

УДК 550.388.2,621.371

## РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ШИРОКОЗОННЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ РАДИОЗАТМЕНИЙ

© 2016 г. Т. О. Мысливцев<sup>1</sup>, С. В. Никифоров<sup>1</sup>, А. И. Погорельцев<sup>2</sup>,  
П. В. Савочкин<sup>1</sup>, И. В. Сахно<sup>1</sup>, А. А. Семенов<sup>1</sup>, Б. В. Троицкий<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург

e-mails: apogor@rshu.ru; uncleserega@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.12.2015 г.

После доработки 14.01.2016 г.

Существующая спутниковая система радиозатменного мониторинга нейтральной атмосферы и ионосферы Земли COSMIC обеспечивает потребителей данными в районах с ограниченными возможностями построения густых сетей измерительных пунктов (например, на акватории Мирового океана). Предстоящее наращивание группировки малых космических аппаратов LEO и развертывание новых спутниковых радионавигационных систем сулит заметное увеличение оперативности радиозатменного метода и его разрешающей способности по координатам. Это позволит сделать глобальной широкозонную дифференциальную систему SBAS или улучшить качество поправок, поставляемых односторонним потребителям отдельных систем, например, Системы дифференциальной коррекции и мониторинга. В этой связи становится очевидной необходимость совершенствования способов обработки и анализа получаемых радиозатменных данных. На основе измерений полного электронного содержания на трассе спутник–спутник и ионосферной модели типа IRI предложен простой способ восстановления профиля электронной концентрации в точках радиозатмений, обладающий рядом преимуществ. Он использует первичную информацию, не требует измерений рефракции и свободен от допущения о сферической слоистости ионосферы в области затмения. Апробация предложенного способа по данным для 121 случая радиозатмений над Европейским регионом за май 2013 г. показала хорошее согласование с данными станций вертикального зондирования.

DOI: 10.7868/S0016794016040131

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Запущенная в 2006 г. программа COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*), использующая технологию радиозатмений [Hajj et al., 2000], осуществляет ~2000 произвольно распределенных по земному шару зондирований атмосферы и ионосферы в сутки. Данные измерений, в частности профилей электронной концентрации ионосферы, существенно дополняют результаты других методов мониторинга ионосферы, а в отдельных регионах, например, над акваторией Мирового океана, могут стать определяющими при решении задач, требующих ионосферного обеспечения. Предполагаемое развитие программы COSMIC, заключающееся в увеличении числа космических аппаратов LEO (*Low Earth Orbiting*) на орбитах высотой ~800 км и привлечении других (кроме GPS) созвездий спутниковых радионавигационных систем (СРНС) – ГЛОНАСС, Galileo и др., позволит заметно улучшить пространственно-временное разрешение структуры атмосферы и ионосферы, от-

следить динамику протекающих в них процессов и в итоге способствовать решению проблем солнечно-земной физики, космической погоды и повышения точности и эффективности систем связи, локации и навигации.

В статье предложен способ восстановления ионосферных профилей по радиозатменным данным и рассмотрена возможность их использования для расчета поправок, поставляемых SBAS (*Space-Based Augmentation Systems*) односторонним потребителям в регионах, где информация о состоянии ионосферы недостаточна или отсутствует.

### 2. МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАДИОЗАТМЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ

Способы восстановления  $Ne(h)$ -профиля в течение времени ухода LEO от зенита за лимб широко описаны в печати (см., например, работы

[Hajj and Romans, 1998; Stankov and Jakowski, 2006; Krankowski et al., 2011]). К сожалению, методики, использующие измерение угла рефракции или полного электронного содержания (ПЭС) (то же, что TEC – *Total Electron Content*) на линии LEO – GPS обладают одним общим недостатком: в них заложено приближение сферической слоистости ионосферы в области затмения, т.е. отсутствие ее горизонтальной неоднородности, наличие которой как раз весьма вероятно. Однако многочисленные проверки, заключающиеся в сопоставлении “затменных” (*radio occultation*, RO) профилей  $Ne_{RO}$  с данными станций вертикального зондирования (ВЗ)  $Ne_{B3}$  и некогерентного рассеяния показали, что несмотря на иногда заметный географический разнос между областью затмения и станциями ВЗ и НР, результаты довольно хорошо согласуются. По данным эксперимента GPS/MET (1995–1997 гг.) [Hajj and Romans, 1998], а это ~40 тысяч затмений, расхождение затменных”  $foF2$  и  $foF2$ , полученных из ионограмм, составляет ~10–20%, достигая иногда 50%. В статье [Андреева и Локота, 2014] представлены результаты верификации радиозатменных данных системы COSMIC по измерениям ионозондов в различных регионах мира за период 2006–2008 гг. Показано, что расхождение профиля  $Ne(h)$  увеличивается с ростом геомагнитной возмущенности. При этом значения критических частот по результатам ВЗ ионосферы, как правило, превышают  $foF2$  по радиозатменным данным. Там же утверждается, что ионосферные модели (например, *NeQuick*) хорошо воспроизводят радиозатменные значения электронной концентрации в районе максимума слоя  $F2$ . В работе [Krankowski et al., 2011] приведены результаты сопоставления  $NmF2$  ВЗ с затменными данными эксперимента COSMIC над Европой в 2008 г. (полное число отобранных профилей ~750), которые показали расхождение  $\delta \sim 8–9\%$ . Параметр  $\delta$  определялся из соотношения

$$\delta = \frac{|NmF2_{RO} - NmF2_{B3}|}{NmF2_{B3}} \times 100\%,$$

где  $NmF2_{RO}$  – концентрация электронов в районе максимума слоя  $F2$  по данным радиозатмения;  $NmF2_{B3}$  – концентрация электронов в районе максимума слоя  $F2$  по данным станции ВЗ.

Однако необходимо отметить, что сравнивались данные среднеширотного региона при низкой солнечной активности. Это в значительной степени объясняет малые величины ошибок, притом что данные как ВЗ, так и RO проходили весьма тщательный отбор. Ниже представлен способ определения  $Ne_{RO}$ -профилей по данным измерений  $TEC_{RO}$ , содержащихся в файле “podTec\_C001.2013.121.20.00.0033.G08.01\_2013.3520\_nc” [<http://tacc.cwb.gov.tw/en>] без учета рефракции, но и без введе-

ния предположения о слоистой структуре ионосферы в области затмения.

Суть метода состоит в использовании для расчета профиля  $Ne(h)$  ионосферной модели, корректируемой ионосферным индексом солнечной активности (ИИСА), который определяется по результатам измерений  $TEC_{RO}$ , как это было сделано в статье Троицкого и др. [2007] по картам TEC или в работе Бакурского и др. [2014] по данным о задержках систем SBAS. С помощью модели, например, *IRI-Plas* [Gulyaeva et al., 2002] или *NeQuick* [[http://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/oth/OA/04/ROA040000180001ZIPE.zip](http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/oth/OA/04/ROA040000180001ZIPE.zip)], вычисляются  $TEC_{IRI-Plas}$  на трассе LEO – GPS и путем варьирования входного индекса (SSN) осуществляется минимизация разности  $TEC_{IRI-Plas}$  и  $TEC_{RO}$ . Полученный таким способом оптимальный индекс SSN заменяет ИИСА для данного сеанса и совместно с координатами точки затмения RO (например, координатами тангенциальной точки) используется для расчетов  $Ne(h)$ -профиля.

Целевая функция, в процессе оптимизации которой вычисляется ИИСА, представляет собой сумму квадратов отклонений измеренных значений  $TEC_{RO}$  от их расчетных значений  $TEC_{IRI-Plas}$ , полученных с помощью модели *IRI-Plas*. В качестве параметра оптимизации используется входной управляющий параметр модели SSN или число Вольфа.

Таким образом, функционал, подлежащий минимизации, имеет вид

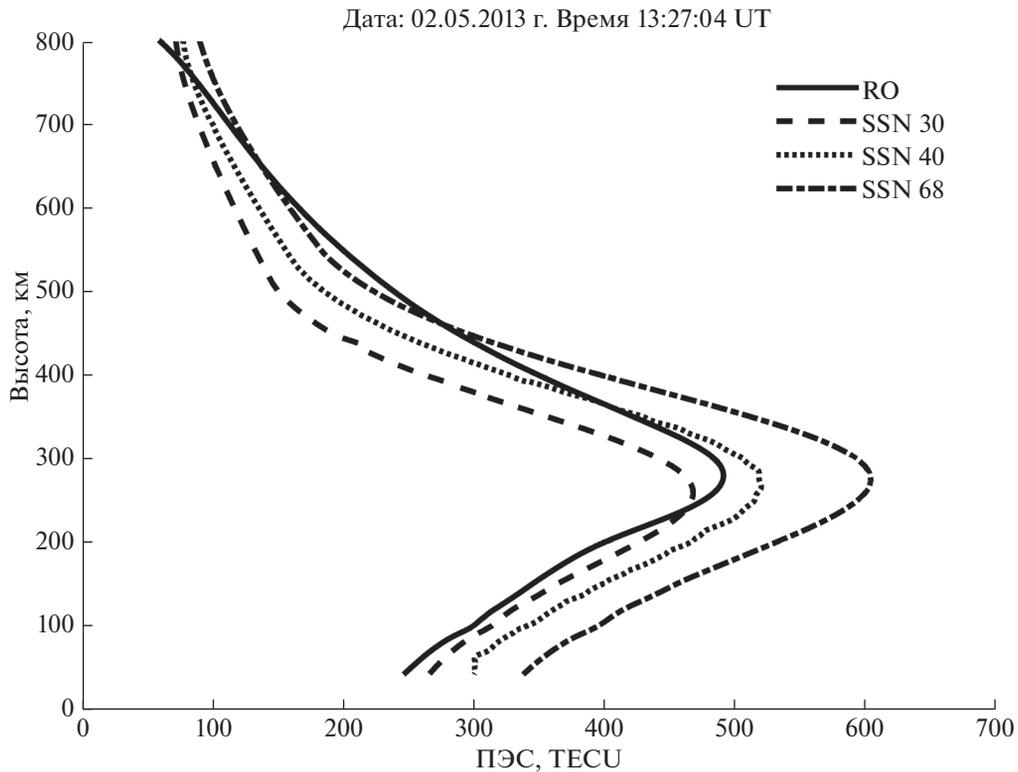
$$\sum_{i=1}^N (TEC_{RO}^i - TEC_{IRI-Plas}^i(W))^2 \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $N$  – количество измерений TEC, взятых из формируемых файлов типа “ionPrf\_C001.2013.121.20.32.G08\_2013.2640\_nc”, содержащихся в информационных базах данных системы COSMIC;  $TEC_{RO}$  – измеренное радиозатменным методом значение TEC;  $TEC_{IRI-Plas}$  – полученное с помощью модели *IRI-Plas* значение TEC;  $W$  – число Вольфа.

Для формирования целевого функционала кроме измерений TEC используются координаты соответствующих спутников LEO и GPS на заданные моменты времени.

Особенность построения процедуры поиска заключается в отбраковке из данных массива измеренных значений TEC частей начала затмения (продолжительные участки с малым значением TEC) и окончания затмения, когда космический аппарат LEO заходит за лимб земной поверхности и возможны ошибки, связанные с дифракционными и другими эффектами, влияющими на точность определения TEC.

Расчетные (модельные) значения TEC на моменты времени проведения измерений формиру-



**Рис. 1.** Распределения TEC на трассе LEO – GPS, полученные из данных системы COSMIC и рассчитанные с использованием модели IRI-Plas для различных значений индекса солнечной активности на момент времени 13:27:04 UT 2 мая 2013 г.

ются как интеграл по отрезку прямой LEO – GPS, соединяющей в пространстве точки с координатами спутников  $P_{LEO}(X_{LEO}, Y_{LEO}, Z_{LEO})$  и  $P_{GPS}(X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS})$ . Для нахождения координат точек разбиения  $P(X, Y, Z)$  используются известные соотношения:

$$X = \frac{X_{LEO} + \lambda X_{GPS}}{1 + \lambda},$$

$$Y = \frac{Y_{LEO} + \lambda Y_{GPS}}{1 + \lambda},$$

$$Z = \frac{Z_{LEO} + \lambda Z_{GPS}}{1 + \lambda},$$

где  $\lambda$  – число, определяющее отношение  $m/n$ , в котором точка  $P$  делит отрезок LEO – GPS;  $m/n = \overline{P_{LEO}P} / \overline{PP_{GPS}} = \lambda$ . При изменении этого соотношения формируется интеграл для определения ПЭС на ориентированной прямой, соединяющей спутники. Исходя из анализа проведенных расчетов, шаг разбиения (интегрирования), позволяющий с точностью до третьего знака рассчитывать значения полного электронного содержания на трассе LEO – GPS, лежит в пределах от 10 до 30 км в зависимости от времени суток и солнечной активности в данный период.

В качестве метода оптимизации функционала (1) использовался эмпирический метод равномерно-

го поиска [Пантелеев и Легова, 2002] для функции одной переменной. Выбор эмпирического метода, в данном случае, обусловлен необходимостью отказаться от градиентных процедур с численным нахождением частных производных для нелинейного функционала (1), так как для этого необходимо знание величины приращения по отыскиваемому параметру. Ввиду сложности обобщенной функции величина приращения может не соответствовать топологии функции, что приводит к существенному увеличению времени поиска минимума.

Рисунок 1 демонстрирует зависимость от начала сеанса  $TEC_{RO}$  (сплошная кривая) во время затмения над Европой 02.05.2013 г. (начало сеанса 13:27:04 UT). Пунктирные кривые показывают варианты расчетов  $TEC_{IRI-Plas}(RO)$  по модели IRI-Plas с различными значениями SSN. Видно, что наибольшее приближение  $TEC_{IRI-Plas}$  к  $TEC$  достигается при  $SSN \approx 36$  и именно это значение определяет ИИСА данного сеанса с координатами точки затмения, используя которое можно по модели получить профиль электронной концентрации.

Очевидно, что методика не использует приближение сферической слоистости ионосферы в области RO, а значит, может работать при наличии ее горизонтальных градиентов. Методику

Результаты сопоставления данных для станций ВЗ на 6, 8 и 26 июня 2013 г. в интервале времени с 6:00 до 8:00 UT

№ п/п	Условный номер	Широта, град	Долгота, град	06.06.2013 г.		08.06.2013 г.		26.06.2013 г.	
				$\Delta f$ , МГц	$\delta$ , %	$\Delta f$ , МГц	$\delta$ , %	$\Delta f$ , МГц	$\delta$ , %
1	RL052	51.6 N	1.3 E	0.14	2.15	0.40	7.03	0.004	0.006
2	TR169	69.7 N	19.0 W	0.47	8.5	0.32	6.15	0.23	3.79
3	TR170	69.7 N	19.0 W	0.37	6.59	0.37	7.23	0.19	3.14
4	PQ052	50.0 N	14.6 E	0.39	5.26	0.49	7.86	0.37	5.33
5	RO041	41.8 N	12.5 E	0.34	4.04	0.41	5.35	0.94	12.66
6	EB040	40.0 N	0.3 E	0.008	0.10	0.35	4.76	0.26	3.51
7	GM037	37.6 N	14.0 E	0.41	4.87	1.18	13.45	0.15	1.91
8	AT138	38.0 N	23.6 E	0.06	0.68	1.12	12.04	0.14	1.92

можно применять в случае обрывов и разрывов в измерениях  $TEC_{RO}$  (в процессе обработки выяснилось, что достаточно взять несколько значений  $TEC_{RO}$  вблизи максимумов кривых типа изображенных на рис. 1), к тому же она не требует измерений углов рефракции, заданий граничных условий для преобразований Абеля и т.д. К недостаткам методики можно отнести невозможность фиксации явлений типа спорадических слоев в области  $E$  ионосферы.

### 3. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ПО РАДИОЗАТМЕННЫМ ДАННЫМ С КРИТИЧЕСКИМИ ЧАСТОТАМИ $foF2$ СТАНЦИЙ ВЗ

Для верификации полученных результатов использовались данные  $foF2$ , содержащиеся в базах станций ВЗ [[www.iono.noa.gr/DIAS](http://www.iono.noa.gr/DIAS)], расположенных в Европейском регионе, и результаты радиозатменного мониторинга размещенных в *Taiwan Analysis Center for COSMIC* на сайте [<http://tacc.cwb.gov.tw/en/>] и в *COSMIC Data Analysis and Archive Center* на сайте [<http://www.cosmic.ucar.edu/cdaac/>].

Затмения выбирались в области с координатами [ $20^\circ$  N,  $90^\circ$  N;  $60^\circ$  W,  $60^\circ$  E] (Европейский регион), где первые два значения — широта, вторые — долгота. Количество затмений за сутки в данной области варьируется в пределах от 120 до 200.

Из них число затмений, координаты которых лежат в пределах  $5^\circ$  от станций ВЗ, составляют от 3 до 12 за сутки.

На рисунке 2 сплошной кривой обозначен точный ход  $foF2$ , полученный по данным станций ВЗ, индекс и координаты которых указаны на рисунке для произвольно выбранных дат в мае 2013 г.; пунктирной —  $foF2$ , полученные с помощью модели *IRI-Plas*, при прогнозе SSN по данным *National Geophysical Data Center* (США) [<http://spidr.ngdc.noaa.gov>].

Закрашенными кружками обозначены значения  $foF2$ , полученные на основе описанного ме-

тода (COSMIC opt), а незакрашенными кружками — значения  $foF2$ , полученные по радиозатменным данным (COSMIC). Выбраны сеансы затмений, координаты которых находились в той же пятиградусной ячейке, что и станции ВЗ.

Из рисунка 2а, б, в, г, д, е видно, что предложенный в работе способ восстановления электронной концентрации в области максимума слоя  $F2$  ионосферы по данным измерений  $TEC$  методом радиозатмений сопоставим по точности с примененным в проекте COSMIC.

Этот вывод подтверждается обработкой 121 сеанса затмений в Европейском регионе, а в отдельных случаях во время восходно-заходных периодов он дает лучший результат, что, возможно, обусловлено учетом (через модель) горизонтальных градиентов  $Ne$  в области терминатора.

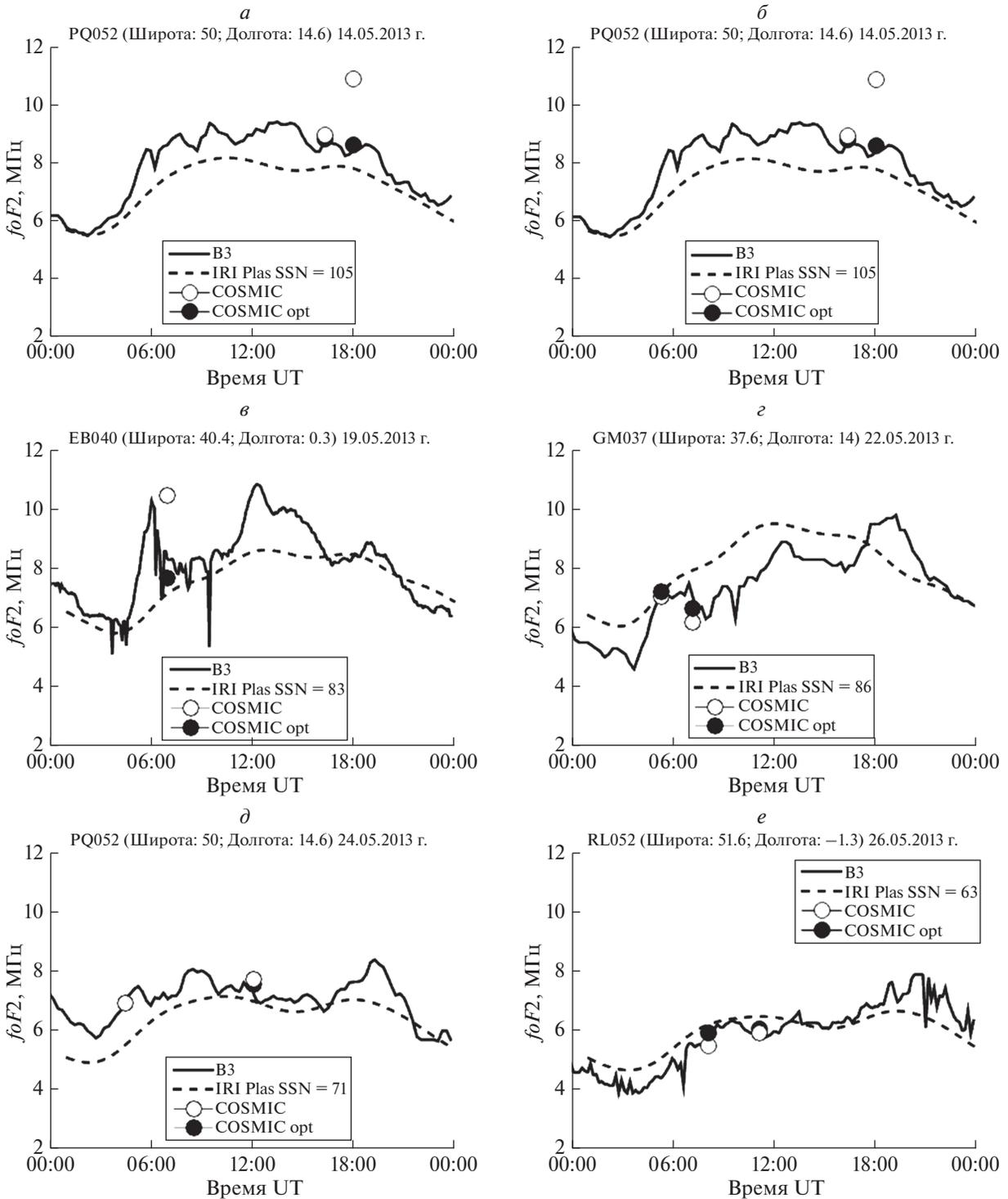
Если в течение некоторого временного интервала в произвольном регионе (например, над Европой) происходит несколько ( $n$ ) сеансов RO, то можно определить  $n$  значений ИИСА и построить региональную карту ИИСА, а следовательно, и карту  $foF2$ .

В работе Бакурского и др. [2014] показано, что среднее значение ИИСА в Европейском регионе в течение суток изменяется незначительно. Исходя из этого, выберем сеансы затмений за двухчасовой интервал. Определим значения ИИСА для каждого сеанса и построим карту. Далее, рассчитав  $foF2$  в точках расположения ионозондов, сопоставим их с данными ВЗ в момент времени, приходящийся на середину выбранного временного интервала, используя выражения:

$$\Delta f = |foF2_{RO} - foF2_{B3}|,$$

$$\delta = \frac{|foF2_{RO} - foF2_{B3}|}{foF2_{B3}} \times 100\%,$$

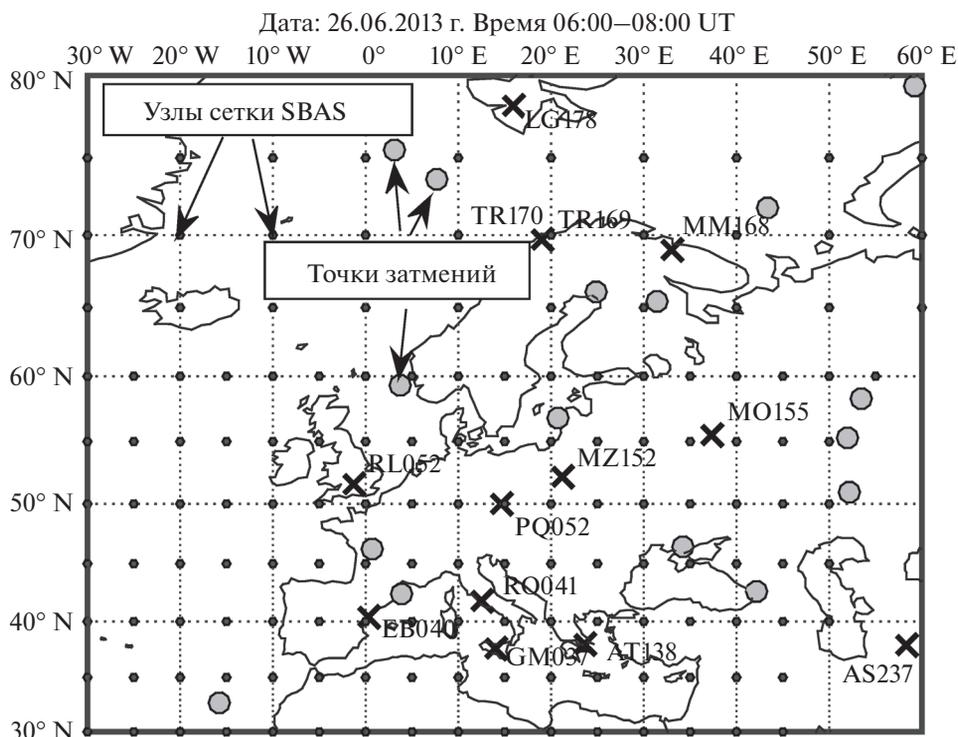
где  $foF2_{RO}$  — критическая частота по данным радиозатмения;  $foF2_{B3}$  — критическая частота по данным станции ВЗ.



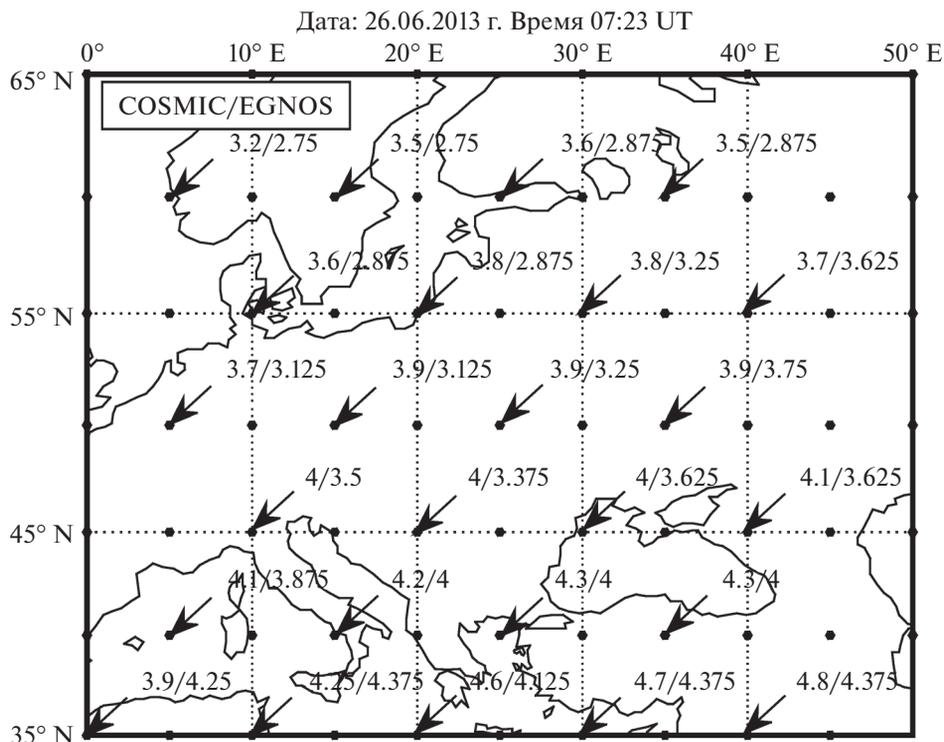
**Рис. 2.** Результаты сравнения критических частот слоя  $F_2$  для пунктов расположения станций ВЗ ионосферы: *а* – RQ041 с координатами (41.8° N; 12.5° E); *б, д* – PQ052 с координатами (50.0° N; 14.6° E); *в* – EB040 с координатами (40.4° N; 0.3° E); *г* – GM037 с координатами (37.6° N; 14.0° E); *е* – RL052 с координатами (51.6° N; 1.3° W).

Таблица демонстрирует результаты сопоставления данных для восьми станций ВЗ на 6, 8 и 26 июня 2013 г. в интервале времени с 6:00 до 8:00 UT.

Из таблицы следует, что критическая частота слоя  $F_2$  ионосферы, за редким исключением, восстанавливается с высокой точностью. Заметные расхождения  $\delta$  (~12–13%) и  $\Delta f \sim 1$  МГц, воз-



**Рис. 3.** Участок ответственности системы EGNOS с нанесенными точками радиозатмений за период 6:00–8:00 UT 26 июня 2013 г. и расположение станций ВЗ ионосферы Европейского региона.



**Рис. 4.** Значения вертикальных задержек в узлах сетки SBAS по данным программы COSMIC и системы EGNOS на момент времени 7:23:00 UT 26 июня 2013 г.

можно, обусловлены тем, что ионозонды расположены на краю карты ИИСА, где возрастают ошибки интерполяции.

На рисунке 3 показано расположение ионозондов (крестики) и области затмений (закрашенные кружки) для 26.06.2013 г. с 6:00 до 8:00 UT.

При наличии карты ИИСА, которая позволяет определить по модели (например, IRI-Plas) параметры ионосферы в любой точке региона, охватываемой картой, появляется возможность построить региональную карту TEC, а следовательно, рассчитать вертикальные поправки по дальности на частоте  $L1$  в узлах сетки SBAS в регионе. Такой расчет был выполнен по данным радиозатмений с 6:00 до 8:00 UT для 26.06.2013 г. над Европой ( $35^\circ-65^\circ \text{ N}$ ;  $0^\circ-50^\circ \text{ W}$ ), а результаты сопоставлены с поправками, которые предоставляет односторонним потребителям система EGNOS [Current ..., 2010].

На рисунке 4 показаны численные значения (в метрах) поправок. Слева от черты – по радиозатменным данным, а справа – расчет по данным системы EGNOS. Видно, что разница составляет дециметры. Была выполнена аналогичная процедура за 6 и 8 июня 2013 г.

Оказалось, что различие не превышает – 15%. Отметим, что погрешности измерений TEC в системах SBAS также дают ошибки к поправкам в несколько дециметров.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен метод восстановления электронной концентрации в ионосфере по данным измерений TEC на трассах спутник–спутник в процессе радиозатмений по проекту FORMOSAT-3/COSMIC. Электронная концентрация рассчитывается по ионосферной модели (например, IRI-Plas), корректируемой ИИСА, для определения которого используются первичные данные о TEC с сайта [<http://tacc.cwb.gov.tw/en>].

На основе результатов обработки 121 случая радиозатмений за май 2013 г. в Европейском регионе выполнено сопоставление критических частот  $foF2$  по данным ВЗ и  $foF2$ , восстановленных по описанной в работе методике из затмений системы COSMIC.

Сделан вывод, что предложенный способ, безусловно выигрывающий по оперативности, не связанный с допущением о сферической слоистости ионосферы и не обремененный возможными погрешностями измерения рефракции, дает результат (по  $foF2$ ), по точности не уступающий используемой в проекте COSMIC методике.

Пока метод радиозатмения как метод мониторинга ионосферы уступает возможностям, предоставляемым системами типа WAAS или EGNOS, но в перспективе с ростом числа спутников LEO

радиозатменная технология диагностики ионосферы может стать определяющей в районах с ограниченным доступом и на акватории Мирового океана. Этот метод вполне может служить целям ионосферного обеспечения систем связи, локации и навигации, например, для расширения возможностей широкозонных дифференциальных систем.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского Научного Фонда (грант № 14-17-00685).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева Е.С., Локота М.В. Параметры ионосферы: данные системы FORMOSAT-3/COSMIC, ионозондов и моделей IRI, *NeQuick* // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 11. № 1. С. 75–84. 2014.
- Бакурский К.В., Зарубин А.С., Мысливцев Т.О., Савочкин П.В., Сахно И.В., Троицкий Б.В., Шпаков А.П. Метод коррекции модели ионосферы по данным широкозонных дифференциальных систем СРНС // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 54. № 4. С. 503–507. 2014.
- Пантелеев А.В., Легова Т.А. Методы оптимизации в примерах и задачах. М.: Высш. шк., 544 с. 2002.
- Троицкий Б.В., Ортиков М.Ю., Лобанов К.А. Ионосферное обеспечение коротковолновой радиосвязи с использованием карт полного электронного содержания // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 47. № 3. С. 389–394. 2007.
- Current and planned global and regional navigation satellite systems and satellite-based augmentation systems of the International Committee on Global Navigation Satellite Systems Providers Forum. New York: United Nations. 59 p. 2010.
- Gulyaeva T.L., Huang X., Reinich B.W. The ionosphere-plasmasphere model software for ISO. Acta Geod. Geophys. Hu. V. 39. № 3. P. 143–152. 2002.
- Hajj G. A., Romans L. J. Ionospheric electron density profiles obtained with the global positioning system: Results from GPS/MET experiment // Radio Sci. V. 33. № 1. P. 175–190. 1998.
- Hajj G.A., Lee L.C., Pi X., Romans L.J., Schreiner W.S., Straus P.R., Wang C. COSMIC GPS ionospheric sensing and space weather // Terr. Atmos. Ocean. Sci. V. 11. № 1. P. 235–272. March 2000.
- Krankowski A., Zakharenkova I., Krypiak-Gregorczyk A. Ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC over the European region and validated by ionosonde data // J. Geodesy. V. 85. Issue 12. P. 949–964. 2011.
- Stankov S.M., Jakowski N. Topside ionospheric scale height analysis and modelling based on radio occultation measurements // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 68. № 2. P. 134–162. 2006.