Интернет-сервис по созданию GPS/ГЛОНАСС карт полного электронного содержания ионосферы для Европейского региона

И.И. Шагимуратов, Ю.В. Черняк, И.Е. Захаренкова, Г.А. Якимова, Н.Ю. Тепеницина, И.И. Ефишов

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН им. Н.В. Пушкова Калининград, 236010, Россия E-mail: shagimuratov@mail.ru

В работе представлены описание и схема функционирования Интернет-сервиса для создания карт полного электронного содержания ионосферы (TEC – Total Electron Content). Разработанный программный комплекс осуществляет сбор, обработку данных и построение TEC карт для Европейского региона. В качестве входных данных используются двухчастотные GPS/ГЛОНАСС наблюдения в формате RINEX. Представлена методология восстановления абсолютной величины TEC по исходным измерениям задержек сигналов L_1/L_2 . Описан алгоритм определения задержек сигналов в аппаратуре спутника и приемника, необходимый для калибровки исходных групповых измерений. Для нахождения неоднозначности фазовых измерений предложен алгоритм совместной обработки групповых и фазовых измерений, который обеспечил получение абсолютной величины TEC. При формировании карт TEC используются одновременные фазовые наблюдения более 180 GPS станций европейской сети EPN. Карты TEC имеют временное разрешение 5 минут. Пространственное разрешение карт составляет $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ по широте и долготе, что позволяет детально исследовать структуру и динамику ионосферы во время различных геофизических событий. В качестве примера продемонстрирована динамика вариабельности ионосферного TEC над Европой во время солнечного затмения 20 марта 2015 г.

Ключевые слова: ионосфера, ГЛОНАСС, GPS, полное электронное содержание (TEC), карты TEC, интернет-сервис

Одобрена к печати: 26.12.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-197-209

Введение

Полное электронное содержание (TEC – Total Electron Content) является одним из ключевых параметров ионосферы. Информация о вариациях TEC используется в исследованиях физики ионосферы и ближнего космоса, а также ряда прикладных задач космической радиосвязи и навигации. Основным источником информации о TEC являются измерения задержек сигналов навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Полное электронное содержание определяется количеством свободных электронов вдоль пути электромагнитной волны между навигационным спутником и приемником. Стандартно TEC определяется как общее количество электронов вдоль трубки сечением один квадратный метр и выражается в специальных единицах, при этом 1 TECU = 10^{16} м⁻².

Космическая группировка в каждой системе насчитывает не мене 24 спутников и позволяет проводить диагностику ионосферы одновременно по всему земному шару. Измерения ТЕС обеспечиваются широко разветвленной международной сетью GPS станций, которых насчитывается более 4000. Над каждой станцией за сутки наблюдается более 30 пролетов спутников каждой из систем, что обеспечивает непрерывный мониторинг динамики ТЕС для реальных геофизических условий. Информация о вариациях ТЕС используется в исследованиях физики ионосферы и ближнего космоса (Афраймович, Перевалова, 2006), прежде всего — глобального анализа реакции ионосферы на геомагнитные возмущения, солнечные вспышки, затмения. Для анализа пространственно-временного поведе-

ния ионосферы наиболее востребованы карты TEC (Mannucci et al., 1998; Zhao et al., 2007; Liu et al., 2009, 2012). На сегодняшний день для этого чаще всего используются глобальные карты IGS Global Ionospheric Maps (GIMs) of TEC в IONEX формате (*ftp//:cddis.gsfc.nasa. gpv/gps/products/ionex*). Главным недостатком этих карт является низкое пространственное и временное разрешение. Карты GIM TEC строятся с разрешением 2,5 градуса по широте и 5 градусов по долготе, разрешение по времени – 2 часа.

Региональные карты ТЕС с высоким разрешением создаются разными группами исследователей для различных регионов – США, Европа, Япония, Канада, Турция (Yilmaz et al., 2009; Ghoddousi-Fard et al., 2011). Важно отметить, что разрабатываемые зарубежными коллективами региональные карты ТЕС представляются чаще всего только в виде графических файлов и, следовательно, не могут быть использованы для решения ряда задач широкого круга исследователей.

В данной работе представлены научные подходы, основные положения и методология, разработанная и используемая в Калининградском филиале ИЗМИРАН, на основе которой создан комплекс алгоритмов и программ, позволяющих определять ТЕС по данным GPS наблюдений. Изложены принципы использования двухчастотных измерений задержек сигналов спутниковых навигационных систем, получения абсолютных значений ТЕС, восстановления его суточного поведения над станцией наблюдения и построение региональных карт ТЕС.

Алгоритм восстановления абсолютной величины полного электронного содержания по GPS-наблюдениям

Двухчастотные измерения задержек сигналов спутников навигационной системы GPS позволяют выделить ионосферную часть задержки и, соответственно, определить абсолютное значение TEC на линии связи «приемник – спутник». Технология, базирующаяся на измерениях параметров GPS сигналов, обеспечивает измерение как групповых, так и фазовых задержек навигационных сигналов.

Измеренные групповые задержки GPS сигналов на трассе «приемник — спутник», выраженные через псевдодальности сигналов L_1 и $L_{2,}$ можно записать в виде (Шагимуратов и др., 1996, 2013):

$$P_1^i = D_0^i + I_1^i + S_{P1}^i + R_{P1}^i + \delta D_P^i,$$

$$P_2^i = D_0^i + I_2^i + S_{P2}^i + R_{P2}^i + \delta D_P^i,$$

где индексы 1 и 2 соответствуют задержкам для сигналов в частотных диапазонах L_1 и L_2 ; индекс i — номер спутника в системе GPS; P_1^i и P_2^i — псевдодальности в метрах для частот f_1 и f_2 сигналов L_1 и L_2 ; D_0^i — геометрическое расстояние между i-м спутником и приемником; I_I и I_2 — ионосферные задержки (поправки) на частотах f_1 и f_2 ; S_{P1}^i , S_{P2}^i — задержки в аппаратуре спутников для двух частот и R_{P1}^i , R_{P2}^i — задержки в приемнике; δD_P^i — частотно-незави-

симые задержки, к которым относятся тропосферная задержка, поправки к часам спутника и приемника и другие.

При этом предполагается, что траектории радиоволн обеих частот совпадают. Это предположение вполне обосновано, так как ионосферные задержки, связанные с искривлением траектории, являются величинами второго порядка малости. Для дифференциальной задержки получаем следующее выражение:

$$\Delta P^{i} = P_{2}^{i} - P_{1}^{i} = \Delta I^{i} + \left(S_{P2}^{i} - S_{P1}^{i}\right) + \left(R_{P2}^{i} - R_{P1}^{i}\right),\,$$

где ΔI — дифференциальная ионосферная задержка в метрах. Дифференциальные задержки в аппаратуре спутника $\Delta S^i = S_{P2}^i - S_{P1}^i$ и приемника $\Delta R^i = R_{P2}^i - R_{P1}^i$ не могут быть разделены, их можно объединить в одну аппаратурную задержку (аппаратурная поправка). С учетом этого замечания для дифференциальной задержки получаем следующее выражение:

$$\Delta P^i = \Delta I^i + A_P^i,\tag{1}$$

где $A_P^i = (S_{P2}^i - S_{P1}^i) + (R_{P2}^i - R_{P1}^i).$

Выражение (1) есть уравнение для дифференциальной задержки, в котором искомыми являются ионосферная задержка и поправки аппаратуры, а ΔP^i — измеряемая величина.

Ионосферная задержка пропорциональна интегральному содержанию на линии соединяющей приемник и спутник:

$$I = \frac{40.3}{f^2} \cdot \int N_e ds = \frac{40.3}{f^2} \cdot STEC,$$

 $rge\ STEC$ — наклонное полное электронное содержание электронов вдоль луча (наклонное содержание).

 $\Delta I = 40, 3 \cdot STEC \cdot \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2}\right)$ или $STEC = M \cdot \Delta I$,

где $M = \frac{1}{40,3} \cdot \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = 9,52 \cdot 10^{16} \ \text{м}^{-3}$ коэффициент, конвертирующий метры в единицу ТЕС (ТЕСU). С учетом этого (1) запишется в виде:

$$M \cdot \Delta P^i = STEC + M \cdot A_p^i. \tag{2}$$

Фазовые измерения, выраженные в метрах, по аналогии с групповыми можно представить в следующем виде:

$$\Phi_{1}^{*} = \lambda_{1} \cdot \Phi_{1} = D_{0}^{i} + I_{1}^{i} + \lambda_{1} \cdot N_{1}^{i} + S_{\Phi 1}^{i} + R_{\Phi 1}^{i} + \delta D_{\Phi}^{i},$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{2}^{*} = \boldsymbol{\lambda}_{2} \cdot \boldsymbol{\Phi}_{2} = \boldsymbol{D}_{0}^{i} + \boldsymbol{I}_{2}^{i} + \boldsymbol{\lambda}_{2} \cdot \boldsymbol{N}_{2}^{i} + \boldsymbol{S}_{\Phi2}^{i} + \boldsymbol{R}_{\Phi2}^{i} + \delta \boldsymbol{D}_{\Phi}^{i},$$

где — Φ_1 , Φ_2 — измеряемые значения фазы на частоте f_1 и f_2 ; λ_1 и λ_2 — длины волн; N_1 , N_2 — начальные фазы или фазовая неоднозначность для частот f_1 и f_2 ; S_{Φ} , R_{Φ} — фазовые задержки, возникающие в аппаратуре спутника и приемника.

Соответственно, для дифференциальной задержки получаем:

$$\begin{split} & \Delta \boldsymbol{\Phi}_{i}^{*} = \boldsymbol{\Phi}_{1}^{*} - \boldsymbol{\Phi}_{2}^{*} = \Delta \boldsymbol{I}_{1}^{i} + \left(\lambda_{1} \cdot \boldsymbol{N}_{1}^{i} - \lambda_{2} \cdot \boldsymbol{N}_{2}^{i}\right) + \left(\boldsymbol{S}_{\Phi 1}^{i} - \boldsymbol{S}_{\Phi 2}^{i}\right) + \left(\boldsymbol{R}_{\Phi 1}^{i} - \boldsymbol{R}_{\Phi 2}^{i}\right), \\ & \Delta \boldsymbol{\Phi}_{i}^{*} = \Delta \boldsymbol{I}_{1}^{i} + \boldsymbol{A}_{\Phi}^{i}; \qquad \boldsymbol{A}_{\Phi}^{i} = \left(\lambda_{1} \cdot \boldsymbol{N}_{1}^{i} - \lambda_{2} \cdot \boldsymbol{N}_{2}^{i}\right) + \left(\boldsymbol{S}_{\Phi 1}^{i} - \boldsymbol{S}_{\Phi 2}^{i}\right) + \left(\boldsymbol{R}_{\Phi 1}^{i} - \boldsymbol{R}_{\Phi 2}^{i}\right). \end{split}$$

В итоге приходим к выражению, подобному (2)

$$M \cdot \Delta \Phi^{*i} = STEC + M \cdot A_{\Phi}^{i} \tag{3}$$

Для пересчета наклонного электронного содержания STEC в вертикальное TEC используется модель ионосферы в виде бесконечно тонкого слоя, расположенного на расстоянии R+h, где - R радиус Земли, h - высота. С учетом этого связь STEC и вертикального TEC описывается простым геометрическим фактором: $STEC = TEC / \cos z$, где -z — зенитный угол луча на высоте слоя h. Зенитный угол z можно связать с зенитным углом z^* на земле, в точке расположения приемника: $\sin z = \frac{R}{R+h} \cdot \sin z^*$.

Высота слоя h обычно выбирается в пределах 350—450 км. Точка пересечения луча со сферическим слоем носит название подионосферной точки. Для вертикального ТЕС уравнение (2) и (3) в общем виде можно записать как:

$$M \cdot \Delta P^{i} = TEC / \cos z + M \cdot A_{p}^{i} \tag{4}$$

$$M \cdot \Delta \Phi^{*i} = TEC / \cos z + M \cdot A_{\Phi}^{i}. \tag{5}$$

Для пространственной привязки измерений, в том числе и определения зенитного угла, необходимо знать координаты спутника и приемника. Для определения координат спутника используется информация, которая содержится в навигационном сообщении, передаваемом самим спутником.

Определение аппаратурных задержек

В уравнении для групповых измерений (4) известными величинами являются измеренные дифференциальные задержки ΔP , искомыми — TEC и поправки для каждой пары «приемник — спутник». Общепринятый подход обработки GPS наблюдений заключается в совместном определении TEC и A_p по измерениям задержек по всем наблюдаемым спутникам над станцией на суточном интервале, на основе которых формируется суточный ход для отдельной станции. Необходимо отметить, что инструментальные поправки для спутника и приемника слабо меняются во времени и с достаточно высокой степенью точности их можно считать фиксированными в течение суток (Zhang et al., 2009).

Известно, что ионизация ионосферы является функцией местного времени и широты. Поэтому можно считать, что интегральное содержание есть функция времени и разницы широт $\Delta \phi$ между широтами подионосферной точки и станции. Широта и долгота подионосферных точек вычисляется для каждого момента времени и каждого спутника.

Анализ вариаций групповых задержек показал, что измеренные величины ΔP имеют значительный случайный разброс. Дисперсия может достигать 1-2 метра. Значительного уменьшения можно достигнуть усреднением на определенном интервале. В стандартном файле RINEX, содержащем данные GPS измерений, интервал взятия отчетов составляет 30 секунд, в нашем случае мы используем осреднение на 5 минутах. Интервал выбран экспериментально по критерию наименьшего разброса в определении аппаратурных поправок за несколько суток. Уравнение (2) можно записать для всех пролетов спутников ($i=1,\ldots,24$ – количество спутников в системе GPS) на выбранном интервале T, при этом оно трансформируется в переопределенную систему уравнений.

С учетом суточной вариации выбирается период T=24 ч, а в качестве модели используется разложение TEC по гармоникам в функции местного времени t в подионосферных точках:

$$TEC(t) = a_0 + a_1 \cdot \cos \frac{2\pi}{T} t + a_2 \cdot \cos 2\frac{2\pi}{T} t + \dots + a_n \cdot \cos n\frac{2\pi}{T} t + \dots$$

$$+b_1 \cdot \sin \frac{2\pi}{T} t + b_2 \cdot \sin 2\frac{2\pi}{T} t + \dots + b_n \cdot \sin n\frac{2\pi}{T} t + c_1 \Delta \varphi + c_2 \Delta \varphi^2, \tag{6}$$

здесь: $t = \frac{2\pi}{T} \cdot \left[\left(UT - \lambda / 15 \right) - 14 \right]$, где T=24 часа, UT — мировое время, n = 1, 2...6. — число гармоник.

Анализ экспериментальных данных показал, что для адекватного воспроизведения суточной вариации вполне достаточно учесть первые 6 гармоник.

С учетом уравнения (6) выражение (4, 5) представляет систему уравнений, в которой неизвестными являются 15 коэффициентов разложения ионосферной задержки и двадцать четыре (по числу спутников) аппаратурные поправки A^i . Система уравнений является переопределенной и решается методом наименьших квадратов. В процессе решения одновременно рассчитываются коэффициенты a_i , b_i , c_i и A^i , то есть находятся аппаратурные поправки для всех наблюдаемых спутников и абсолютная величина ТЕС над станцией наблюдения на суточном интервале. Вариация ТЕС в течение отдельного пролета вычисляется путем коррекции измеренной дифференциальной задержки на аппаратурную задержку:

$$TEC(t) = \Delta P^{i}(t) - A_{P}^{i}.$$

Для определения фазовых поправок используется алгоритм совместной обработки фазовых и групповых измерений. Предварительно по вышеописанному алгоритму находятся

аппаратурные поправки для кодовых измерений (A_p) для каждого спутника, затем через линейную комбинацию определяется фазовая поправка для каждого индивидуального пролета:

$$A_{\Phi}^{k,s} = A_{P}^{s} + \sum_{i=1}^{N} \frac{\left(P_{2}^{s}\right)_{i} - \left(P_{1}^{s}\right)_{i} - \left(\Phi_{2}^{k}\right)_{i} + \left(\Phi_{1}^{k}\right)_{i}}{N+1},$$

где k — номер пролета, s — номер спутника, i — номер отчета в измерении задержек пролета спутника.

Абсолютная величина электронного содержания по фазовым измерениям определяется аналогично групповым измерениям:

$$TEC(t) = \Delta \Phi^{*k}(t) - A_{\Phi}^{k,s}$$
.

Точность определения абсолютной величины TEC в основном зависит от точности определения поправки групповых измерений (A_p). Согласно (Sardon et al., 1994) формальная точность измерения TEC по GPS наблюдениям составляет около 0,2 TECU. Более ранние наши экспериментальные исследования (Baran et al., 1997) показали, что точность определения абсолютной величины TEC составляет 1,3–1,6 TECU.

Дальнейшим развитием методики является ее переход от локальной модели распределения полного электронного содержания ионосферы над станцией к глобальному (или региональному) пространственному распределению TEC.

В глобальной модели распределения ТЕС ионосферы используем разложение в виде сферических функций для фазовых наблюдений:

$$\Delta\Phi(\varphi,\lambda) = \sum_{n=0}^{n_{\max}} \sum_{m=0}^{n} \overline{P}_{nm} \left(\sin\varphi\right) \cdot \left(a_{nm} \cdot \cos m\lambda + b_{nm} \cdot \sin m\lambda\right),\tag{7}$$

где n_{\max} — максимальная степень разложения по сферическим гармоникам; $\overline{P}_{nm}=\Lambda(n,m)\cdot P_{nm}$ — нормализованные присоединенные функции Лежандра первого рода степени n и порядка m, где — $\Lambda(n,m)$ — нормализующая функция и P_{nm} функции Лежандра; a_{nm} , b_{nm} — (неизвестные) коэффициенты сферических гармоник в разложение ПЭС ионосферы, то есть параметры глобальной ионосферной модели, которые должны быть оценены; j — коширота, $\lambda=(UT\cdot 15+L)\cdot \frac{\pi}{180}-\pi$ — солнечно фиксированная долгота подионосферной точки, L — географическая широта в градусах.

Таким образом, уравнение (5) с учетом (7) для глобальной модели распределения вертикального электронного содержания ионосферы примет следующий вид:

$$\Delta\Phi^{i}(\varphi,\lambda) = M \cdot \sum_{n=0}^{n_{\text{max}}} \sum_{m=0}^{n} \overline{P}_{nm} \left(\sin \varphi \right) \cdot \left(a_{nm} \cdot \cos m\lambda + b_{nm} \cdot \sin m\lambda \right) / \cos z + A_{\Phi}^{k,s}.$$
 (8)

Используя в (8) подходящую сеть станций, разнесенных как по широте, так и по долготе, мы можем исследовать поведение ионосферного ТЕС в соответствующем глобальном (или региональном) масштабе.

Программный комплекс генерации ТЕС карт

Структурная схема комплекса представлена на *puc. 1*. Специализированная программа в заданное время осуществляет автоматическую загрузку данных измерений и навигационных данных с FTP сервера EUREF, который содержит наблюдения с европейской сети GPS/ГЛОНАСС станций.



Рис. 1. Программный комплекс расчета ТЕС карт

Каждые сутки собираются наблюдения со 180–200 станций, объем информации составляет около 100 Mb. Данные GPS/ГЛОНАСС измерений представлены в формате RINEX. Плотная сеть станций сети EUREF обеспечивает высокое пространственное разрешение измерений TEC. Затем набор файлов за соответствующий день распаковываются и передается как исходные данные для программ предварительной обработки. Одновременно исходные RINEX-файлы пополняют локальную базу данных ИЗМИРАН.

Программы предварительной обработки осуществляют проверку наличия и целостности данных (возможно отсутствие измерений некоторых станций из списка обрабатываемых в течение нескольких суток). Также производится отбраковка данных по их объему и по составу измеряемых параметров, которые фиксируются в соответствующем файле протокола для каждого дня. В итоге после этапа предварительной обработки формируются файлы, содержащие информацию о дифференциальных задержках для групповых и фазовых измерений.

На этапе коррекции программно анализируется качество данных дифференциальных задержек по каждой станции и по каждому пролету. Фазовые измерения подвержены нарушениям непрерывности фазы сигналов, обусловленных случайными «перескоками»

фазы (cycle slips). Как правило при срывах приема сигналов скачки фаза превышают сотни циклов. При кратковременных срывах осуществляется коррекция фазы к прежнему уровню. Порог, при котором производится приведение фазы к предыдущему значению, определялся эмпирически. Определение порога является проблемой для высокоширотных станций, в присутствии крупномасштабных неоднородностей изменение фазы даже на 30с интервале может быть значительным. Это особенно актуально в периоды геомагнитных возмущений. Мы проводим исследования вариаций интенсивности фазовых флуктуаций на высоких широтах во время возмущений, когда интенсивность флуктуаций может резко возрастать (Shagimuratov et al., 2015). На основе полученных результатов для различных широт были оценены пороги скачков фазы, которые обусловлены ионосферными причинами.

В блоке обработки ГЛОНАСС/GPS наблюдений происходит расчет суточной вариации абсолютной величины ТЕС для каждой станции, включенной в анализ. Для этого наряду с информацией о дифференциальных задержках для групповых и фазовых измерений необходимы данные о времени и траектория пролетов спутников, а также координаты подионосферных точек, азимуты и зенитные углы на высоте ионосферы. Данный расчет осуществляется по навигационным данным для каждых суток.

Суточная вариация рассчитывается по измерениям задержек по всем пролетам спутников на 24 часовом интервале. В сутки регистрируются 35–40 пролетов, при этом один и тот же спутник может регистрироваться 2–3 раза. Одновременно с расчетом суточной вариации определяются и задержки в аппаратуре для всех пар «спутник–приемник». Затем дифференциальные задержки калибруются на эти аппаратурные задержки, и в результате определяется абсолютное значение ТЕС вдоль пролета спутника. Эти данные в конечном итоге являются исходными для программ построения карт ТЕС.

Реализация методики построения ТЕС карт

Для построения региональных ТЕС карт используется результаты обработки данных по региональной сети станций. В данном случае мы обрабатываем 180-200 станций Европейского региона. Для каждой станции и каждого 30с отчета получаем абсолютные значения ТЕС для всех пролетов спутников. На 15 мин интервале построения ТЕС карт используется более $4\cdot10^4$ линий связи «спутник – приемник», на суточном интервале – $6\cdot10^6$. На $puc.\ 2$ показана карта покрытия GPS измерениями Европейского региона на 15 мин интервале. Реализуемая плотность измерений обеспечивает высокое пространственное разрешение ТЕС карт.

Полученные абсолютные значения ТЕС являются входными параметрами системы уравнений (8) для разложения по пространственным гармоникам. В результате решения уравнения получаем коэффициенты разложения a_{nm} и b_{nm} , которые затем используются как входные данные для построения карт на выбранной сетке широта – долгота. Далее проис-

ходит визуализация полученных массивов данных. Результаты визуализации отображаются на WEB-странице адресу http://wdobs.magix.net/tecmaps.html.

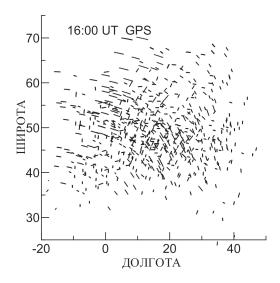


Рис. 2. Карта покрытия GPS данными Европейского региона на 15 мин. интервале

На *рис.* 3 представлены в качестве примера карты ТЕС над Европой, сформированные с двухчасовым интервалом. Карты демонстрируют суточную динамику ионосферного ТЕС – восход, заход, дневной максимум. Интересной особенностью пространственного распределения ТЕС над Европой является главный ионосферный провал, который хорошо виден на картах ТЕС в ночные часы.

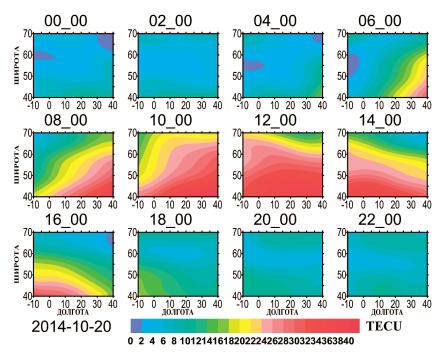


Рис. 3. Пример динамики ионосферного ТЕС над Европой в течение суток

На *рис.* 4 дано сравнение сформированных нами карт TEC и карт сформированных из IONEX данных (GIM). При построении карт нами были использованы ГЛОНАСС данные на-

блюдений более 180 станций европейской сети EUREF. Видно хорошее согласие в поведении ТЕС для обеих карт. Некоторое различие обусловлено тем, что при формировании карт использовался различный набор станций. В IONEX картах используется 100–150 станций для построения глобальных карт, в нашем случае используется более 150 станций для построения карт для европейского региона. Оценка точности карт GIM показала, что среднеквадратичная ошибка составляет 2–10 ТЕС единиц (Wilson et al., 1995; Manucci et al., 1998). Наибольшая ошибка приходится на океаны, где количество GPS станций весьма ограничено. Для европейского региона плотность покрытия измерениями весьма высока (рис. 2), и точность карт оценивается 2–4 ТЕС единиц, наименьшая точность приходится на высокие широты, где число станций ограничено.

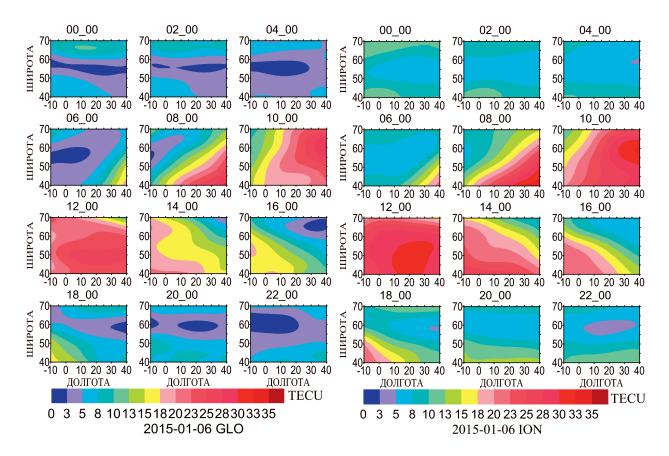


Рис. 4. Карты ТЕС над Европой по ГЛОНАСС измерениям (слева) и по IONEX данным (справа) для 6 Января 2015 г.

Возможности программного комплекса по генерации ТЕС карт были продемонстрированы на анализе частичного солнечного затмения 20 марта 2015 г. (рис. 5), максимальная фаза которого для Европы составляла около 70% и приходилась на 10 UT. Хорошо видна депрессия ТЕС в 10 UT в день затмения по сравнению с контрольным днем, в том числе изменение характера поведения широтно-долготных градиентов.

Разработанный комплекс позволяет строить TEC карты с максимальным временным разрешением до 5 минут (*puc. 6*). На рисунке явно проявляется динамика реакции TEC на затмение, в частности видно, какие происходят изменения в пространственно-временном распределении TEC над Европой во время затмения.

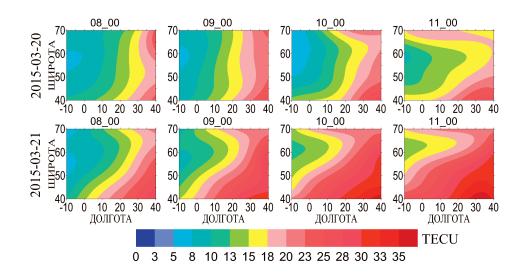


Рис. 5. Проявление солнечного затмения 20 марта 2015 г. в ТЕС над Европой за период 08-11UT и контрольного дня 21 марта 2015 г.

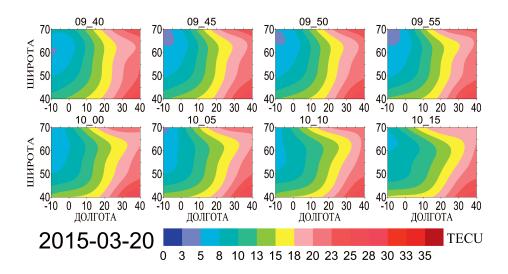


Рис. 6. Динамика ионосферного TEC с пятиминутным разрешением над Европой во время максимальной фазы солнечного затмения

Заключение

Разработанный программный комплекс и созданный на его основе сервис для генерации ТЕС карт над Европой показал высокую эффективность для исследования структуры и динамики ионосферы. Сервис основывается на GPS измерениях, доступность которых обеспечивается международными сетями IGS и EPN. Методология создания ТЕС карт основана на оригинальной концепции и подходах, разработанных в Калининградском филиале ИЗМИРАН. В развитии метода генерации ТЕС карт используются одновременные наблюдения с более чем 180 станций. Комплекс обеспечивает пространственное разрешение карт 1°×1° по широте и долготе и временное разрешение 5 мин.

Карты ТЕС доступны всем потенциальным и заинтересованным пользователям для научных целей – для проведения фундаментальных исследований физики ионосферы, решения задач прогноза распространение радиоволн, оценки влияния ионосферы на различные наземно-космические системы и т.д.

По адресу http://wdobs.magix.net/tecmaps.html доступны карты TEC в формате графических файлов для 2015 г. Карты TEC доступны также на сервере http://data.wdizmiran. ru:8080.

Авторы выражают благодарность сервисам IGS и EUREF/EPN за предоставление GPS/ГЛОНАСС данных. Работа выполнена при поддержке РФФИ: грант № 14-07-00512 и частично грант № 14-05-98820 р-север-а.

Литература

- 1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. 2006. 480 с.
- Шагимуратов И.И., Баран Л.В., Ефишов И.И., Якимова Г.А. Абсолютные ионосферные измерения на основе GPS // Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн. Сборник трудов МФТИ. 1996. C. 111–120.
- Шагимуратов И.И., Черняк Ю.В., Захаренкова И.Е., Якимова Г.А. Использование карт полного электронного содержания для анализа пространственно-временной структуры ионосферы // Химическая физика. 2013. T. 32. № 9. C. 1–8.
- Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitsyna N.J. The use of GPS for ionospheric studies // Artificial Satellites. 1997. Vol.32. No. 1. P. 49-60.
- Ghoddousi-Fard R, Héroux P, Danskin D, Boteler D. Developing a GPS TEC mapping service over Canada // Space Weather. 2011. T. 9. № 6. doi: 10.1029/2010SW000621.
- Liu L., Wan W., Ning B., Zhang M. Climatology of the mean total electron content derived from GPS global ionospheric maps // J. Geophys. Res. 2009. No. 114. (A06308). P. 1–13.

 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 total electron content measurements // Radio Science. 1998. Vol. 33. No. 3. P. 565–582.
- Meza A., Natali M.P., Fernández L.I. Analysis of the winter and semiannual ionospheric anomalies in 1999-2009 based on GPS global International GNSS Service maps // J. Geophys. Res. 2012. No. 117. (A01319). doi:10.1029/2011JA016882.
- Sardon E., Rius A., Zarraoa N. Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations // Radio Science. 1994. Vol. 29. No. 3. P. 577–586.
- 10. Shagimuratov I., Chernouss S., Cherniak Iu. Zakharenkova I., Efishov I. Phase Fluctuations of GPS Signals
- Associated with Aurora // Proceedings of EuCAP 2015. Lisbon 2015. P. 70–74.

 11. Wilson B.D., Mannucci A.J., Edwards C.D. Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive network of GPS receivers // Radio Science. 1995. Vol. 30. № 3. P. 639–648.
- 12. Yilmaz A., Akdogan K.E., Gurun M. Regional TEC mapping using neural networks // Radio Science. 2009. No. 44.
- (RS3007). doi: 10.1029/2008RS004049.
 13. Zhang W., Zhang D.H., Xiao Z. The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental biases // Ann. Geophys. 2009. No. 27. P. 1613–1623.
 14. Zhao B., Wan W., Liu L., Mao T. Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions:
 15. Combus. 2007. No. 25. P. 1555–1568.
- results from global ionosphere maps // Ann. Geophys. 2007. No. 25. P. 1555–1568.

Internet service for generating GPS/GLONASS maps of ionospheric total electron content over the European region

I.I. Shagimuratov, Yu.V. Cherniak, I.E. Zakharenkova, G.A. Yakimova, N.Yu. Tepenitsyna, I.I. Efishov

> IZMIRAN Kaliningrad Branch, Kaliningrad 236010, Russia E-mail: shagimuratov@mail.ru

The paper presents a description and block diagram of a new internet service for generating ionospheric total electron content (TEC) maps. The developed software package performs collection of raw GPS data, data processing and generation of TEC maps over the European region. We use dual-frequency GPS/GLONASS observations in the RINEX format as an initial database. We describe methodology for absolute TEC estimation from the signal delays at L1/L2. An algorithm to determine instrumental biases for the satellite and receiver necessary for calibration of the code measurements is presented. To remove phase ambiguity, we suggest an algorithm of joint processing of the code and phase measurements, which allows us to retrieve absolute TEC values. We use concurrent measurements provided by more than 180 GPS stations of the EPN European network to construct regional TEC maps. The produced TEC maps have temporal resolution of 5 min and spatial resolution of 1°x1° by latitude and longitude. The latter enables detailed study of ionosphere structure and dynamics during various geophysical events. We demonstrate successful implementation of the technique for a case study of the effect the solar eclipse of 20 March 2015 had on TEC variability over the European region.

Keywords: ionosphere, GLONASS, GPS, Total Electron Content (TEC), TEC maps, internet service

Accepted: 26.12.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-197-209

References

- Afraimovich E.L., Perevalova N.P., *GPS-Monitoring verhnei atmosphery Zemli* (GPS-Monitoring of the Earth's Upper Atmosphere), Irkusk: GU NC RVH VSNC SO RAMN, 2006, 480 p. Shagimuratov I.I., Baran L.V., Efishov I.I., Absoliutnye ionosphernye izmerenia na osnove GPS (Absolute
- ionospheric measurement on the GPS basis, Problems of diffraction and propagation of electro-magnetic waves), Problemy difrakcii i rasprostranenija elektromagnitnyh voln. Proceedings Book, Moscow: MFTI, 1996,
- pp. 111–120.
 Shagimuratov I.I., Cherniak Yu., Zakharenkova I.E., Yakimova G.A., Use of Total Electron Content Maps for Analysis of Spatial-Temporal Structures of the Ionosphere, Russian Journal of Physical Chemistry B, 2013,
- Vol. 7, No. 5, pp. 656–662. Baran L.W., Shagimuratov I.I., Tepenitsyna N.J., The use of GPS for ionospheric studies, *Artificial Satellites*,
- 1997, Vol. 32, No. 1, pp. 49–60. Ghoddousi-Fard R, Héroux P, Danskin D, Boteler D., Developing a GPS TEC mapping service over Canada, *Space Weather*, 2011, Vol. 9, No. 6, doi: 10.1029/2010SW000621.
- Liu L., Wan W., Ning B., Zhang M., Climatology of the mean total electron content derived from GPS global
- ionospheric maps, *J. Geophys. Res.*, 2009, No. 114, (A06308), pp. 1–13.

 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 total electron content measurements, *Radio Science*, 1998, Vol. 33, No. 3, pp. 565–582.
- Meza A., Natali M. P. Fernández L.I., Analysis of the winter and semiannual ionospheric anomalies in 1999– 2009 based on GPS global International GNSS Service maps, J. Geophys. Res., 2012, No. 117, (A01319), doi:10.1029/2011JA016882
- Sardon E., Rius A., Zarraoa N., Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from Global Positioning System observations, Radio Science, 1994, Vol. 29, No. 3, pp. 577-586.
- Shagimuratov I., Chernouss S., Cherniak Iu., Zakharenkova I., Efishov I., Phase Fluctuations of GPS Signals Associated with Aurora, *Proceedings of EuCAP 2015*, Lisbon 2015, pp.70–74.
 Wilson B.D., Mannucci A.J., Edwards C.D., Subdaily northern hemisphere ionospheric maps using an extensive
- network of GPS receivers, Radio Science, 1995, Vol. 30, No. 3, pp. 639–648.
- 12. Yilmaz A., Akdogan K.E., Gurun M., Regional TEC mapping using neural networks, Radio Science, 2009, No. 44, RS3007, doi: 10.1029/2008RS004049.
- Zhang W., Zhang D.H., Xiao Z., The influence of geomagnetic storms on the estimation of GPS instrumental biases, *Ann. Geophys.*, 2009, No. 27, pp. 1613–1623.
- 14. Zhao B., Wan W., Liu L., Mao T., Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: results from global ionosphere maps, Ann. Geophys., 2007, No. 25, pp. 1555–1568.