

## Сравнение критической частоты $f_0F_2$ по данным ионозондов, ассимиляционной модели ионосферы ФГБУ ЦАО и эмпирической модели IRI над территорией РФ

А.А. Титов<sup>1</sup>, Д.В. Соломенцев<sup>1</sup>, В.У. Хатгатов<sup>1</sup>, Б.В. Хатгатов<sup>2</sup>, В.И. Денисова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Россия

<sup>2</sup> Fusion Numerics LLC, Boulder, CO, USA

<sup>3</sup> Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова, Москва, Россия

E-mail: anton@ionosphere.ru

Приведены результаты по оценке точности ассимиляционной модели на основе сравнений расчетов с экспериментальными значениями критической частоты слоя максимальной концентрации электронов F2. Результаты демонстрируют хорошую согласованность в суточном ходе  $f_0F_2$ . Показано, насколько часто методы сравнения могут быть применены в данных условиях, отмечены основные препятствующие факторы. Выявлено, что для станций зондирования европейской части территории Российской Федерации, расположенных вблизи регионов с высоким уровнем покрытия наземными станциями Глобальной навигационной спутниковой системы, согласованность результатов ассимиляционного моделирования с экспериментом выше. Продемонстрировано сравнение как суточного, так и сезонного хода критических частот  $f_0F_2$  для рядов данных Международной справочной модели ионосферы IRI и трехмерной ассимиляционной модели ионосферы, разработанной в ФГБУ ЦАО, за последние два с половиной года с 1 мая 2011 по 1 ноября 2013. Проведен регрессионный анализ, позволяющий проследить специфику зависимости значения критериальной переменной от предиктора (измерений ионозонда). В ходе данного анализа было получено подтверждение существования переоценки моделью IRI критической частоты в слое F2, которая составляет 0,86 МГц.

**Ключевые слова:** критическая частота, сравнение  $f_0F_2$ , ассимиляционная модель, ионозонд, ионосфера.

### Введение

С 2009 г. в Центральной Аэрологической Обсерватории Росгидромета ведется мониторинг состояния ионосферы с помощью моделирования основных физико-химических процессов в данном слое при использовании ассимиляции данных о полном электронном содержании (ПЭС) (Титов и др., 2013; Solomentsev et al., 2012). Суть метода ассимиляции состоит в корректировке расчетов физической модели ионосферы по оперативно получаемым экспериментальным данным о ПЭС в ионосфере на трассах радиовизирования сигналов космических навигационных систем GPS и ГЛОНАСС с сети станций IGS (International GNSS Service).

Чтобы быть уверенным в результатах моделирования необходимо постоянно проводить проверку выходных данных. Для диагностики модели мы должны регулярно иметь в распоряжении независимую информацию о состоянии ионосферы в различных точках земного шара и уметь ее обрабатывать. Данная статья посвящена комплексной проверке наших расчетов по независимым источникам измерений критической частоты  $f_0F_2$  над территорией РФ. Критическая частота слоя F2, главного максимума ионизации, является одним из ключевых параметров ионосферы для диагностики (или прогноза) условий рас-

пространения радиоволн. Этот параметр удобен для оценки работы модели, поскольку пропорционален количеству электронов в главном максимуме вертикального распределения концентраций и информация о нем доступна над территорией России. Кроме того, полное электронное содержание в вертикальном столбе напрямую связано с величиной  $f^oF2$  для данного местоположения, и эти два параметра обладают весьма высокой корреляцией (Kouris et al., 2004).

### Сравнение по данным о критических частотах слоя F2

Поскольку одним из параметров на выходе нашей модели является трехмерное распределение электронной концентрации, параметр  $f^oF2$  может быть легко восстановлен для любой географической точки. Использование ассимиляционной схемы над территорией России осложнено малым количеством станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), при этом достоверность полученных результатов моделирования крайне важна. Для валидации полученных нами результатов в качестве независимых использовались экспериментальные данные, предоставленные Институтом прикладной геофизики (ИПГ) имени академика Е. К. Федорова и Институтом солнечно-земной физики СО РАН. В предварительном анализе рассматривались 7 станций измерений:

- Москва ( $55,80^\circ$  с.ш.,  $37,60^\circ$  в.д.),
- Ростов ( $47,10^\circ$  с.ш.,  $39,40^\circ$  в.д.),
- Салехард ( $66,50^\circ$  с.ш.,  $66,60^\circ$  в.д.),
- Норильск ( $69,20^\circ$  с.ш.,  $88,26^\circ$  в.д.),
- Подкаменная Тунгуска ( $61,60^\circ$  с.ш.,  $90,00^\circ$  в.д.),
- Иркутск ( $52,50^\circ$  с.ш.,  $104,00^\circ$  в.д.),
- Магадан ( $59,60^\circ$  с.ш.,  $150,80^\circ$  в.д.).

Расположение всех станций представлено на *рис. 1*. Меткой выделены станции сравнение, по которым в данной работе проведено сопоставление, квадратом - не принятые к 2,5-летнему сравнению. Сбор, обработка данных ионозондов проводилась с 2010 г. Но изначально такое сравнение носило разовый характер. Начиная с 1 мая 2011 г., процедура сопоставления данных  $f^oF2$  с целью валидации модельных расчетов стала регулярной. За этот период было проведено большое количество сравнений критических частот, а также анализ способности моделей отражать суточное и сезонное поведение  $f^oF2$ . На сегодняшний день массив сравнений составляет два с половиной года.



Рис. 1. Расположение используемых при анализе российских ионозондов

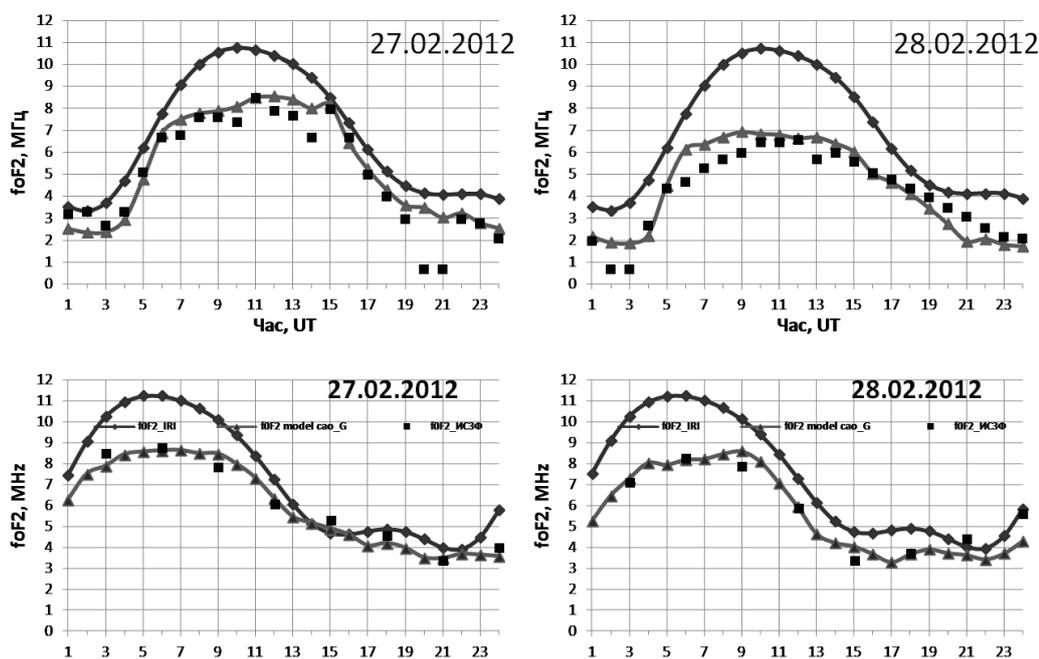


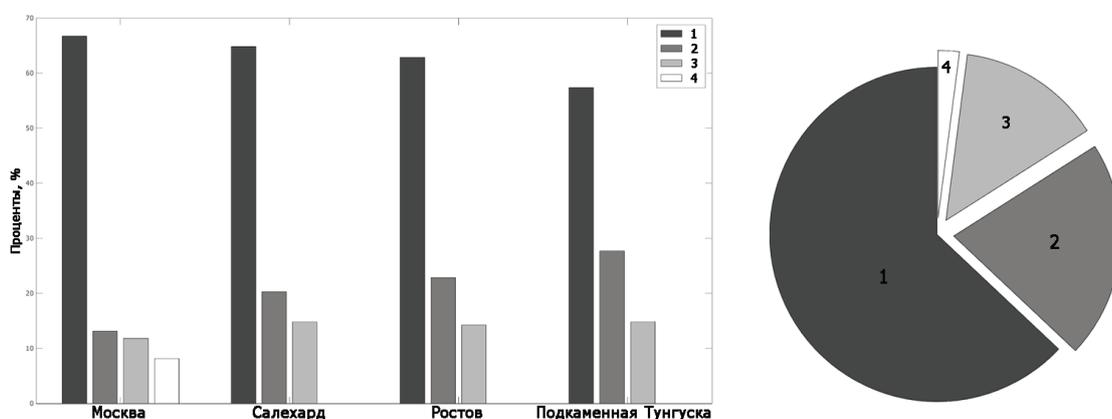
Рис. 2. Характерные суточные вариации  $f_0F_2$  для 27 и 28 февраля 2012 г.

При получении новых данных регулярно проводилось сравнение суточного хода критической частоты слоя F2. На рис. 2 представлены примеры сопоставления экспериментальных данных о суточных вариациях критических частот  $f_0F_2$  для станций вертикального зондирования Москва (верхние графики) и Иркутск (нижние графики) с результатами моделирования ФГБУ ЦАО и IRI для отдельных дней февраля 2012 г. Графики демонстрируют хорошую согласованность результатов нашей модели с независимыми результатами наблюдений. Ассимиляция данных со станций ГНСС позволяет отслеживать мелкомасштабную структуру суточной вариации. Проведение сравнений было осложнено периодическим отсутствием данных, обусловленным технически неисправностями как со стороны ФГБУ ИПГ, так и со стороны ФГБУ ЦАО.

Перед проведением сравнения для всего ряда данных продолжительностью 2,5 года был сделан предварительный анализ регулярности и актуальности данных, поступающих

от каждой из семи станции зондирования. В ходе анализа было отобрано 4 из 7 ионозондов, результаты экспериментов которых были наиболее регулярны и корректно отражали суточные и сезонные вариации изменения параметра  $f_0F_2$ . Таким образом, при сравнении результатов модельных расчетов использовались данные от следующих станций: Москва, Ростов, Салехард, Подкаменная Тунгуска.

Во временных рядах измерений этих 4 станций также имелись периоды, когда отсутствовали записи об измерениях ионозондов. Как правило, в таких случаях информация либо отсутствовала полностью, либо содержала код ошибки вместо самих результатов измерения. Процент таких поступающих с ионозондов данных от общего количества наблюдений за рассматриваемый период в 2,5 года составил более 21%. Анализ показал, что за период с 1.05.2011 по 1.11.2013 сравнения для этих 4 станций могут быть проведены только в 63% случаев регулярных часовых измерений. Таким образом, за 2,5 года было произведено сравнение примерно по 13 800 значениям  $f_0F_2$  в среднем для каждой из четырех станций. Часть данных, менее 14%, были не приняты к сравнению, поскольку для соответствующего им времени не был произведен расчет модели, что могло быть связано с технически неисправностями (отсутствием Интернет соединения, длительные сбои в электросети, поломка аппаратного обеспечения). Оставшиеся 2% от общего числа потенциально возможных сравнений соответствовали отсутствию генерируемых файлов валидации. Это могло быть вызвано как с отсутствием измерений ионозондов, так и с другими сторонними причинами. Усредненная статистика и статистика по каждой из 4 станций в отдельности приведены на *рис. 3*. Цифрам, содержащимся в легенде *рис. 3*, соответствуют: 1 - используемые для анализа данные; 2 - не используемые, по причине отсутствия измерений  $f_0F_2$  станциями вертикального зондирования; 3 - не используемые по причине отсутствия результатов моделирования ФГБУ ЦАО; 4 - не используемые по причине отсутствия файлов измерений  $f_0F_2$ .



*Рис. 3. Статистика данных, пригодных для ежечасовых сравнений за период 1.05.2011-1.11.2013 гг. по отдельным станциям – слева, суммарная - справа*

В ходе рассмотрения длительных рядов были получены следующие важные результаты:

1. При сравнении результатов модельных расчетов с данными экспериментальных измерений станций, расположенных в азиатском регионе России (Западная и Восточная Сибирь), происходит увеличение статистической ошибки определения критической частоты по сравнению с данными измерений станций европейской части континента. Так среднеквадратичное отклонение модельных расчетов  $f_0F_2$  от измерений для Москвы и Ростова-на-Дону составило 0,91 и 1,09 МГц, соответственно, в среднем за весь 2,5-летний период. В то время как для Салехарда и Подкаменной Тунгуски эти показатели несколько выше: 1,25 и 1,31. Такое изменение можно объяснить малым количеством станций ГНСС, данные с которых можно было бы ассимилировать в модель. Стоит отметить, что для каждого из этих ионозондов также проводилось сравнение с моделью IRI. Разброс СКО  $f_0F_2$  для этой модели при сравнении с экспериментальными данными был практически одинаков для всех городов и в среднем составлял 1,36 МГц. Как можно видеть, результаты сравнений нашей модели для двух станций, расположенных в сибирской части России, приближаются к значениям сравнения для модели, описывающей медианное значение параметра  $f_0F_2$ . Для станций зондирования европейской части России, расположенных вблизи регионов с высоким уровнем покрытия наземными ГНСС станциями, согласованность результатов моделирования с экспериментом выше.

2. Помимо сравнения суточных вариаций критической частоты, была выполнена оценка согласованности сезонного поведения анализируемых моделей с экспериментальными данными  $f_0F_2$  за весь анализируемый период (см. *рис. 4* и *5*). Это станция Москва (*рис. 4*), для которой СКО расчетов критической частоты нашей модели за весь период было наименьшим, и станция Подкаменная Тунгуска (*рис. 5*) – с наибольшим значением СКО. На светлый фон, представляющий экспериментальные наблюдения, нанесены модельные расчеты (темным). Результаты ассимиляционной модели ФГБУ ЦАО на верхнем, на нижнем - модели IRI. Каждый график сопровождается диаграммой распределения СКО для всего представленного ряда. Над диаграммами указаны значения среднего СКО. Вне зависимости от местоположения станции вертикального зондирования, расчеты ФГБУ ЦАО хорошо отражают сезонную изменчивость, практически полностью повторяя поведение  $f_0F_2$  ионозондов. Верхние графики *рис. 4* и *5* демонстрирует великолепное совпадение результатов моделирования и распределения временного ряда результатов наблюдений. Это говорит о том, что ассимиляционная модель способна выявлять мелкомасштабную временную структуру в течение суток и отслеживать вариации критических частот для различных сезонов.

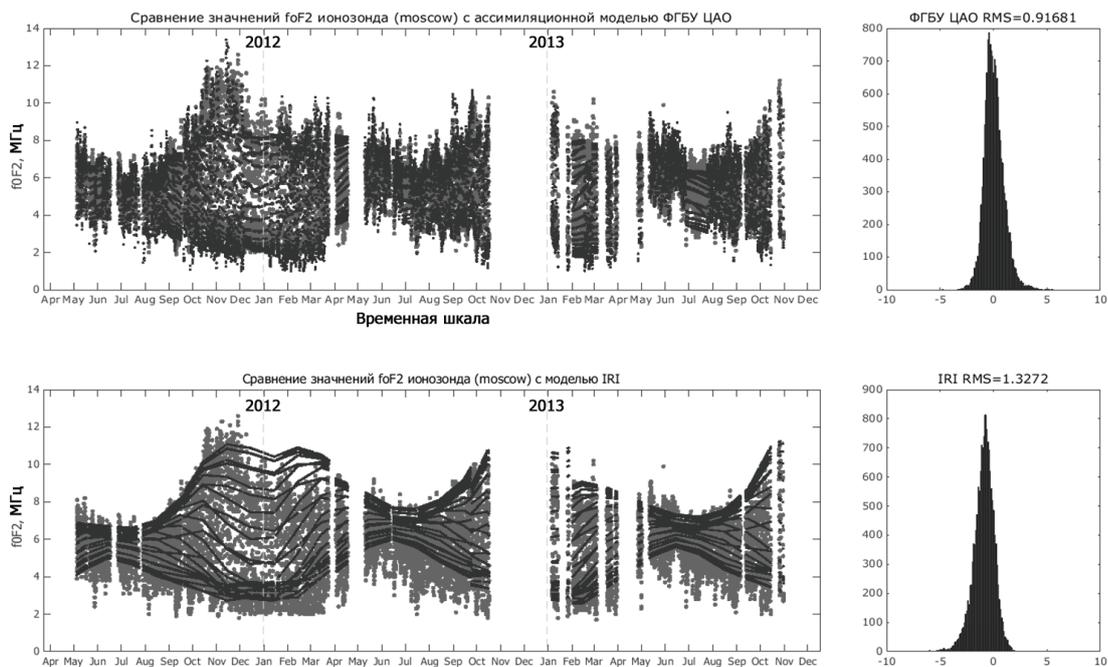


Рис. 4. Сравнение модельных расчетов с наблюдений  $f_0F_2$  для станции Москва

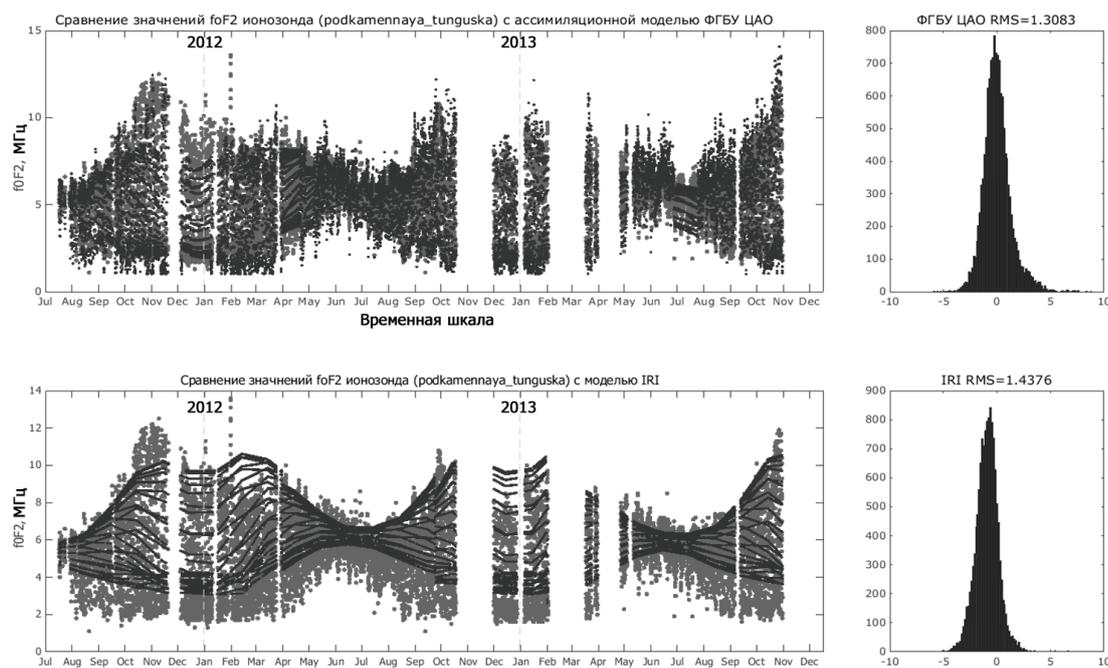
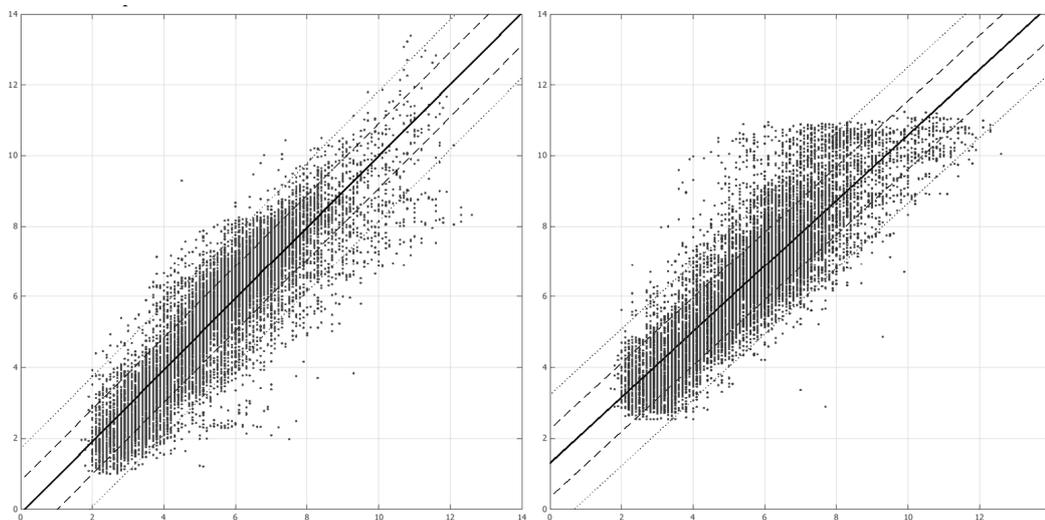


Рис. 5. Сравнение модельных расчетов с наблюдений  $f_0F_2$  для станции Подкаменная Тунгуска.

Поведение критической частоты в слое F2 в течение суток хорошо известно и, конечно же, каждая модель должна воспроизводить этот ход параметра  $f_0F_2$ : увеличение количества электронов за счет фотоионизации в утренние часы и плавный спад в послеполуденное время, обусловленный рекомбинацией. Поэтому стоит отметить, что уровень корреляции частот  $f_0F_2$  полученных во время эксперимента и моделирования априорно должен быть очень высок. Для станций Москва и Подкаменная Тунгуска были рассчитаны коэффициенты корреляции дан-

ных ионозондов с модельными результатами также за весь период с 1.05.2011 по 1.11.2013. В обоих случаях результаты модели ФГБУ ЦАО имели более высокий показатель по сравнению с международной моделью IRI. В первом случае он составил 0,89 (против 0,86 по IRI), во втором – 0,83 (0,81 у IRI). Все это демонстрирует, что модель гибко реагирует на изменения концентрации в максимуме слоя F2 и описывает поведение критической частоты  $f^oF2$  лучше, чем базирующаяся на основании многолетних наблюдений эмпирическая модель IRI.

3. Поскольку СКО в течение такого длительного периода может колебаться в широком диапазоне, был применен регрессионный анализ для определения степени детерминированности вариаций модельных результатов экспериментальными данными. Графики линейной регрессии построены по методу наименьших квадратов и представлены на *рис. 6*. Слева – модель ФГБУ ЦАО (Y) и показания ионозонда (X), справа – модель IRI (Y) и показания ионозонда (X). Штриховой пунктир обозначает зоны ограниченные отклонением менее одной величины дисперсии, точечный пунктир – менее двух величин дисперсии. Исходя из полученных результатов, для каждой из модели прослеживается своя специфика зависимости значения критериальной переменной от предиктора (измерений ионозонда). Дисперсия линейной аппроксимации моделируемых  $f^oF2$  от наблюдаемой и линейной регрессии для обеих моделей практически одинакова (0,915 и 0,963 для нашей модели и модели IRI, соответственно). И для каждой из них имеется смещение относительно положения (0,0). Нельзя не отметить, данный анализ явно демонстрирует то, что оговаривалось ранее в ряде зарубежных статей (Yue et al., 2013), а именно, существенное завышение показаний модели IRI в плане как полного электронного содержания ТЕС, так и концентраций в отдельно взятых точках. В среднем для рассматриваемого периода переоценка IRI критической частоты в слое F2, вычисленная в ходе регрессионного анализа, составляет 0,86 МГц.



*Рис. 6. Визуальное представление линейной регрессии для двух наборов данных  $f^oF2$  (Москва)*

## Выводы

Согласно данным Центра предсказания космической погоды NOAA поток солнечного радиоизлучения на длине волны 10,7 см (F10,7) за рассматриваемый 2,5-летний период с 1.05.2011 по 1.11.2013 значительно варьировался от 80 до 190 f.u. ( $10^{-22} \cdot \text{Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{Гц})$ ), что позволяет говорить о наличии в данном сравнительном ряде как спокойных, так и возмущенных дней.

В работе представлены сравнения расчетов нашей ассимиляционной модели с экспериментальными значениями критической частоты для сезонного и суточного хода. В обоих случаях результаты модели ФГБУ ЦАО имеют хорошую согласованность с независимыми наблюдениями, демонстрируя суточные и сезонные вариации параметра  $f_0F_2$  близкие к реальным.

Также было показано, что для станций зондирования европейской части России, расположенных вблизи регионов с высоким уровнем покрытия наземными ГНСС станциями, согласованность результатов моделирования с экспериментом выше.

В ходе регрессионного анализа было получено подтверждение существования переоценки моделью IRI критической частоты в слое F2, которая составляет 0,86 МГц.

## Литература

1. *Титов А.А., Соломенцев Д.В., Хаттатов В.У.*, Мониторинг состояния ионосферы в реальном времени с помощью трехмерной ассимиляционной модели // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58. № 6. С. 564–572.
2. *Kouris S.S., Xenos T.D., Polimeris K.V., Stergiou D.* TEC and  $f_0F_2$  variations: preliminary results // Annals of Geophysics. Vol. 47. No. 4. P. 1325-1332.
3. *Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M.V. Titov A.A., Yudin V., Khattatov V.U.* Ionosphere state and parameter estimation using an Ensemble Square Root Filter and a global three-dimensional first-principle model // Space Weather. 2012. Vol. 10. S07004. P. 1-13.
4. *Yue X., Schreiner W.S., Rocken C., Kuo Y.-H.* Validate the IRI2007 model by the COSMIC slant TEC data during the extremely solar minimum of 2008 // Advances in Space Research. Vol. 51. Issue 4. February 2013. P. 647-653.

## Comparison of critical frequency $f_0F_2$ obtained from ionosonde and CAO and IRI models over the Russian Federation

**A.A. Titov<sup>1</sup>, D.V. Solomentsev<sup>1</sup>, V.U. Khattatov<sup>1</sup>, B. Khattatov<sup>2</sup>, V.I. Denysova<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Central Aerological Observatory, Dolgoprudnyi, Russia*

<sup>2</sup> *Fusion Numerics LLC, Boulder, CO, USA*

<sup>3</sup> *E. K. Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia*  
*E-mail: anton@ionosphere.ru*

Accuracy of the assimilative model developed by Central Aerological Observatory (CAO) was estimated by comparisons with ionosonde measurements of the F2 layer critical frequency. The results demonstrate great co-

herence in the f0F2 diurnal variation. It is shown how often the comparison methods can be applied. The main obstacles are noticed. It is shown, that ionosonde measurements and assimilation modeling results coherence is higher for sounding stations located near regions with high level of GNSS ground stations coverage (the European part of Russia). A comparison of the critical frequency f0F2 data series of international reference ionosphere model IRI and the CAO three-dimensional assimilative ionosphere model is made. These series were collected over a two year and a half period from 1 May 2011 to 1 November 2013. Data regression analysis was made. That allows considering the modeling results dependence on the predictor (ionosonde measurements). IRI critical frequencies overestimation was confirmed by the regression analysis.

**Keywords:** critical frequency, f0F2 comparison, assimilative model, ionosonde, ionosphere.

## References

1. Titov A.A., Solomentsev D.V., Khattatov V.U., Real-time monitoring of the ionospheric state with the use of a 3D assimilation model, *Journal of Communications Technology and Electronics*, Vol. 58, No. 6, pp. 509-516.
2. Kouris S.S., Xenos T.D., Polimeris K.V. Stergiou D., TEC and f0F2 variations: preliminary results, *Annals of Geophysics*, Vol. 47, No. 4, pp. 1325-1332.
3. Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M.V., Titov A.A., Yudin V., Khattatov V.U. Ionosphere state and parameter estimation using an Ensemble Square Root Filter and a global three-dimensional first-principle model, *Space Weather*, 2012, Vol. 10, S07004, pp. 1-13.
4. Yue X., Schreiner W.S., Rocken C., Kuo Y.-H. Validate the IRI2007 model by the COSMIC slant TEC data during the extremely solar minimum of 2008, *Advances in Space Research*, Vol. 51, Issue 4, pp. 647-653.