

## ЧИСЛЕННОЕ И ЭМПИРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ $foF2$ В ОБЛАСТИ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА

М.В. Клименко<sup>1,2</sup>, В.В. Клименко<sup>1</sup>, Н.В. Чирик<sup>1</sup>, А.Т. Карпачев<sup>3</sup>, Л.В. Пустовалова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия,  
e-mail: maksim.klimenko@mail.ru

<sup>2</sup>Балтийский Федеральный Университет им. И. Канта, Калининград, Россия

<sup>3</sup>ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Москва, Россия, e-mail: karp@izmiran.ru

**Аннотация.** В данном исследовании дана оценка качества воспроизведения распределения электронной концентрации в области главного ионосферного провала современными численными и эмпирическими моделями. Делается вывод о необходимости улучшения опции URSI для описания параметров максимума  $F2$  слоя в международной справочной модели ионосферы IRI.

### Введение

Главный ионосферный провал (ГИП) является главной структурой зимней субавроральной ионосферы, поскольку зимой он наблюдается в 95% случаев при высокой солнечной активности и практически всегда при низкой солнечной активности [Карпачев, 2003]. Впервые ГИП был обнаружен по данным спутника *Alouette Muldrew* в 1965 г. Под ГИП обычно понимают структуру, в которой электронная концентрация ионосферной плазмы  $N_e$  значительно падает в относительно узком интервале субавроральных широт вблизи экваториальной границы аврорального овала. Форма и положение ГИП являются предметом интенсивных исследований, что связано с их существенным влиянием на надежность радиосвязи на радиотрассах, проходящих через субавроральные широты. В данной работе представлено распределение критической частоты максимума  $F2$  слоя,  $foF2$ , полученное в результатах расчетов на численной модели, из различных эмпирических моделей и по данным радиозатменных наблюдений.

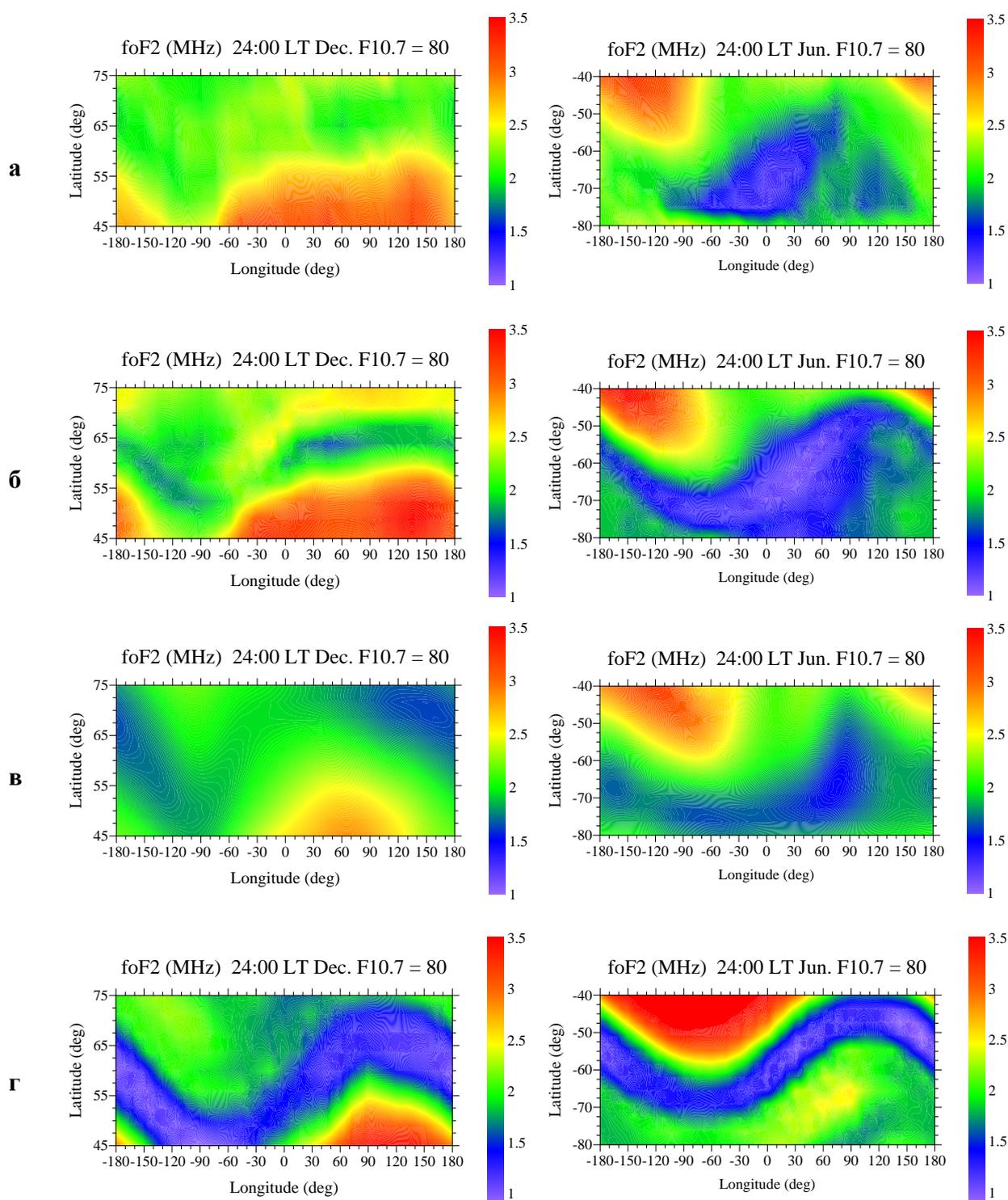
### Описание моделей и данных наблюдений

Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы, Ионосферы и Протоносферы [Намгаладзе и др., 1990] была разработана в Западном отделении ИЗМИРАН. Модель основана на численном интегрировании системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц холодной околоземной плазмы совместно с уравнением для электрического потенциала в интервале высот от 80 км до геоцентрического расстояния в 15 земных радиусов. Интегрирование моделирующих уравнений осуществляется на глобальной пространственной сетке с шагами  $5^\circ$  по широте и  $15^\circ$  по долготе. В модели ГСМ ТИП используется дипольное приближение геомагнитного поля с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. Расчеты проводились с заданием эмпирической модели продольных токов, построенной по данным измерений спутников *Magsat* и *Ørsted* [Lukyanova et al., 2006] для дней зимнего и летнего солнцестояния при низкой ( $F10.7=80$ ) и средней ( $F10.7=121$ ) солнечной активности.

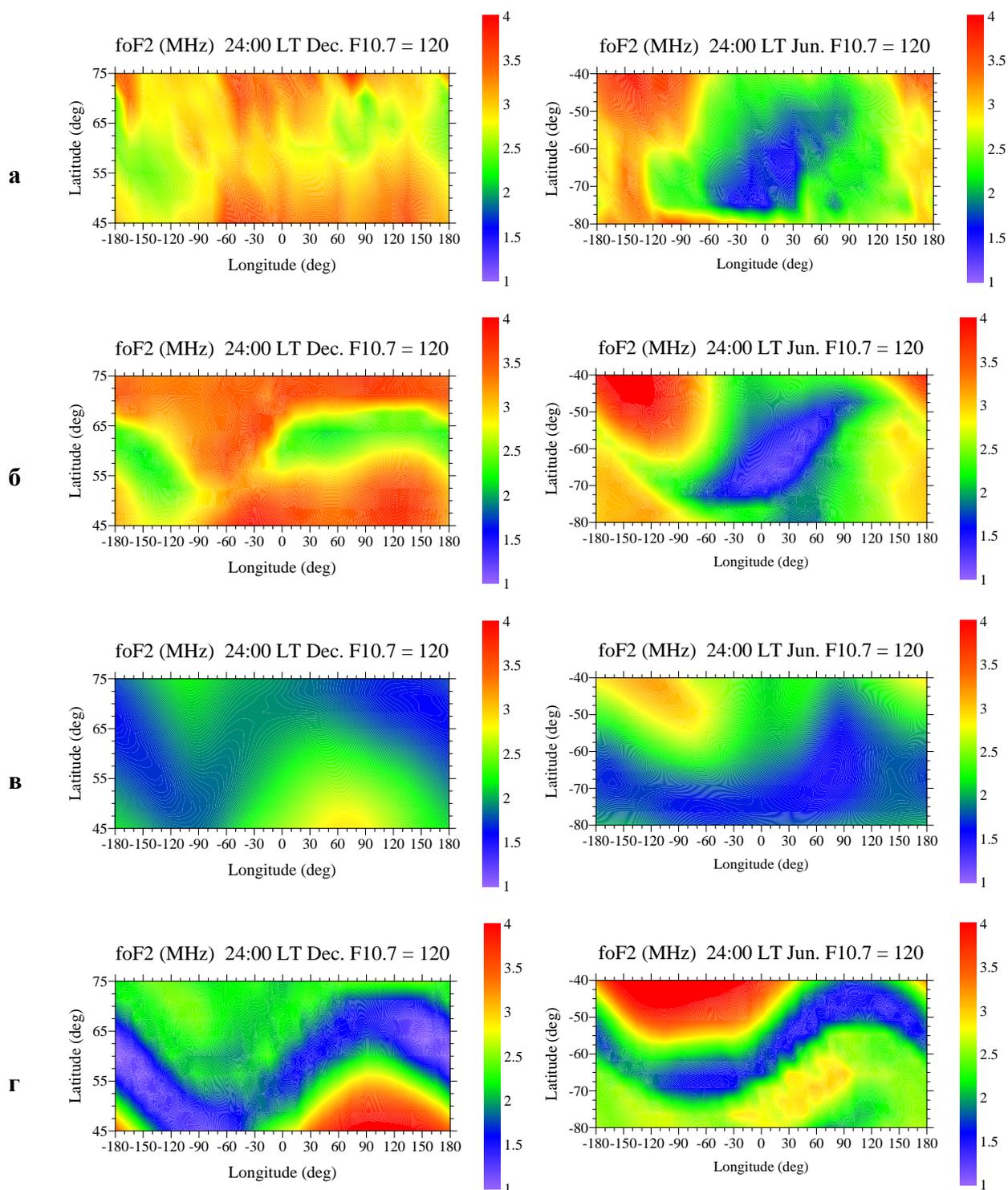
Ранние исследования показали, что опции URSI и CCIR модели International Reference Ionosphere (IRI) в среднем дают хорошие результаты по воспроизведению параметров максимума  $F2$ -слоя на средних широтах в спокойных геомагнитных условиях. В опции CCIR, основанной на экспериментальных данных наземных станций и спутников, моделируемые значения для южного полушария и океанов получают экстраполяцией вдоль линий постоянного магнитного диполя [Jones and Gallet, 1962], тогда как опция URSI использует результаты теоретической модели ионосферы, которые приводятся в соответствие с наблюдаемыми значениями  $foF2$  [Fox and McNamara, 1988]. В международной справочной модели ионосферы IRI структура ГИП специально не выделена и только в одной из глобальных эмпирических моделей, а именно, модели СМИ [Часовитин и др., 1988], приближенно отражена конфигурация ГИП. Модель главного ионосферного провала [Карпачев et al., 2016], созданная в ИЗМИРАН на основе спутниковых данных Интеркосмос-19, Космос-900 и ШАМР, применима в ночное время зимой на всех долготах северного и южного полушария в интервале местного времени 18:00–06:00 LT для любого уровня солнечной активности. Модель описывает среднемесячное климатологическое состояние субавроральной ионосферы для спокойных геомагнитных условий с  $Kp = 2$ . В данной работе также использовались данные наблюдений, полученные радиозатменным методом с помощью спутников ШАМР, GRACE и COSMIC с 2001 по 2015 гг. На основе этих данных для каждого узла глобальной пространственной сетки для полуночных условий зимнего и летнего солнцестояния (ноябрь-февраль и май-август) была найдена линейная зависимость  $foF2$  от индекса солнечной активности  $F_{10.7}$  и были построены карты  $foF2$  в области ГИП.

### Результаты расчетов и обработки данных наблюдений

На рис. 1 и 2 представлены карты распределения  $foF2$  в области главного ионосферного провала, построенные с использованием данных радиозатменных наблюдений и результатам расчетов различных моделей (ГИП, ГСМ ТИП и IRI) для низкой и средней солнечной активности в период зимнего и летнего солнцестояния в 24:00 LT.



**Рисунок 1.** Карты распределения  $foF2$  для 24:00 LT в области главного ионосферного провала в минимуме солнечной активности ( $F_{10.7} = 80$ ) в период зимнего солнцестояния (22 декабря) в северном полушарии (слева) и летнего солнцестояния (22 июня) в южном полушарии (справа), построенные: **а**) по данным радиозатменных (P3) наблюдений, **б**) по результатам эмпирической модели ГИП, **в**) по модели IRI и **г**) по результатам расчетов модели ГСМ ТИП.



**Рисунок 2.** Карты распределения  $foF2$  для 24:00 LT в области главного ионосферного провала при средней солнечной активности ( $F_{10.7} = 120$ ) в период зимнего солнцестояния (22 декабря) в северном полушарии (слева) и летнего солнцестояния (22 июня) в южном полушарии (справа), построенные: **а**) по данным P3 наблюдений, **б**) по результатам расчетов эмпирической модели ГИП, **в**) по модели IRI и **г**) по результатам расчетов модели GCM TIIP.

Для всех представленных карт, кроме тех, которые были построены по модели IRI, характерно существование главного ионосферного провала, т.е. наличие относительно высоких значений  $foF2$  на средних широтах ( $40^{\circ}$ – $50^{\circ}$ ), понижение  $foF2$  при смещении к полюсу ( $55^{\circ}$ – $65^{\circ}$ ) и затем возрастание на более высоких широтах ( $\pm 65^{\circ}$  и выше). Сравнивая  $foF2$  в области главного ионосферного провала, можно отметить хорошее согласие модели ГИП с данными радиозатменных наблюдений. Это согласие значений  $foF2$ , основанных на

экспериментальных данных, полученных различными методами наблюдений, и их соответствие ранее выявленным основным морфологическим особенностям ГИП [Halcrow and Nisbeth, 1977; Kohnlein and Raitt, 1977; Karpachev et al., 1996, 2016], позволяет судить об адекватности и надежности модели ГИП и данных радиозатменных наблюдений в области главного ионосферного провала. Модели IRI и ГСМ ТИП дают результаты, заметно отличающиеся от модели ГИП и данных радиозатменных наблюдений. Например, в минимуме солнечной активности в южном полушарии минимальное значение  $foF2$  в ГИП смещено к востоку, а в северном полушарии  $foF2$  в области широт  $65^{\circ}$ – $75^{\circ}$  возрастает не столь значительно. Различия долготных вариаций  $foF2$  в модели ГСМ ТИП и по данным наблюдений связаны, главным образом, с используемым в модели дипольном приближении геомагнитного поля, а в модели IRI и по данным наблюдений – с малым количеством наземных станций в высоких широтах и с частым отсутствием данных на этих станциях по причине поглощения радиосигналов в области аврорального овала.

## Заключение

Показано, что использование современной модели продольных токов в Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы позволяет количественно воспроизвести величины  $foF2$ , наблюдаемые в области главного ионосферного провала. Для устранения различий в долготных вариациях  $foF2$  в модели ГСМ ТИП и по данным наблюдений необходимо в модели использовать справочную модель магнитного поля (IGRF) вместо дипольного приближения. Медианная модель главного ионосферного провала и данные радиозатменных наблюдений по сравнению с существующими опциями модели IRI лучше описывают распределение  $foF2$  в области главного ионосферного провала, что говорит о том, что они могут быть использованы для долгосрочного прогноза ионосферы субавроральных широт. Модель ГИП применима для любого уровня солнечной активности и размещена на Web-сайте ИЗМИРАН <http://www.izmiran.ru/ionosphere/sm-mit/>. В дальнейшем результаты обработки данных радиозатменных наблюдений планируется использовать для построения глобальной эмпирической модели электронной концентрации в ионосфере Земли.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ №14-05-00788 (Карпачев А.Т., Клименко В.В.) и №15-35-20364 (Клименко М.В.). Работа проводилась в рамках проекта "Физические механизмы формирования реакции верхней атмосферы и ионосферы на процессы в нижней атмосфере и на поверхности Земли" (Государственное задание Министерства образования и науки РФ, конкурсная часть, задание № 3.1127.2014/К). Мы выражаем отдельную благодарность командам GFZ и UCAR за предоставленный доступ к данным радиозатменных наблюдений миссий CHAMP, GRACE (GFZ) и COSMIC (UCAR), соответственно (<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/products.html>).

## Литература

- Карпачев А.Т. (2003). Зависимость формы ГИП от долготы, высоты, сезона, местного времени, солнечной и магнитной активности, Геомагнетизм и аэрномия, 43, 256-269.
- Часовитин Ю.К., Широчков А.В., Беспрозванная А.С., Гуляева Т.Л., Денисенко П.В., Арменская О.А., Иванова С.Е., Каширин А.И., Ключева Н.М., Корякина Е.А., Миронова Л.С., Сыкилинда Т.Н., Шушкова В.Б., Водолазкин В.И., Соцкий В.В., Шейдаков Н.Е. (1988). Глобальная эмпирическая модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере, Ионосферные исследования, М.: № 44, 6-15.
- Намгаладзе А.А., Кореньков Ю.Н., Клименко В.В., Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Суроткин В.А., Глущенко Т.А., Наумова Н.М. (1990). Глобальная численная модель термосферы, ионосферы и протоносферы Земли, Геомагнетизм и аэрномия, 30, № 4, 612–619.
- Fox M.W., McNamara L.F. (1988), Improved world-wide maps of monthly median  $foF2$ , Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 50, № 12, 1077.
- Halcrow B.W., Nisbeth J.S. (1977). A model of F2 peak electron densities in the main trough of the ionosphere, Radio Science, 12, 815-820.
- Jones W.B., Gallet R.M. (1962), The representation of diurnal and geographic variations of ionospheric data by numerical methods, Journal of Research of the National Bureau of Standards, 66D, № 4, 129.
- Karpachev A.T., Deminov M.G., Afonin V.V. (1996). Model of the mid-latitude ionospheric trough on the base of Cosmos-900 and Intercosmos-19 satellites data, Adv. Space Res., 18, 221-230.
- Karpachev A.T., Klimenko M.V., Klimenko V.V., Pustovalova L.V. (2016), Empirical model of the main ionospheric trough for the nighttime winter conditions, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 146, 149-159, doi:10.1016/j.jastp.2016.05.008.
- Kohnlein W., Raitt W.J. (1977). Position of the mid-latitude trough in the topside ionosphere as deduced from ESRO-4 observations, Planet. Space Sci., 25, 600-602.
- Lukianova R., Christiansen F. (2006), Modeling of the global distribution of ionospheric electric field based on realistic maps of field-aligned currents, J. Geophys. Res. 111, A03213, doi:10.1029/2005JA011465.