



АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЛОКАЛЬНОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПО ДАННЫМ GPS/ГЛОНАСС ПРИЕМНИКА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Э. М. Дмитриев¹, А. В. Гурьев¹, Е. В. Климанова¹, Н. В. Шевченко¹

Представлен алгоритм оценки полного электронного содержания ионосферы над точкой наблюдения по сигналам спутников глобальных навигационных систем в режиме реального времени. Приведен пример реализации алгоритма в программной оболочке базы данных ГО «Борок» ИФЗ РАН с использованием данных измерений двухчастотного GPS/ГЛОНАСС приемника Leica GX1220+ с высокоточной антенной Leica AR25, входящего в обсерваторский измерительный комплекс.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ, GPS, ГЛОНАСС, ИОНОСФЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ионосферных процессов с использованием данных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), начатые более 20 лет назад [1, 2], в настоящее время переживают свой расцвет [3–7]. Развитие глобальных и региональных сетей базовых станций ГНСС, крупнейшей из которых является сеть международной службы ГНСС (International GNSS Service) IGS, позволило получать на основе данных зондирования ионосферы сигналами ГНСС карты полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы. В частности, по данным сети IGS рассчитываются глобальные ионосферные карты (GIM) [8–9]. Однако, для регионов с неплотной сетью базовых станций IGS, к которым пока относится и Россия, представленные в картах GIM значения ПЭС не вполне достоверны.

Применение методов радиотомографии ионосферы для оценки локального ПЭС в регионе станции также требует достаточно плотной региональной сети станций [10]. По-видимому, наиболее достоверные оценки ПЭС могут быть получены по локальным измерениям ГНСС-приемников. Наиболее сложной задачей при этом является учет систематических ошибок, вызванных неопределенностью во временах задержки передачи сигналов ГНСС в трактах приемника и передатчика, называемых дифференциальными кодовыми задержками (ДКЗ). Оценки ДКЗ необходимо проводить одновременно с оценкой ПЭС [11, 12]. В работе [13] развит метод совместной оценки ПЭС и ДКЗ, основанный на разложении в точке наблюдения зависимости ПЭС от координат и времени в ряд Тэйлора. В настоящей работе предложен использующий данный подход алгоритм, реализованный в программной оболочке базы данных ГО «Борок» ИФЗ РАН и позволяющий получать оценки ПЭС непосредственно над точкой наблюдения в режиме реального времени.

¹ Дмитриев Эльдар Михайлович, ученый секретарь, ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)241-96, e-mail: eldar@borok.yar.ru
¹ Гурьев Алексей Владимирович, инженер-исследователь, ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)243-61, e-mail: sodar@borok.yar.ru
¹ Климанова Екатерина Вадимовна, инженер, ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)243-61, e-mail: klimanova@borok.yar.ru
¹ Шевченко Наталья Владимировна, инженер, ГО «Борок» ИФЗ РАН, (48547)243-61, e-mail: shevchenko@borok.yar.ru

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Получение ПЭС по данным спутника ГНСС, предполагает знание координат точки пересечения трассы сигнала спутника с ионосферой, которую в первом приближении можно считать бесконечно тонким сферическим слоем. При этом высота ионосферы обычно варьируется от 300 км до 450 км, наиболее употребительна величина высоты ионосферы 400 км [14, 15]. В качестве входных данных для расчета координат точки пересечения трассы сигнала спутника с ионосферой алгоритм использует суточные файлы формата sp3 (Standard Product 3) [16], содержащие декартовы координаты спутников GPS и ГЛОНАСС в Международной земной системе отсчета.

Пусть спутник находится в точке S с координатами (X_S, Y_S, Z_S) , приемник — в точке R с координатами (X_R, Y_R, Z_R) , и задано расстояние R_I от ионосферы до центра масс Земли O , представляющего собой начало отсчета. Тогда, координаты точки I , в которой пересекается с ионосферой прямая RS , проходящая через приемник и спутник, могут быть представлены в виде

$$X_I = X_R + \xi(X_S - X_R), \quad Y_I = Y_R + \xi(Y_S - Y_R), \quad Z_I = Z_R + \xi(Z_S - Z_R), \quad (1)$$

где параметр ξ находится из решения квадратного уравнения

$$(\xi(X_S - X_R) + X_R)^2 + (\xi(Y_S - Y_R) + Y_R)^2 + (\xi(Z_S - Z_R) + Z_R)^2 = R_I^2. \quad (2)$$

Долгота λ_I и широта φ_I для точки I вычисляются по известным формулам перехода от декартовой системы координат к сферической:

$$\lambda_I = \begin{cases} \arctg(\sqrt{X_I^2 + Y_I^2}/Z_I), & Z_I > 0; \\ \arctg(\sqrt{X_I^2 + Y_I^2}/Z_I) + \pi, & Z_I < 0; \\ \pi/2, & Z_I = 0; \end{cases} \quad \varphi_I = \begin{cases} \arctg(Y_I/X_I), & X_I > 0; \\ \arctg(Y_I/X_I) + \pi, & X_I < 0, Y_I \geq 0; \\ \arctg(Y_I/X_I) - \pi, & X_I < 0, Y_I < 0; \\ \pi/2, & X_I = 0, Y_I > 0; \\ -\pi/2, & X_I = 0, Y_I < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Для корректности последующих расчетов отклонение направления от ионосферной точки I на приемник R от вертикали должно быть не слишком большим. То есть фактор наклона трассы сигнала спутника, задаваемый как

$$F = \cos OIR = \frac{(\vec{IO} \cdot \vec{IR})}{|\vec{IO}| |\vec{IR}|} = \frac{X_I(X_I - X_R) + Y_I(Y_I - Y_R) + Z_I(Z_I - Z_R)}{\sqrt{(X_I^2 + Y_I^2 + Z_I^2)((X_I - X_R)^2 + (Y_I - Y_R)^2 + (Z_I - Z_R)^2)}, \quad (4)$$

должен быть близок к единице. В алгоритме оценки ПЭС для каждого измерения рассчитывается величина (4) и проверяется выполнение критерия

$$F \geq F_{\min}, \quad (5)$$

где F_{\min} — минимальный пригодный для расчетов косинус угла наклона трассы принимаемого со спутника сигнала, представляющий собой параметр алгоритма.

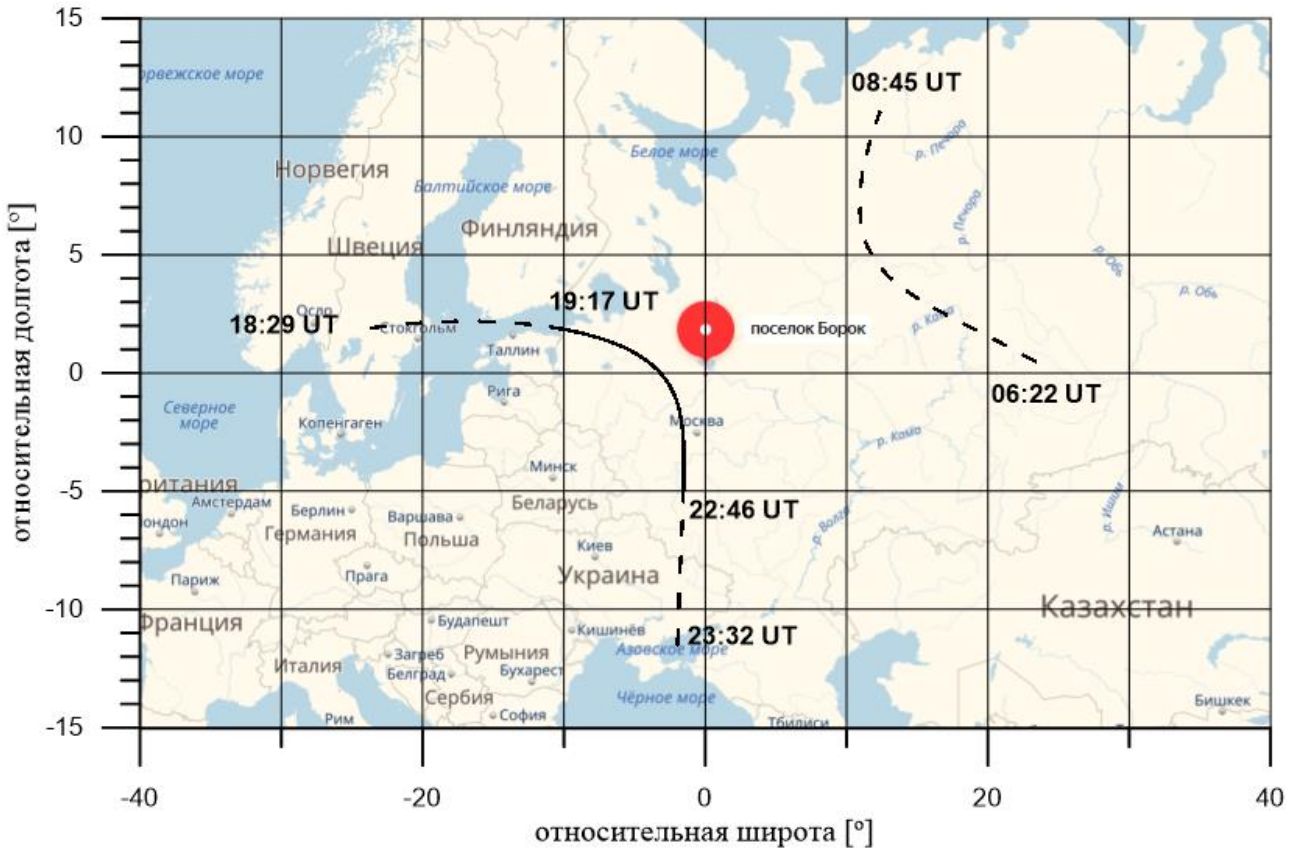


Рис. 1. Пример траекторий точек пересечения сигналов спутника с ионосферой при прохождении спутника GPS-01 над местоположением ГО «Борок» ИФЗ РАН 29.05.2018 г. Сплошная линия — для фактора наклона траектории GPS-сигнала $F \geq \cos(60^\circ)$, штриховая линия — для $F \geq \cos(75^\circ)$.

На рисунке 1. показано геометрическое место ионосферных точек, соответствующих прохождению одного из спутников GPS над местоположением ГО «Борок» ИФЗ РАН, удовлетворяющих критерию (5) для значений $F_{\min} = \cos(60^\circ) \approx 0,59$ и $F_{\min} = \cos(75^\circ) \approx 0,38$.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ НАКЛОННОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

В качестве входных данных для оценки ПЭС вдоль траектории распространения сигнала от спутника (наклонное ПЭС) используются файлы наблюдений формата RINEX (The Receiver Independent Exchange Format), формируемые по результатам наблюдений двухчастотного ГНСС-приемника и содержащие полученные для частот f_1 и f_2 (для ГНСС GPS $f_1 = 1575,42 \cdot 10^6$ Гц, $f_2 = 1227,6 \cdot 10^6$ Гц) результаты фазовых и кодовых измерений псевдодальностей для каждого сеанса связи приемника со спутником ГНСС.

Оценка наклонного ПЭС для каждого измерения по результатам фазовых измерений дается формулой [17, 18]

$$I_\Phi = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1 \lambda_1 - L_2 \lambda_2 + \sigma L + \delta L), \tag{6}$$

где I_Φ — оценка ПЭС по фазовым измерениям [TECU (Total Electron Content Unit) — единица измерения полного электронного содержания, равная 10^{16} эл./м²]; $\lambda_1 = c/f_1$ и $\lambda_2 = c/f_2$ — длины волн GPS-передатчиков [м]; $c = 299792458$ м/с — скорость света; $L_1 = \Delta\phi/2\pi$ и $L_2 = \Delta\phi/2\pi$ — фазовые измерения GPS-приемника, выполненные на частотах f_1 и f_2 соответственно [количество циклов 2π фазы]; σL — ошибка измерения фазы; δL — неоднозначность определения начальной фазы.

Аналогичная оценка ПЭС по результатам кодовых измерений [17]

$$I_P = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_2 - P_1 + \sigma P + \delta P), \tag{7}$$

где I_p — оценка ПЭС по кодовым измерениям псевдодальности [TECU]; P_1 и P_2 — результаты измерений псевдодальности, выполненные на частотах f_1 и f_2 соответственно [м]; σP — ошибка измерения псевдодальности [м]; $\delta P = c\Delta t$ — систематическая ошибка измерения псевдодальности, обусловленная ДКЗ; Δt — ДКЗ [с].

Фазовые измерения точнее кодовых ($\sigma L \ll \sigma P$), однако не абсолютны из-за неоднозначности определения начальной фазы δL . Кодовые измерения абсолютны, но сильно зашумлены, особенно для низких углов места спутника [10].

На этапе предобработки для каждого измерения вычисляются оценки наклонного ПЭС по фазовым и кодовым измерениям

$$I_{\Phi M}(t_n, k_n) = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (L_1(t_n, k_n)\lambda_1 - L_2(t_n, k_n)\lambda_2),$$

$$I_{PM}(t_n, k_n) = \frac{1}{40.308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_2(t_n, k_n) - P_1(t_n, k_n)),$$
(8)

где n — номер измерения, t_n — момент измерения, k_n — номер спутника ($1 < k_n < K$, где K — общее количество наблюдавшихся в течение суток спутников). В данных, соответствующих каждому из K спутников, для последующей обработки выделяются измерения, принадлежащие интервалам непрерывных наблюдений k -го спутника и удовлетворяющие условиям

$$N_B \leq n \leq N_E, \quad k_n = k, \quad |t_{N_E} - t_{N_B}| \geq T_M, \quad \exists m : N_B \leq m \leq N_E, \quad k_m = k, \quad |t_m - t_n| \leq T_S, \quad (9)$$

где N_B и N_E — номера измерений, отвечающие началу и концу интервала соответственно, k — номер спутника ($1 < k < K$), T_M — минимальная возможная длительность интервала, T_S — максимальная возможная длительность пропуска данных внутри интервала. Величины T_M и T_S задаются в качестве параметров алгоритма.

В каждом из интервалов непрерывных наблюдений (9) устраняются скачки и выбросы в полученных величинах $I_{\Phi M}$ с помощью алгоритма, предложенного в [19]. Далее оценка наклонного ПЭС находится с помощью выражения

$$I_M(t_n, k_n) = I_{\Phi M}(t_n, k_n) + \frac{1}{N} \sum_{n=N_B}^{N_E} (I_{PM}(t_n, k_n) - I_{\Phi M}(t_n, k_n)),$$
(10)

позволяющего устранить неоднозначность определения начальной фазы. Здесь N — общее число измерений по данным спутника k_n на рассматриваемом интервале непрерывных наблюдений. Пример вычисления наклонного ПЭС представлен на рис. 2.

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Будем искать вертикальное ПЭС в момент времени t_0 над точкой наблюдения, расположенной на долготе λ_0 и широте φ_0 , по данным, полученным предобработкой измерений на временном интервале $(t_0 - T) < t < (t_0 + T)$. Пусть для указанного интервала имеются результаты N измерений, причем $N \geq N_{\min}$ — минимальное необходимое для обеспечения приемлемой точности оценки количество измерений, являющееся параметром алгоритма. Пусть для n -го измерения ($n = 1, \dots, N$) заданы величины: $(t_0 + t_n)$ — момент измерения ($-T < t_n < T$), k_n — номер спутника ($1 < k_n < K$, где K — общее количество наблюдавшихся за время $(t_0 - T) < t < (t_0 + T)$ спутников), $(\lambda_0 + \lambda_n)$ — долгота ионосферной точки, $(\varphi_0 + \varphi_n)$ — широта ионосферной точки, F_n — фактор наклона трассы сигнала спутника, I_n — результат оценки наклонного ПЭС.

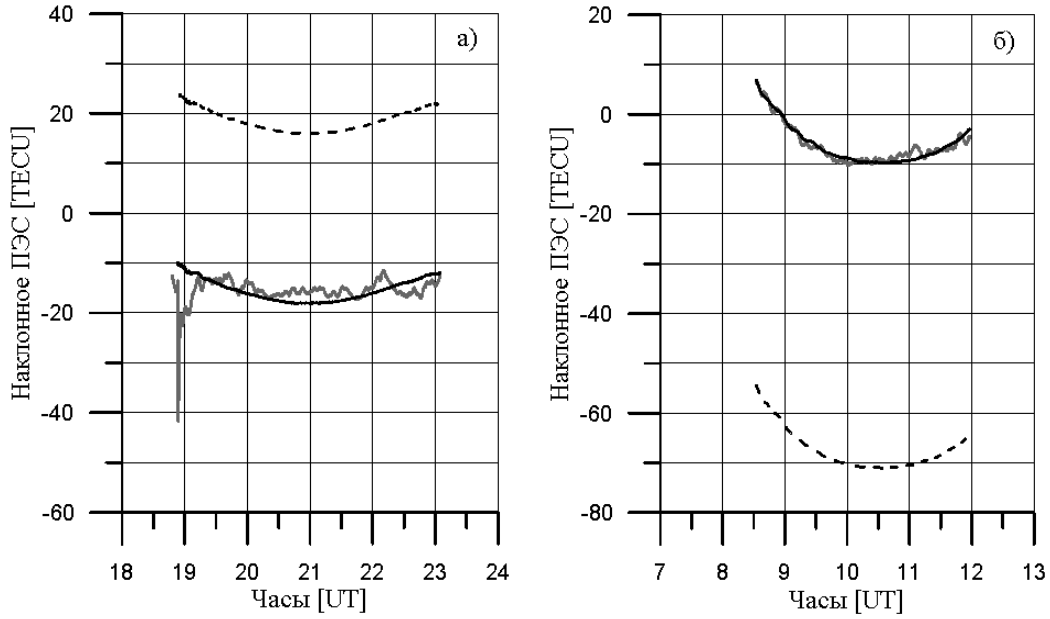


Рис. 2. Пример вычисления наклонного ПЭС по данным фазовых (штриховая кривая) и групповых (серая кривая) измерений 29.05.2018 г. для спутников GPS-01 (а) и GPS-06 (б). Сплошная черная кривая — результат устранения фазовой неоднозначности.

Разлагая зависимость вертикального ПЭС ионосферы $I(t, \lambda, \varphi)$ от времени t , широты φ и долготы λ в ряд Тэйлора в точке $(t_0, \lambda_0, \varphi_0)$ и сохраняя члены до второго порядка включительно, запишем невязку модельного и наблюдаемого вертикального ПЭС для n -го измерения в виде

$$r_n = I(t_n, \lambda_n, \varphi_n) - F_n(I_n - B_{k_n}) \approx \approx I_0 + C_t t_n + C_\lambda \lambda_n + C_\varphi \varphi_n + D_t t_n^2 + D_\lambda \lambda_n^2 + D_\varphi \varphi_n^2 + E_t \lambda_n \varphi_n + E_\lambda t_n \varphi_n + E_\varphi t_n \lambda_n - F_n(I_n - B_{k_n}), \quad (11)$$

где введены дифференциальные кодовые задержки B_1, \dots, B_K и параметры

$$I_0 = I(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad C_t = \frac{\partial I}{\partial t}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad C_\lambda = \frac{\partial I}{\partial \lambda}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad C_\varphi = \frac{\partial I}{\partial \varphi}(0, \lambda_0, \varphi_0),$$

$$D_t = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial t^2}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad D_\lambda = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial \lambda^2}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad D_\varphi = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 I}{\partial \varphi^2}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad (12)$$

$$E_t = \frac{\partial^2 I}{\partial \lambda \partial \varphi}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad E_\lambda = \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial \varphi}(0, \lambda_0, \varphi_0), \quad E_\varphi = \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial \lambda}(0, \lambda_0, \varphi_0),$$

подлежащие определению. Следуя методу наименьших квадратов определим их из условия минимума среднего значения квадрата невязок

$$R(I_0, C_t, C_\lambda, C_\varphi, D_t, D_\lambda, D_\varphi, E_t, E_\lambda, E_\varphi, B_1, \dots, B_K) = \overline{r^2} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N r_n^2. \quad (13)$$

Приравнивая производные функции (13) к нулю получим систему из $(K+10)$ линейных уравнений относительно параметров $I_0, C_t, C_\lambda, C_\varphi, D_t, D_\lambda, D_\varphi, I_0, E_t, E_\lambda, E_\varphi, B_1, \dots, B_K$. Причем значения дифференциальных кодовых задержек B_1, \dots, B_K могут быть выражены через остальные параметры как

$$B_k = \frac{\overline{F^2 I^k} - \overline{F}^k I_0 - C_t \overline{t F^k} - C_\lambda \overline{\lambda F^k} - C_\varphi \overline{\varphi F^k} - D_t \overline{t^2 F^k} - D_\lambda \overline{\lambda^2 F^k} - D_\varphi \overline{\varphi^2 F^k} - E_t \overline{\lambda \varphi F^k} - E_\lambda \overline{t \varphi F^k} - E_\varphi \overline{t \lambda F^k}}{\overline{F^2}^k}, \quad (14)$$

где введено обозначение для усреднения измерений, соответствующих k -му спутнику

$$\bar{y}^{-k} = \frac{1}{N} \sum_{k_n=k} y_n, \quad k=1 \dots K. \quad (15)$$

Подставляя выражения (14) для значений B_1, \dots, B_K в полученную систему имеем для вектора $x = (x_1, \dots, x_{10}) = (I_0, C_t, C_\lambda, C_\varphi, D_t, D_\lambda, D_\varphi, I_0, E_t, E_\lambda, E_\varphi)$ систему линейных уравнений

$$\sum_{j=1}^{10} a_{i,j} x_j = b_i, \quad i=1, \dots, 10, \quad (16)$$

где

$$a_{i,j} = \overline{t^{i+j} \lambda^{i_\lambda+j_\lambda} \varphi^{i_\varphi+j_\varphi}} - \sum_{k=1}^K \frac{\overline{t^{i+j} \lambda^{i_\lambda} \varphi^{i_\varphi} t^{j} \lambda^{j_\lambda} \varphi^{j_\varphi}}}{F^{2^k}}, \quad b_i = \overline{t^i \lambda^{i_\lambda} \varphi^{i_\varphi} F I} - \left(\sum_{k=1}^K \frac{\overline{t^i \lambda^{i_\lambda} \varphi^{i_\varphi} F^k}}{F^{2^k}} F^2 I \right), \quad (17)$$

$$i_t = p_t(i) = \begin{cases} 2, & i=5, \\ 1, & i=2, 9, 10, \\ 0, & i \neq 2, 5, 9, 10; \end{cases} \quad i_\lambda = p_\lambda(i) = \begin{cases} 2, & i=6, \\ 1, & i=3, 8, 10, \\ 0, & i \neq 3, 6, 8, 10; \end{cases} \quad i_\varphi = p_\varphi(i) = \begin{cases} 2, & i=7, \\ 1, & i=4, 8, 9, \\ 0, & i \neq 4, 7, 8, 9. \end{cases}$$

Решая численно систему (16) находим и значение $x_0 = I_0$ — оценку вертикального ПЭС над точкой наблюдения в момент времени t_0 .

ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМА

Представленный выше алгоритм реализован в программной оболочке базы данных ГО «Борок» ИФЗ РАН [21, 22]. Параметры алгоритма, используемые для оценки вертикального ПЭС: высота ионосферы $H_I = 400$ км, минимальный пригодный для расчетов косинус угла отклонения трассы принимаемого со спутника сигнала от вертикали $F_{\min} = \cos(60^\circ)$, минимальная возможная длительность временного интервала непрерывных наблюдений отдельного спутника $T_M = 5$ мин, максимальная возможная длительность пропуска данных внутри этого интервала $T_S = 5$ мин, длительность временного интервала для получения оценки вертикального ПЭС по данным GPS/ГЛОНАСС приемника $2T = 60$ мин (середина интервала, для которой рассчитывается ПЭС, привязана к началу часа), минимальное необходимое количество измерений на этом интервале $N_{\min} = 300$.

Файлы данных с координатами спутников ГНСС ГЛОНАСС и GPS для расчета координат точки пересечения трассы сигнала спутника с ионосферой в формате sp3 в автоматическом режиме скачиваются с сервера IGS (<ftp://igs.ensg.ign.fr>). Для расчетов используются временные ряды координат спутников для последнего доступного суточного интервала, интерполируемые на текущие сутки. Файлы текущих наблюдений в формате RINEX формируются программой BKG Ntrip Client (<https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>) с интервалом 1 ч по результатам наблюдений двухчастотного GPS/ГЛОНАСС приемника Leica GX1220+ с высокоточной антенной Leica AR25, входящего в обсерваторский измерительный комплекс ГО «Борок» ИФЗ РАН. Полученные в результате работы алгоритма оценки ПЭС над местоположением ГО «Борок» ИФЗ РАН сохраняются в базе данных в режиме реального времени с интервалом 60 мин. Доступ к оценкам ПЭС обеспечивается через веб-сайт базы данных (<http://geodata.borok.ru/database/gpstec/index>).

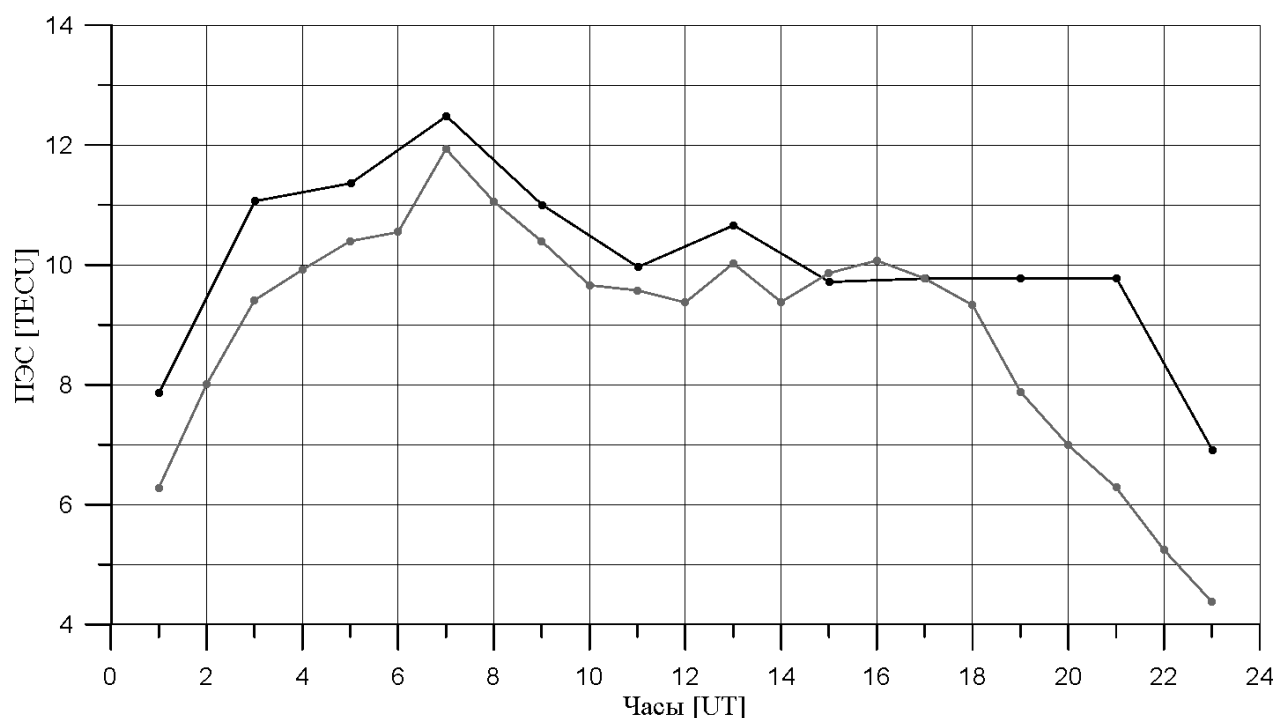


Рис. 3. Сравнение результатов оценки ПЭС над ГО «Борок» ИФЗ РАН по данным измерений GPS/ГЛОНАСС приемника (черная кривая) и по модели CODE (серая кривая) для 29.05.2018 г.

На рисунке 3 приведен пример сравнения рассчитанного при помощи представленного алгоритма ПЭС с интерполированными в местоположение ГО «Борок» ИФЗ РАН данными глобальных карт ПЭС, получаемых лабораторией CODG (<ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex>) по результатам наблюдений сети IGS с использованием разложения по сферическим гармоникам ПЭС как функции долготы и широты [8, 20]. Видно хорошее соответствие результатов расчета в режиме реального времени и данных глобальной карты ПЭС.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-07-01242).

ЛИТЕРАТУРА

1. Calais E., Minster J. B. GPS detection of an ionospheric perturbation following the January 17, 1994, Northridge earthquake // *Geoph. Res. Lett.* 1995. V. 22. p. 1045–1048.
2. Afraimovich E. L., Palamartchouk K. S., Perevalova N. P. GPS direct and inverse radiointerferometry - new methods of investigating Travelling Ionospheric Disturbances. // *Acta Geod. Geoph. Hung.* 1997. V. 32, N. 3–4. p. 469–479.
3. Afraimovich E. L., Yasukevich Yu. V. Using GPS-GLONASS-GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2008. V. 70. N. 15. p. 1949–1962. Doi:10.1016/j.jastp.2008.05.006.
4. 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. p. A06308. Doi:10.1029/2009JA014244.
5. Hayashi H. et al. Large-scale traveling ionospheric disturbance observed by superDARN Hokkaido HF radar and GPS networks on 15 December 2006 // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. p. A06309. Doi:10.1029/2009JA014297.
6. Ding F. et al. Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China. // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. p. A09327. Doi:10.1029/2011JA016545.
7. Otsuka Y. et al. GPS Observations of Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances over Europe. // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31. p. 163–172.
8. Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // *Proc. IGS AC Workshop*, February 9–11 1998. Darmstadt, Germany. 1998. p. 307–320.
9. Schaer S. Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System: Ph.D. Dissertation // *Astronomical Institute, University of Bern*. Berne, Switzerland, 1999. 228 p.
10. Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С. Радиотомография ионосферы. // Москва: Изд-во

- Физматлит, 2007. 255с.
11. Jin R., Jin Sh., Feng G. Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases // *GPS Solutions*. 2012. V. 16. p. 541–548. Doi:10.1007/s10291-012-0279-3.
 12. Li Z. et al. Two-step method for the determination of the differential code biases of COMPASS satellites // *J. Geod.* 2012. V. 86. p. 1059. Doi:10.1007/s00190-012-0565-4.
 13. Мыльникова А. А., Ясюкевич Ю. В., Демьянов В. В. Определение абсолютного вертикального полного электронного содержания в ионосфере по данным ГЛОНАСС/GPS // *Солнечно-земная физика: сборник научных трудов*. 2014. Вып. 24, № 137. с. 70–77.
 14. Camargo P. O., Monico J. F. G., Ferreira L. D. D. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users // *Earth Planets Space*. 2000. V. 52. p. 1083–1089.
 15. Jakowski N., Leitinger R., Ciarolo L. Behavior of large scale structures of the electron content as a key parameter for range errors in GNSS applications // *Ann. Geophys.* 2004. V. 47. p. 1031–1047.
 16. Remondi B. W. NGS Second Generation ASCII and Binary Orbit Formats and Associated Interpolated Studies // *Proceedings of the Twentieth General Assembly, International Union of Geodesy and Geophysics, Vienna, Austria, August 11–24. 1991. 28 pp.*
 17. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice* // New York: Wien: Springer-Verlag, 1992. 327 p.
 18. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли // Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСИЦ СО РАН, 2006. 480 с.
 19. Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data // *Geophys. Res. Lett.* 1990. N 17. P. 483–492.
 20. Mannucci A. J. et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33. N. 3. p. 565–582.
 21. Анисимов С. В., Дмитриев Э. М., Информационно-измерительный комплекс и база данных Геофизической обсерватории «Борок» РАН // М.: ОИФЗ РАН, 2003. 44 с.
 22. Anisimov S. V., Chulliat A., Dmitriev E. M. Information-measuring complex and database of mid-latitude Borok Geophysical Observatory // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2008. V. 10. ES3007. Doi:10.2205/2007ES000227.

ALGORITHM OF LOCAL VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT ESTIMATING FROM THE GPS/GLONASS RECEIVER DATA IN REAL TIME

E. M. Dmitriev, A. V. Guriev, E. V. Klimanova, N. V. Shevchenko

An algorithm of local vertical total electron content estimating over an observation point based on the signals of global navigation satellites in real time is presented. The algorithm is realized in Borok Geophysical Observatory Database software and uses data of two-frequency GPS/GLONASS Leica GX1220+ receiver with a high-precision Leica AR25 antenna, operating in a measuring complex of the Observatory.

KEYWORDS: TOTAL ELECTRON CONTENT, GPS, GLONASS, IONOSPHERE SOUNDING, COMPUTER TECHNIQUES