ESTIMATING THE ABSOLUTE TOTAL ELECTRON CONTENT BASED ON SINGLE-FREQUENCY SATELLITE RADIO NAVIGATION GPS/GLONASS DATA

Ю.В. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru
Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия*

А.А. Мыльникова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, manna@mail.iszf.irk.ru*

В.Б. Иванов

*Иркутский государственный университет,
Иркутск, Россия, ivb@ivb.baikal.ru*

Yu.V. Yasyukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yasukevich@iszf.irk.ru
Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia*

A.A. Mylnikova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, manna@mail.iszf.irk.ru*

V.B. Ivanov

*Irkutsk State University,
Irkutsk, Russia, ivb@ivb.baikal.ru*

Аннотация. В работе представлен новый подход, позволяющий произвести оценку абсолютного вертикального и наклонного полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. Оценка основана на использовании одночастотных совместных измерений фазового и группового запаздывания сигнала GPS/ГЛОНАСС по данным отдельных измерительных станций. Качественно и количественно вертикальное ПЭС, рассчитанное по одночастотным измерениям, согласуется с аналогичными оценками, основанными на двухчастотных измерениях. Типичное значение разности вертикального ПЭС, полученного одночастотным и двухчастотным методом, для выбранных нами станций в основном не превышает величины ~ 1.5 TECU с СКО до ~ 3 TECU.

Ключевые слова: ионосфера, GPS, ГЛОНАСС, полное электронное содержание, одночастотные данные.

Abstract. We present a new technique for estimating the absolute vertical and slant total electron content (TEC). The estimation is based on single-frequency joint phase and pseudorange GPS/GLONASS measurements at single stations. Estimated single-frequency vertical TEC agrees qualitatively and quantitatively with the dual-frequency vertical TEC. For analyzed stations a typical value of the difference between the single-frequency vertical TEC and dual-frequency ones generally does not exceed ~ 1.5 TECU with RMS up to ~ 3 TECU.

Keywords: ionosphere, GPS, GLONASS, total electron content, single-frequency data.

ВВЕДЕНИЕ

Первые работы по оценке суточной динамики полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) появились в конце 1980-х гг. [Lanyi, Roth, 1988]. Развитие этого направления исследований, с одной стороны, привело к созданию глобальных ионосферных карт GIM (Global Ionosphere Maps) [Schaer et al., 1998a; Manucci et al., 1998; Hernandez-Pajares, 2009], что, в свою очередь, привело к значительному прогрессу в ионосферных исследованиях [Afraimovich et al., 2008; Liu et al., 2009; Hocke, 2008; Lean et al., 2011; Gulyaeva, Veselovsky, 2012; Cherniak et al., 2014] и, как следствие, к разработке новых ионосферных моделей [Ivanov et al., 2011]. С другой стороны, появилось большое число работ по определению вертикального ПЭС над отдельной станцией [Durmaz, Karslioglu, 2015; Themens et al., 2015; Ясюкевич и др., 2015], что предоставило большой объем данных

для улучшения ионосферных моделей [Гуляева, 2016; Themens, Jayachandran, 2016].

В большинстве работ оценки ПЭС были выполнены на основе обработки данных двухчастотных (L1, L2) радионавигационных приемников. Алгоритм для одночастотных данных давно известен [Афраймович, Перевалова, 2006; Mayer et al., 2008], но широкого применения он не нашел вследствие высоких шумов групповых измерений [Куницын и др., 2007]. Хотя шумы групповых измерений достаточно высоки, тем не менее можно ожидать, что оценки ПЭС будут вполне адекватны за счет усреднения. В связи с этим представляется интересным изучить возможность определения ПЭС по данным одночастотной аппаратуры ГНСС. В 2012 г. [Schuler, Oladipo, 2012, 2014] реализовали схему определения вертикального ПЭС с использованием одночастотных измерений. К сожалению, в этих статьях не описан в деталях алгоритм определения ПЭС, поэтому сложно получить аналогичные ре-

зультаты. В 2014 г. нами был предложен алгоритм TauAbsTEC восстановления абсолютного вертикального ПЭС [Мильникова и др., 2014; Ясюкевич и др., 2015], а также его градиентов (линейных и квадратичных) и временных производных (первой и второй) по данным двухчастотных измерений отдельной станции GPS/ГЛОНАСС. С некоторыми незначительными изменениями данный алгоритм может быть применен и для работы с одночастотными данными. При этом, наряду с восстановлением абсолютного вертикального ПЭС, появляется возможность устранить имеющую место неоднозначность измерений ПЭС. В результате можно получить абсолютные измерения наклонного ПЭС вдоль лучей спутник–приемник, что может использоваться для решения прикладных задач коррекции влияния ионосферы на радиотехнические системы [Afraimovich, Yasyukevich, 2008; Forte, Aquino, 2011; Ovodenko et al., 2015].

В настоящей работе мы приводим методику определения абсолютного ПЭС, его градиентов и временных производных, а также устранения неоднозначности измерений для отдельных рядов наклонного ПЭС вдоль луча спутник–приемник по одночастотным измерениям.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ОДНОЧАСТОТНОЙ СТАНЦИИ

Для определения абсолютного ПЭС, его градиентов и временных производных, а также для устранения неоднозначности измерений для рядов наклонного ПЭС вдоль луча спутник–приемник по данным отдельной станции GPS/ГЛОНАСС был использован следующий алгоритм, аналогичный алгоритму, используемому для двухчастотных наблюдений [Ясюкевич и др., 2015].

1. Вычисление наклонного ПЭС ($I_{P\phi}$) по одновременным групповым и фазовым измерениям:

$$I_{P\phi} = \frac{1}{2} \frac{f_1^2}{40.308} [(P_1 - L_1 \lambda_1) + K + aLP], \quad (1)$$

где f_1 — основная рабочая частота ГНСС (GPS, ГЛОНАСС или др.); P_1 — дополнительный путь радиосигнала, обусловленный групповым запаздыванием в ионосфере, вычисляется по P1- или по S1-коду, м; $L_1 \lambda_1$ — дополнительный путь радиосигнала, обусловленный фазовым запаздыванием в ионосфере, м; L_1 — число оборотов фазы на основной частоте ГНСС; λ_1 — длина волны, м; K — постоянная величина, определяемая неоднозначностью фазовых измерений и временем распространения сигнала в аппаратуре спутника и приемника; aLP — суммарные шумы фазовых и групповых измерений на основной частоте. Используется отсечка по углу возвышения 10° . Одновременно с вычислением рядов ПЭС рассчитываются углы возвышения и азимуты спутников. Расчет производится как для данных GPS, так и для данных ГЛОНАСС, и в дальнейшем не делается различий между данными GPS и ГЛОНАСС.

2. Разделение рядов данных на непрерывные по времени интервалы. Данный этап является достаточно важным, поскольку фазовая неоднозначность при разрыве данных, как правило, меняется. Максимальная длина рядов ограничена временем наблюдения спутников и может достигать ~ 8 ч. Минимальная длина непрерывного интервала выбиралась условно. В реализованном алгоритме ряд с 30-секундным разрешением должен включать не менее 10 измерений.

3. Детектирование и устранение влияния выбросов и срывов сопровождения сигнала в данных ПЭС [Blewitt, 1990].

4. Оценка абсолютного вертикального ПЭС, его градиентов, временных производных с привлечением простой модели измерений. Одновременно осуществляется оценка неоднозначности измерений K . Параметры модели определяются на основе минимизации среднеквадратичного отклонения (СКО) экспериментальных и модельных данных (см. далее).

5. Устранение неоднозначности в данных наклонного ПЭС, полученного в п. 3.

На рис. 1 приведены исходные (без устранения неоднозначности и устранения выбросов) ряды наклонного ПЭС, полученные по одночастотным (серая кривая) и двухчастотным (черная кривая) измерениям на станции NRC1 (45.5° N, 104.4° W). Можно видеть, что ряд ПЭС, полученный по одночастотным данным, характеризуется высоким уровнем шума. Тем не менее форма рядов схожа, что вполне ожидаемо при условии корректности измерений приемником и отсутствия сильного ухода часов приемника. Шумы измерений, при их некоррелированности и отсутствии систематической составляющей, не должны сыграть большой роли, так как при минимизации СКО решение должно сходиться к оптимальному.

В общем виде модель измерений наклонного ПЭС I_M имеет следующую форму:

$$I_M = S_j^i I_V(\phi, l, t) + I_{K,j}, \quad (2)$$

где ϕ — географическая широта ионосферной точки — точки пересечения луча спутник–приемник с ионосферой на высоте 450 км, l — географическая долгота ионосферной точки. Индекс i ставится в соответ-

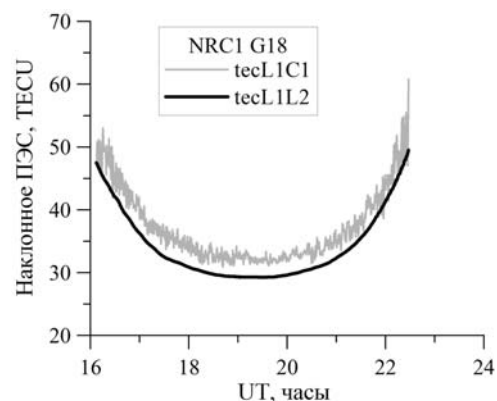


Рис. 1. Ряд наклонного ПЭС, полученный по одночастотным (серая кривая) и двухчастотным (черная кривая) измерениям на станции NRC1 (45.5° N, 104.4° W) по данным спутника GPS G18

вии с дискретным временем измерения, j — в соответствии с номером непрерывного интервала (отдельный для каждого спутника и каждого непрерывного интервала), I_V — абсолютное вертикальное значение ПЭС, I_K — константа для непрерывного интервала, обусловленная неоднозначностью фазовых измерений и задержкой сигнала в трактах спутника и приемника, S_j^i — наклонный фактор в приближении тонкой однослойной ионосферы.

В настоящей статье мы остановились на используемом в работе [Ясюкевич и др., 2015] наклонном факторе

$$S_j^i = \left[\cos \left\{ \arcsin \left(\frac{R_E}{R_E + h_{\max}} \sin[\alpha(90 - \theta_j^i)] \right) \right\} \right]^{-1}, \quad (3)$$

где R_E — радиус Земли, h_{\max} — высота тонкого сферического слоя (450 км), $\alpha=0.97$, θ_j^i — угол возвышения спутника.

Используя разложение в ряд Тейлора в точке (ϕ_0, l_0, t_0) , можно записать

$$I_V(\phi, l, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\Delta\phi)^m (\Delta l)^n (\Delta t)^k}{m!n!k!} \frac{\partial^{m+n+k} I_V}{\partial \phi^m \partial l^n \partial t^k}, \quad (4)$$

где $\Delta\phi$ — разница по широте между координатами ионосферной точки и станции ϕ_0 ; Δl — разница по долготе между координатами ионосферной точки и станции l_0 ; Δt — разница между временем измерения и временем t_0 , для которого осуществляется расчет.

Ограничиваясь первыми тремя членами [Ясюкевич и др., 2015], получим

$$\begin{aligned} I_M = S_j^i [I_V(\phi_0, l_0, t_0) + G_\phi \Delta\phi_j^i + \\ + G_{q_\phi} (\Delta\phi_j^i)^2 + G_l \Delta l_j^i + G_{q_l} (\Delta l_j^i)^2 + \\ + G_t \Delta t_j^i + G_{q_t} (\Delta t_j^i)^2] + I_{K,j}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $G_\phi = \partial I_V / \partial \phi$, $G_l = \partial I_V / \partial l$, $G_{q_\phi} = \partial^2 I_V / \partial \phi^2$, $G_{q_l} = \partial^2 I_V / \partial l^2$ — линейные и квадратичные пространственные градиенты ПЭС; $G_t = \partial I_V / \partial t$ и $G_{q_t} = \partial^2 I_V / \partial t^2$ — первая и вторая производные по времени. Смешанными производными по пространству и времени можно пренебречь, если предположить, что характерные градиенты ПЭС за время, для которого выполняется расчет, меняются медленнее, чем само значение вертикального ПЭС.

Мы осуществляем одновременный расчет параметров за полные сутки для различных моментов времени t^k , решая согласованную систему уравнений. При этом для получения параметров для каждого момента времени t^k (моменты t_1 и t_2 на рис. 2) учитываются данные за интервал ± 1 ч относительно t^k (см. рис. 2). Стрелки на рис. 2 отмечают границы интервалов, относящихся к t_1 и t_2 . Интервал, который включает данные с 6 до 8 UT, относится к t_1 , с 7 до 9 UT — к t_2 . Как показало тестирование, разрешение по времени для оцениваемых параметров может составлять от нескольких часов до 10 мин. В настоящей работе мы приводим параметры с разрешением по времени 1 ч. Такой выбор обусловлен тем, что максимальное разрешение карт GIM составляет 1 ч.

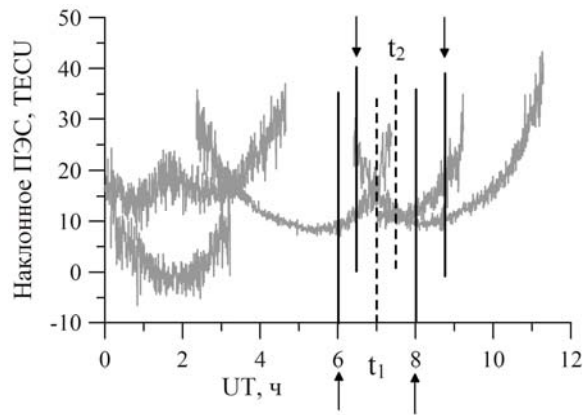


Рис. 2. Вклад измерений отдельных спутников в оценки вертикального ПЭС в различные моменты времени

Система уравнений получается с помощью минимизации функционала (6) для каждого выбранного момента времени t^k , для которого осуществляется оценка параметров по методу наименьших квадратов:

$$U^k = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \omega_i^{k,j} (I_{M_i}^j - I_{\text{exp}}^j)^2, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \omega_i^{k,j} \equiv \omega^k(t_j^i) = \Theta(t^k - t_j^i + \Delta t) \times \\ \times \Theta(t_j^i + \Delta t - t^k) \frac{1}{S_j^i} \left[1 + \left(\frac{\Delta t_j^{i,k}}{\Delta t} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где I_{exp} — экспериментальные одночастотные измерения наклонного ПЭС, полученные после этапа 3 алгоритма; Θ — функция Хэвисайда; t_j^i — i -й момент времени измерения j -го спутника; $\Delta t_j^{i,k}$ — разница по времени между текущим измерением и временем, для которого производится расчет t^k ; $\Delta t=1$ ч — максимальная разница по времени, при которой данные еще используются для оценки текущих ионосферных параметров. Наличие множителя $1/S$ в (7) приводит к тому, что наибольший вклад дают измерения на больших углах возвышения спутника.

Дифференцируя (6) по каждому из параметров модели (5) I_V^k , G_ϕ^k , G_l^k , $G_{q_\phi}^k$, $G_{q_l}^k$, G_t^k , $G_{q_t}^k$, I_K для каждого момента времени, получаем систему из $7J+M$ уравнений (J — число моментов времени на исследуемом интервале, для которых производится расчет, M — число непрерывных интервалов для всех наблюдаемых спутников).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для анализа мы использовали данные двухчастотных приемников сети IGS [Dow et al., 2009] в азиатском и американском секторах Северного полушария (станции IRKJ — 52.2° N, 104.3° E; NRC1 — 45.5° N, 104.4° W; YELL — 62.5° N, 115.5° W). Это позволило получить оценки ПЭС не только на основе алгоритма для одночастотных измерений, но и по аналогичной методике TauAbsTEC для двухчастотных одновременных фазовых и групповых измерений [Ясюкевич и др., 2015].

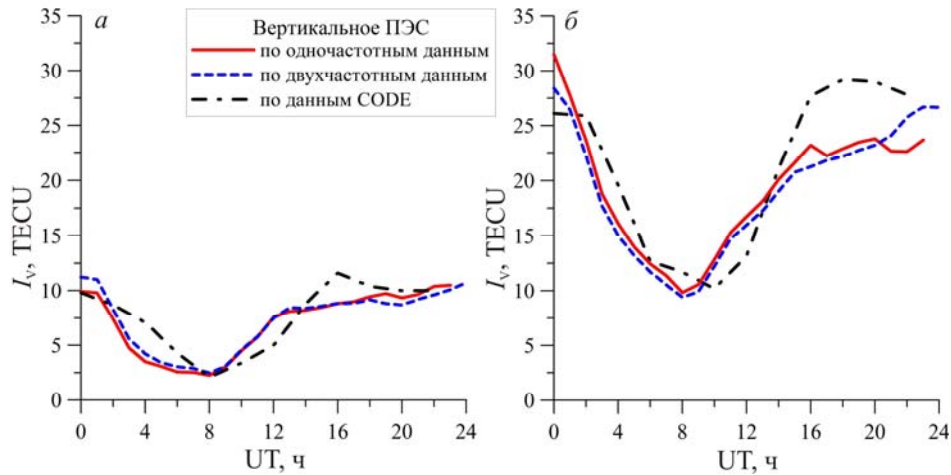


Рис. 3. Суточная динамика ПЭС над станцией NRC1 (45.5° N, 104.4° W) 20.05.09 (а) и 20.05.14 (б)

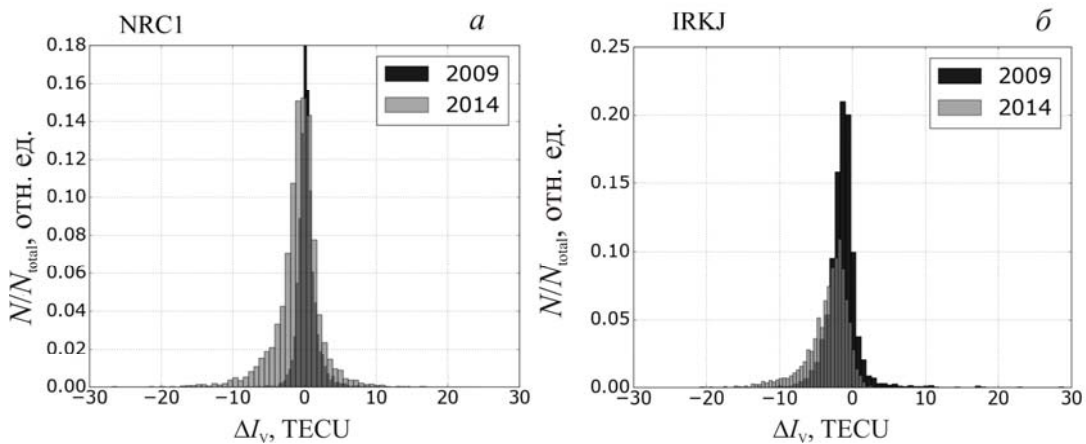


Рис. 4. Гистограмма распределения разности значений вертикального ПЭС, полученных по одночастотным и двухчастотным измерениям на станциях NRC1 (а) и IRKJ (б) для 2009 и 2014 гг.

На рис. 3 представлены результаты работы описанного выше алгоритма в сравнении с результатами, полученными с помощью TayAbsTEC. Приведены также данные вертикального ПЭС, полученные из глобальных ионосферных карт GIM лаборатории CODE [Schaer et al., 1998a], доступные на сайте [ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/] в формате IONEX [Schaer et al., 1998b].

Разрешение по времени составляет 1 ч для данных, полученных для одной станции, и 2 ч — для данных GIM.

Из рис. 3 можно видеть, что динамика вертикального ПЭС, полученного различными методами, качественно и количественно совпадает. В то же время, как, например, для 20.05.2014 (рис. 3, б), мы можем получить разницу более 2 TECU. В отдельных случаях возникают более значительные ошибки между одночастотными и двухчастотными данными. Различия с данными CODE, как правило, больше.

Чтобы оценить возможную ошибку, мы посчитали распределение разностей значений, получаемых по двухчастотным и одночастотным измерениям. Для этого для каждого из дней 2009 г. (минимум солнечной активности) и 2014 г. (максимум солнечной активности) на основе данных GPS/ГЛОНАСС-станций IRKJ и NRC1 были рас-

считаны ряды вертикального абсолютного ПЭС по одночастотным и двухчастотным измерениям и построена гистограмма распределения разности этих параметров, определенных двумя методами. Временное разрешение при расчете выбиралось 1 ч. Результаты представлены на рис. 4. Гистограммы нормированы на общее число измерений N_{total} .

Для станции NRC1 можно видеть систематическую составляющую ~ 0.5 TECU и разброс с СКО ~ 1.5 TECU для низкой солнечной активности и ~ -0.5 TECU и ~ 3.5 TECU — для высокой. Для станции IRKJ эти значения выше: систематическая составляющая ~ -1.5 TECU и СКО ~ 2.5 – 3 TECU. Стоит заметить, что величины расхождения соответствуют в целом шумам исходных измерений. Кроме того, эти ошибки (отклонения) соответствуют по порядку величины систематическим и случайным отклонениям карт GIM различных лабораторий. В связи с этим полученные отклонения могут считаться вполне приемлемыми. Причина расхождения, по всей видимости, заключается в негауссовой форме и/или смещении относительно нуля распределения ошибки групповых измерений. Данный вопрос требует детального изучения.

Достаточно важным является вопрос о работоспособности алгоритма в возмущенных условиях, а также о его работоспособности в высокоширотном

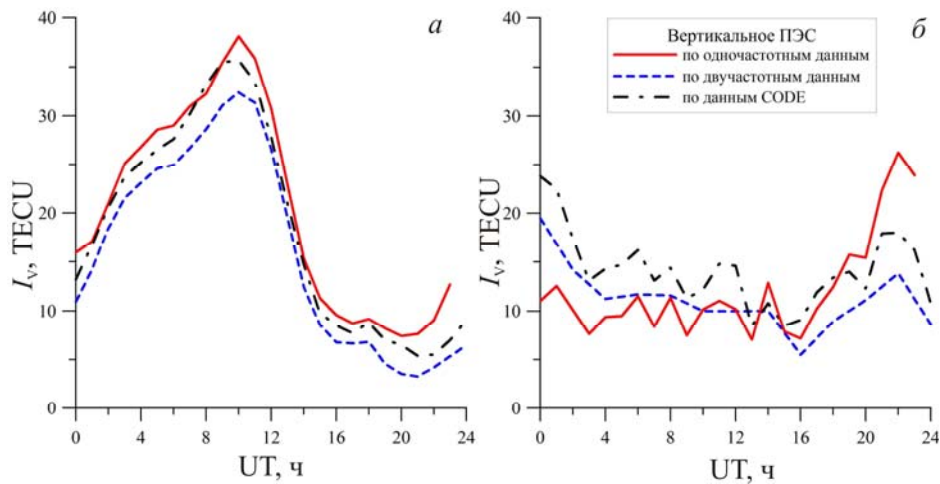


Рис. 5. Суточная динамика абсолютного вертикального ПЭС над среднеширотной станцией IRKJ (а) и высокоширотной станцией YELL (б) во время сильной магнитной бури 17 марта 2015 г.

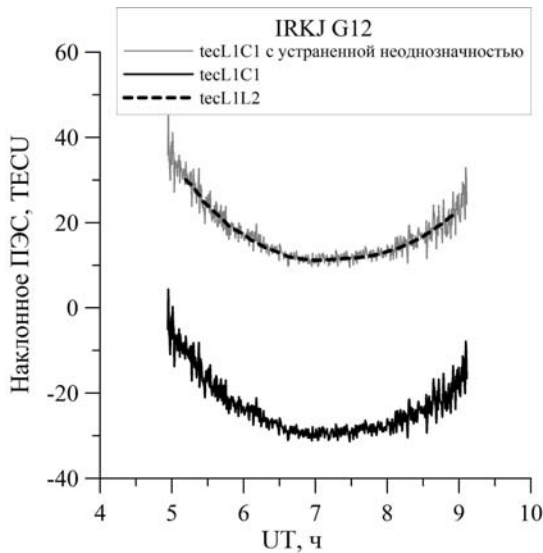


Рис. 6. Наклонное ПЭС вдоль луча спутник GPS G12 — станция IRKJ, 11.05.2009

регионе, в условиях нерегулярных интенсивных возмущений. Мы провели расчеты динамики вертикального ПЭС в условиях сильной магнитной бури 17 марта 2015 г. [Astafyeva et al., 2015]. На рис. 5 представлена суточная динамика абсолютного вертикального ПЭС над среднеширотной станцией IRKJ (52.2° N, 104.3° E) (а) и высокоширотной станцией YELL (62.5° N, 115.5° W) (б). Можно видеть, что для средних широт общая динамика восстанавливается достаточно хорошо. Для высокоширотного региона качество работы алгоритма существенно хуже, хотя алгоритм все еще может давать приемлемые результаты. При тестовом анализе в высокоширотном регионе для ряда станций не удалось получить адекватных оценок ПЭС. Возможность оценки ПЭС на высоких широтах определяется качеством данных, которое в целом на высоких широтах хуже, чем на средних. Срывы сопровождения фазы в условиях высоких шумов измерений сильно сказываются на качестве входных данных на этапе 4. Это может привести к невозможности получения адекватного решения. Развитие предложенной методики может идти в направлении улучшения пре-

добработки входных рядов ПЭС и уменьшения влияния срывов сопровождения фазы и шумов измерений.

Рисунок 6 дает представление о получении абсолютных значений наклонного ПЭС. Здесь представлены исходные одночастотные измерения ПЭС (черная сплошная кривая), значения ПЭС при одночастотных измерениях после устранения неоднозначности (серая кривая), а также двухчастотные измерения фазового ПЭС с устраненной фазовой неоднозначностью (штриховая кривая). На рисунке приведены данные для 11 мая 2009 г. Можно видеть, что для выбранного спутника измерения после коррекции являются положительно определенными, в отличие от исходных измерений. При этом фактически конечные измерения представляют собой «чистые» измерения без эффектов фильтрации. Рисунок показывает хорошее соответствие одночастотных и двухчастотных измерений наклонного ПЭС после устранения неоднозначности. После сглаживания одночастотные данные могут использоваться для коррекции ионосферных моделей или для решения ряда практических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение абсолютных значений ПЭС по одночастотным измерениям представляется, на наш взгляд, весьма перспективным для развития мониторинга ионосферы, особенно на территории Российской Федерации, где число двухчастотных приемников не так велико, как, например, в Японии или США. Как показал наш анализ, одночастотные измерения вертикального ПЭС лишь незначительно уступают в качестве измерениям в двухчастотном режиме.

Некоторое ограничение на использование данной методики для одночастотной аппаратуры GPS/ГЛОНАСС налагает то, что качество фазовых и групповых измерений неспециализированными приемниками может в целом быть ниже, чем специализированной аппаратурой IGS. В связи с этим в дальнейшем предполагается провести оценку влияния уровня шумов на качество данных, а также сравнение шумовых характеристик специализированных и неспециализированных приемников.

Авторы выражают признательность Падохину А.М. за полезную дискуссию и ценные замечания. Мы благодарны сети IGS [Dow et al., 2009] за данные приемников GPS/ГЛОНАСС, используемые в работе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-35-00051, а также гранта № НШ-6894.2016.5 Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афраимович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.

Гуляева Т.Л. Модификация индексов солнечной активности в международных справочных моделях ионосферы IRI и IRI-Plas в связи с пересмотром ряда чисел солнечных пятен // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 59–68. DOI: 10.12737/20872.

Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 255 с.

Мильникова А.А., Ясюкевич Ю.В., Демьянов В.В. Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания в ионосфере по данным ГЛОНАСС/GPS // Солнечно-земная физика. 2014. Вып. 24. С. 70–77.

Ясюкевич Ю.В., Мильникова А.А., Куницын В.Е., Падохин А.М. Влияние дифференциальных кодовых задержек GPS/ГЛОНАСС на точность определения абсолютного полного электронного содержания ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. 2015. Т. 55, № 6. С. 790–796. DOI: 10.7868/S0016794015060176.

Afraimovich E.L., Yasyukevich Yu.V. Using GPS–GLONASS–GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1949–1962.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., et al. Global electron content: A new conception to track solar activity // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 2. P. 335–344. DOI: 10.5194/angeo-26-335-2008.

Astafyeva E., Zakharenkova I., Foerster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120, N 10. P. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.

Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data // Geophys. Res. Lett. 1990. V. 17. P. 483–492.

Cherniak I., Zakharenkova I., Krankowski A. Approaches for modeling ionosphere irregularities based on the TEC rate index // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66. P. 165. DOI: 10.1186/s40623-014-0165-z.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: 10.1007/s0019000803003.

Durmaz M., Karlioglu M.O. Regional vertical total electron content (VTEC) modeling together with satellite and receiver differential code biases (DCBs) using semi-parametric multivariate adaptive regression B-splines (SP-BMARS) // J. Geodesy. 2015. V. 89, iss. 4. P. 347–360. DOI 10.1007/s00190-014-0779-8.

Forte B., Aquino M. On the estimate and assessment of the ionospheric effects affecting low frequency radio astronomy measurements // Proc. 30th URSI General Assembly and Scientific Symp. 2011. P. 1–4.

Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S. Two-phase storm profile of global electron content in the ionosphere and plasmasphere of the Earth // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A09324. DOI: 10.1029/2012JA018017.

Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: A reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. 2009. V. 83: Special IGS Issue. P. 263–275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.

Hocke K. Oscillations of global mean TEC // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. A04302. DOI: 10.1029/2007JA012798.

Ivanov V.B., Gefan G.D., Gorbachev O.A. Global empirical modelling of the total electron content of the ionosphere for satellite radio navigation systems // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2011. V. 73. P. 1703–1707.

Lanyi G.E., Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and Beacon satellite observations // Radio Sci. 1988. V. 23, N 4. P. 483–492. DOI: 10.1029/rs023i004p00483.

Lean J.L., Emmert J.T., Picone J.M., Meier R.R. Global and regional trends in ionospheric total electron content // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A00H04. DOI: 10.1029/2010JA016378.

Liu L., Wan W., Ning B., Zhang M.-L. Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps // J. Geophys. Res. 2009. V. 114. A06308. DOI: 10.1029/2009JA014244.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, iss. 3. P. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.

Mayer C., Jakowski N., Beckheirich J., Engler E. Mitigation of the ionospheric range error in single-frequency GNSS applications // Proc. 21st Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008), Savannah, GA. 2008. P. 2370–2376.

Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // Adv. Space Res. 2015. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.017.

Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // Proc. IGS AC Workshop. Darmstadt, Germany, 1998a. P. 307–320.

Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The ionosphere map exchange format Version 1 // Proc. IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany. 1998b. P. 233–247.

Schuler T., Oladipo O.A. Single-Frequency GNSS Ionospheric Delay Estimation — VTEC Monitoring with GPS, GALILEO and COMPASS: 1st edition. Lulu Press, 2012.

Schuler T., Oladipo O.A. Single-Frequency single-site VTEC retrieval using the NeQuick2 ray tracer for obliquity factor determination // GPS Solution. 2014. V. 18. P. 115–122. DOI: 10.1007/s10291-013-0315-y.

Themens D.R., Jayachandran P.T. Solar activity variability in the IRI at high latitudes: Comparisons with GPS total electron content // J. Geophys. Res. Space Phys. 2016. V. 121. P. 3793–3807. DOI: 10.1002/2016JA022664.

Themens D.R., Jayachandran P.T., Langley R.B. The nature of GPS differential receiver bias variability: An examination in the polar cap region // J. Geophys. Res. Space Phys. 2015. V. 120. P. 8155–8175. DOI: 10.1002/2015JA021639.

URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> (дата обращения 12 декабря 2016 г.).

REFERENCES

Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS-monitoring verkhnnei atmosfery Zemli* [GPS-monitoring of the Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, 2006, 480 p. (In Russian).

Afraimovich E.L., Yasyukevich Yu.V. Using GPS–GLONASS–GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 15, pp. 1949–1962.

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasyukevich Y.V., Zhivetiev I.V. Global electron content: A new conception to track solar activity. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, no. 2, pp. 335–344. DOI: 10.5194/angeo-26-335-2008.

Astafyeva E., Zakharenkova I., Foerster M. Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: a global multi-instrumental overview. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, no. 10, pp. 9023–9037. DOI: 10.1002/2015JA021629.

Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data. *Geophys. Res. Lett.* 1990. vol. 17, pp. 483–492.

Cherniak I., Zakharenkova I., Krankowski A. Approaches for modeling ionosphere irregularities based on the TEC rate index. *Earth, Planets and Space.* 2014, vol. 66, p. 165. DOI: 10.1186/s40623-014-0165-z.

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geodesy.* 2009, vol. 83, pp. 191–198. DOI: 10.1007/s0019000803003.

Durmaz M., Karslioglu M.O. Regional vertical total electron content (VTEC) modeling together with satellite and receiver differential code biases (DCBs) using semi-parametric multivariate adaptive regression B-splines (SP-BMARS). *J. Geodesy.* 2015, vol. 89, iss. 4, pp. 347–360. DOI 10.1007/s00190-014-0779-8.

Forte B., Aquino M. On the estimate and assessment of the ionospheric effects affecting low frequency radio astronomy measurements. *30th URSI General Assembly and Scientific Symp.* 2011, pp. 1–4.

Gulyaeva T.L. Modification of the solar activity indices in the International Reference Ionosphere IRI and IRI-Plas models due to recent revision of sunspot number time. *Solnechno-Zemnaya Fizika* [Solar-Terrestrial Phys.]. 2016, vol. 2, no. 3, pp. 59–68. DOI: 10.12737/20872. (In Russian).

Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S. Two-phase storm profile of global electron content in the ionosphere and plasmasphere of the Earth. *J. Geophys. Res.* 2012, vol. 117, A09324. DOI: 10.1029/2012JA018017.

Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Orus R., 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. Geophys.* 2009, vol. 83: *Special IGS Issue*, pp. 263–275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1.

Hocke K. Oscillations of global mean TEC. *J. Geophys. Res.* 2008, vol. 113, A04302. DOI: 10.1029/2007JA012798.

Ivanov V.B., Gefan G.D., Gorbachev O.A. Global empirical modelling of the total electron content of the ionosphere for satellite radio navigation systems. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 73, pp. 1703–1707.

Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. *Radio-tomografiya ionosfery* [Radio Tomography of the Ionosphere]. Moscow, Fizmatlit publ., 2007, 255 p. (In Russian).

Lanyi G.E., Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using Global Positioning System and Beacon satellite observations. *Radio Sci.* 1988, vol. 23, no. 4, pp. 483–492. DOI: 10.1029/rs023i004p00483.

Lean J.L., Emmert J.T., Picone J.M., Meier R.R. Global and regional trends in ionospheric total electron content. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A00H04. DOI: 10.1029/2010JA016378.

Liu L., Wan W., Ning B., Zhang M.-L. Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps. *J. Geophys. Res.* 2009, vol. 114, A06308. DOI: 10.1029/2009JA014244.

Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.H., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements. *Radio Sci.* 1998. vol. 33, iss. 3, pp. 565–582. DOI: 10.1029/97RS02707.

Mayer C., Jakowski N., Beckheinrich J., Engler E. Mitigation of the ionospheric range error in single-frequency GNSS applications. *Proc. 21st Intern. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2008)*. Savannah, GA. 2008, pp. 2370–2376.

Mylnikova A.A., Yasyukevich Y.V., Demyanov V.V. Estimating the vertical total electron content absolute value of the ionosphere from the GPS/GLONASS. *Solnechno-Zemnaya Fizika* [Solar-Terrestrial Phys.]. 2014, iss. 24, pp. 70–77. (In Russian).

Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results. *Adv. Space Res.* 2015. DOI: 10.1016/j.asr.2015.05.017.

Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere. *Proc. IGS AC Workshop*. Darmstadt, Germany, 1998a, pp. 307–320.

Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The ionosphere map exchange format. Version 1. *Proc. IGS AC Workshop*. Darmstadt, Germany, 1998b, pp. 233–247.

Schuler T., Oladipo O.A. *Single-frequency GNSS ionospheric delay estimation — VTEC monitoring with GPS, GALILEO and COMPASS*: 1st edition. Lulu Press, 2012. ISBN 978-1-4716-4225-8.

Schuler T., Oladipo O.A. Single-frequency single-site VTEC retrieval using the NeQuick2 ray tracer for obliquity factor determination. *GPS Solution.* 2014, vol. 18, pp. 115–122. DOI: 10.1007/s10291-013-0315-y.

Themens D.R., Jayachandran P.T. Solar activity variability in the IRI at high latitudes: Comparisons with GPS total electron content. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2016, vol. 121, pp. 3793–3807. DOI:10.1002/2016JA022664.

Themens D.R., Jayachandran P.T., Langley R.B. The nature of GPS differential receiver bias variability: An examination in the polar cap region. *J. Geophys. Res. Space Phys.* 2015, vol. 120, pp. 8155–8175. DOI: 10.1002/2015JA021639.

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Kunitsyn V.E., Padokhin A.M. Influence of GPS/GLONASS differential code biases on the determination accuracy of the absolute total electron content in the ionosphere. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2015, vol. 55, no. 6. pp. 763–769 DOI: 10.1134/S001679321506016X.

URL: <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/> (accessed December 12, 2016).