

Моделирование распространения радиоволн в ионосфере по данным радиотомографии и модели IRI

М.А. Бутримов, А.С. Крюковский, Д.С. Лукин

Негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Российский новый университет», Москва, ул. Радио, 22, Kryukovsky@rambler.ru

Выполнены расчеты, направленные на изучение проблемы применимости эмпирических моделей ионосферы в качестве источников данных для построения лучевых структур распространения радиоволн. Выбраны данные о электронной концентрации, полученные методом радиотомографии и данные, полученные с помощью модели IRI. Показано, что в зоне экваториальной аномалии результаты, полученные с помощью модели IRI, существенно расходятся с результатами, полученным по экспериментальным данным. Показано, что на основе модели IRI не всегда возможно построение достоверных прогнозов радиосвязи, и необходима корректировка моделей экспериментальными данными, наиболее перспективным из которых является метод радиотомографии.

A number of calculations directed on study of the following question is made: whether the empirical ionospheric models are suitable as sources given, ray structures, used for construction, of radiowave propagation. As a basis for researches the data about electronic concentration received by an experimental way by a method radio tomography and with the help of the model IRI were chosen. The calculations have shown, that in a so-called zone of equatorial anomaly of distribution of areas of high and low electronic concentration, the results received with the help of model IRI sometimes essentially missed results received on experimental data.. Is shown, that on the basis of model IRI the construction of the authentic forecasts of a radio communication is not always possible, and the updating of models by experimental data is necessary, most perspective of which is the radio tomography method.

Введение.

Изучение распространения радиоволн коротковолнового диапазона в условиях реальных моделей ионосферы Земли является актуальной проблемой радиофизики. Известны различные прогностические модели ионосферы: теоретические, эмпирические и полуэмпирические. Теоретические модели требуют больших вычислительных затрат как по ресурсам, так и по времени расчета. Поэтому они мало пригодны для реализации в автоматической системе прогнозирования. От этого недостатка не свободны и полуэмпирические модели, хотя они сочетают в себе достоинства теоретических и эмпирических моделей. В последнее время большое распространение получили эмпирические модели ионосферы.

Наиболее распространенным является проект IRI (International Reference Ionosphere) – международный справочник ионосферы [1]. Спонсируемый крупнейшими исследовательскими центрами, этот справочник представляет собой эмпирическую модель ионосферы, построенную на основе данных из таких источников, как международная сеть специальных ионозондов для изучения ионосферы, мощных радаров некогерентного рассеяния, спутников, предназначенных для изучения ионосферы, и многих других. Данные в модели IRI обновляются ежегодно. IRI позволяет пакетно выгружать большие объемы информации в удобном виде, что даёт возможность использовать их для проведения вычислений. Модель IRI написана на языке фортран, распространяется свободно.

Ионосфера состоит из нескольких слоев. На высотах от 60 до 90 километров располагается слой D – слой низкой электронной концентрации, то есть область слабой ионизации. Верхний слой ионосферы (F) это слой с наиболее высокой степенью

ионизации. Он играет основную роль в процессе отражения радиоволн. Слой F имеет сложную внутреннюю структуру, зависящую от многих факторов. Летом он распадается на два слоя F1 и F2. Первый занимает высоты от 200 до 250 км, а второй плавает на высотах от 300 и до 400 километров и выше. Ночью слой F1 исчезает, а слой F2 остается, существенно теряя в ионизации. Ниже слоя F между слоем F и D находится слой E, ионизируемый мягким рентгеновским излучением Солнца. Степень его ионизации ниже, чем у слоя F и ночью резко уменьшается. Однако он продолжает играть существенную роль для сигналов определенных частот. В слое E могут возникать облака с сильной ионизацией (количество свободных электронов в них высоко). Площадь этих облаков может достигать сотен километров. Под действием ветра они могут дрейфовать со скоростью до 250 км/час. Такие облака практически всегда присутствуют в экваториальных районах, а в ночное время суток могут возникать и в более высоких широтах.

Экваториальная аномалия [2-3] – наиболее значительная аномалия в слое F2, составляющая конкуренцию по своей величине регулярным суточным изменениям электронной концентрации. Для слоев E и F1 максимум ионизации приходится на подсолнечную область. Однако для области F2 это не так. Вне зависимости от положения подсолнечной области днем, электронная концентрация внутри слоя F2 возрастает при приближении к низким широтам и достигает своего максимума в районе 15-20°, в то время как у экватора образуются своеобразные минимумы. Это происходит из-за того, что под действием гидродинамического эффекта на высотах слоя F2 возникает электрическое поле, направленное на восток. Над геомагнитным экватором возникает термодиффузия и дрейф плазмы, направленный вверх. В результате этого экваториальная область F2 получает дополнительные свободные электроны. Достигнув высот порядка 1000 км, эта плазма растекается на север и юг вдоль магнитных силовых линий, в свою очередь, продолжая обогащать область F2.

Для того чтобы можно было говорить о корректности данных, получаемых с помощью модели IRI, необходимо произвести сопоставление результатов расчетов на основе данных, полученных с помощью эксперимента (в данном случае – с помощью метода радиотомографии [4-5]) с результатами расчетов на основе данных, полученных из эмпирической модели IRI. Выполним расчет лучевой структуры радиосигнала методом бихарактеристик [6] для различных временных и географических условий в зоне экваториальной аномалии вдоль 121-го меридиана и сравним результаты (см. также [7-11]). Для оценки точности возьмём источник радиосигнала с частотами 7 и 16 МГц, излучающий пучок волн с различными углами места. Рассмотрим результаты, соответствующие различным датам наблюдений.

1. Дата: 05.11.1994, время 05:45UT, диапазон широт от 6,91 до 30,47 градусов.

На рис. 1. (результаты радиотомографии) и 2 (модель IRI) представлены линии равного уровня электронной концентрации и лучевые траектории для рабочей частоты 7 МГц. Из сопоставления рисунков 1 и 2 хорошо видно, что, несмотря на то, что общая картина распределения концентрации электронов внутри слоя F в модели IRI передана относительно верно, многие нюансы потеряны и не отображены. Расхождение в точке приема некоторых волн достигает 300 км, что говорит о довольно низкой точности. Однако с изменением угла места точность немного улучшается. Система лучевых траекторий в случае модели IRI в высокой степени точности симметрична, что не имеет места в случае модели, построенной на результатах радиотомографии. Стоит также отметить совершенно разный угол наклона большой оси главного максимума электронной концентрации в этих моделях.

Рассмотрим прохождение волны с частотой 16 МГц для тех же данных. Часть лучей теперь проходит слой ионосферной плазмы, но для этих лучей симметрия относительно вертикальной оси нарушается уже для модели IRI.

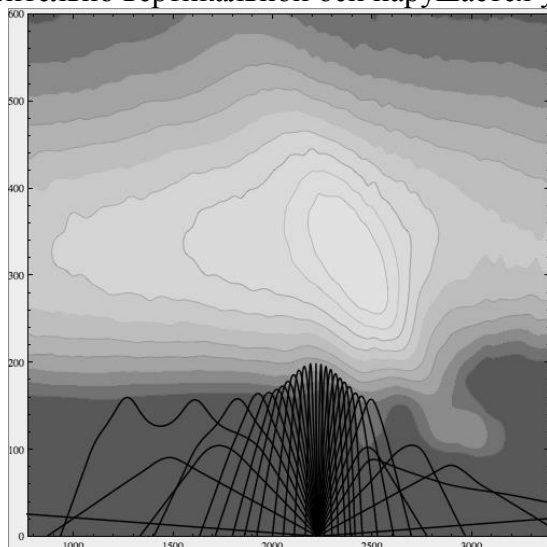


Рис. 1. 7 МГц, радиотомография

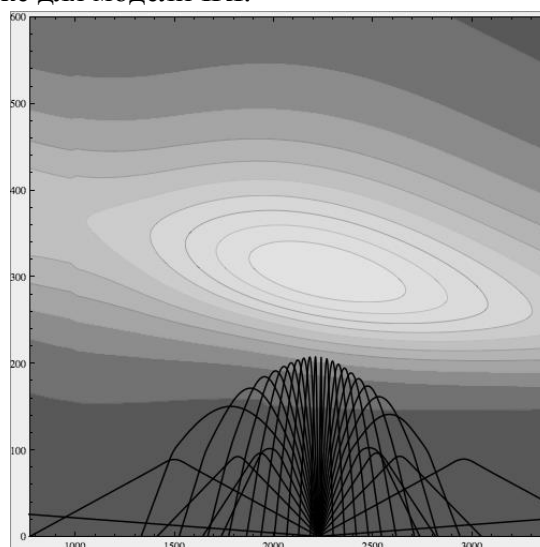


Рис. 2. 7 МГц, модель IRI

По-прежнему в модели IRI скрыты многие нюансы. Расположение источника непосредственно под высокоионизированным облаком в слое F2 выявляет ряд внутренних ионосферных переотражений волны, потерянных при использовании данных из эмпирической модели IRI.

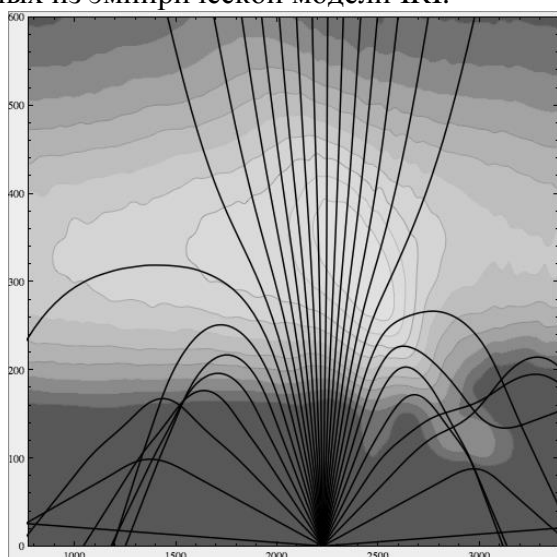


Рис. 3. 16 МГц, радиотомография

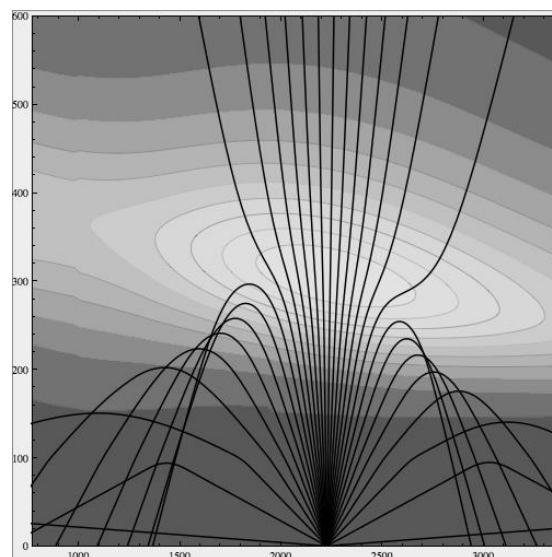


Рис. 4. 16 МГц, модель IRI

Многие волны, очевидно, будут распространяться внутриионосферно, пока не покинут пределы аномалии, и лишь потом могут быть отражены на землю, в то время как подобные нюансы не получают отражения в IRI. На рис. 3. в правой части видно возникновение канализированного распространения, отсутствующего на рис. 4.

2. Дата: 07.10.1994, время 07:40UT, диапазон широт от 11,69 до 30,39 градусов.

На рис. 5 и 6 сопоставлены модели для частоты 7 МГц. Для этой области ионосферы характерна практически полная потеря корреляции картины распределения электронной концентрации.

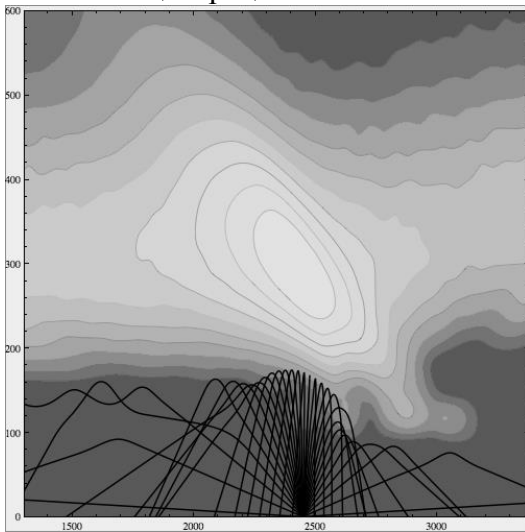


Рис. 5. 7 МГц, радиотомография

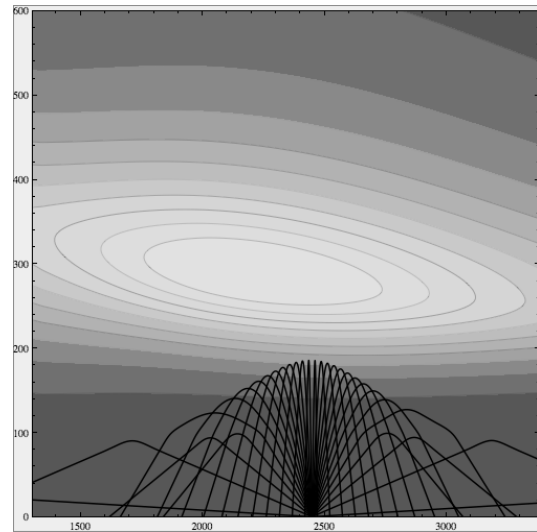


Рис. 6. 7 МГц, модель IRI

Лишь отражение распределения высот слоев с различной степенью ионизации можно назвать переданным условно верно. Все нюансы в модели IRI полностью исчезли. В зависимости от угла места точность прихода лучевых траекторий гуляет в очень широких пределах.

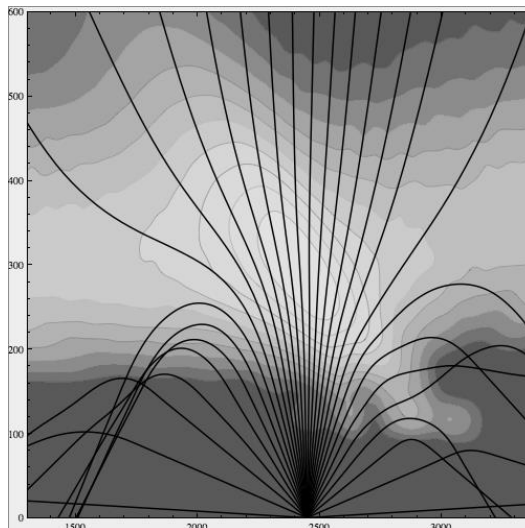


Рис. 7. 16 МГц, радиотомография

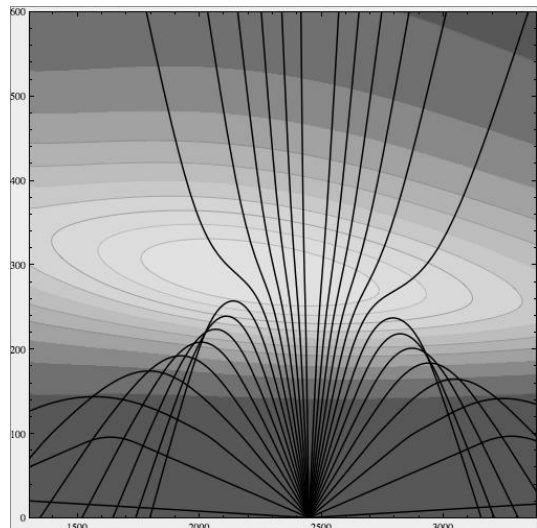


Рис. 8. 16 МГц, модель IRI

Посмотрим, что изменится при переходе к 16 МГц (рис. 7 и 8). Полностью потеряна сложная структура нижних участков слоя F2, характер распространения передается крайне неточно. Однако поразительным образом некоторые углы места дают хорошее согласование для обеих моделей. Тем не менее, это исключение из правил, лишний раз показывающее, что при желании можно подобрать такие данные, при которых модель будет верно повторять результаты эксперимента.

3. Дата: 18.10.1994, время 07:10UT, диапазон широт от 10.92 до 30.47 градусов.

Как и в предыдущих случаях на рис. 9 и 10 сопоставлены результаты траекторных расчетов для частоты 7 МГц. Следует отметить, что согласно данным радиотомографии (в отличие от модели IRI) экваториальная аномалий крайне несимметрична. Чем выше угол места тем выше точность модели при траекторных расчетах. Однако, с уменьшением угла места расхождение результатов расчета, полученных по разным моделям, растет.

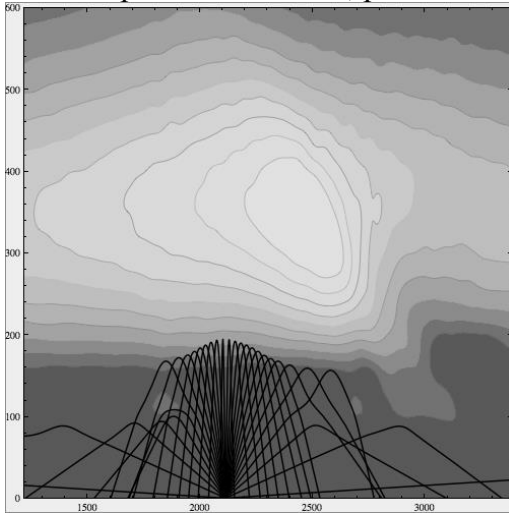


Рис. 9. 7 МГц, радиотомография

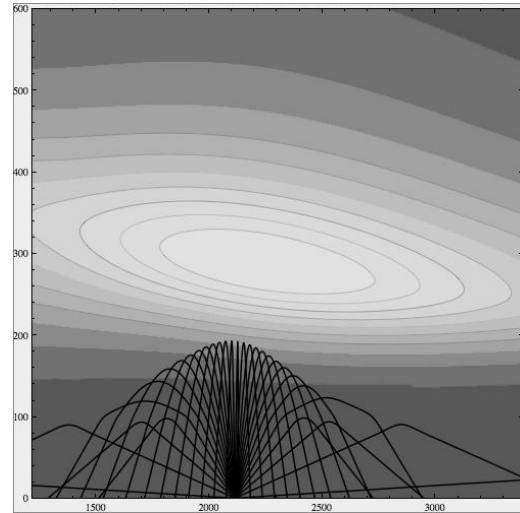


Рис. 10. 7 МГц, модель IRI

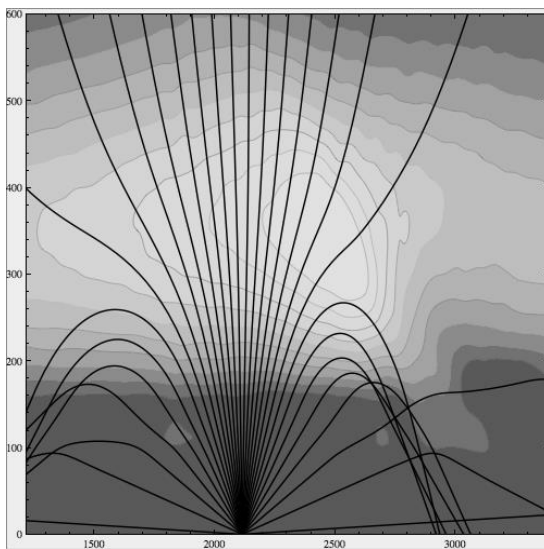


Рис. 11. 16 МГц, радиотомография

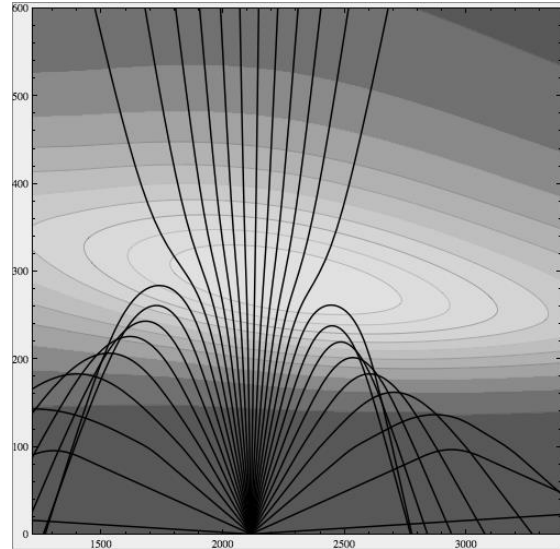


Рис. 12. 16 МГц, модель IRI

Рассмотрим ситуацию с 16 мегагерцовой волной. Экспериментальные данные показывают крайне интересное внутриионосферное многоскачковое распространение внутри нижней части слоя F2 для волны в 16 МГц. Для определенных углов места модель IRI пригодна для расчетов. Однако с уменьшением угла места увеличивается сложность характера распространения волн, что делает модель практически непригодной для траекторных вычислений при отсутствии дополнительной коррекции.

Заключение

Зона экваториальной аномалии – настоящее испытание для эмпирических моделей, и они показывают определенно недостаточную точность относительно экспериментальных данных. Тем не менее, зачастую из-за отсутствия экспериментальных данных, для некоторых частот и углов места, для грубой оценки можно использовать данные эмпирических моделей, однако многие интересные нюансы распределения электронных концентраций в данном случае будут недоступны.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00413-а, № 13-07-00937, ОФИ_М № 13-02-12121).

Литература

1. Bilitza D., McKinnell L.-A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. The International Reference Ionosphere (IRI) today and in the future // J. Geodesy, 85:909-920, DOI 10.1007/s00190-010-0427-x, 2011.
2. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images, Radio Science, 2003, v. 38, No.1, p.1011-1020.
3. Андреева Е.С., Крюковский А.С., Куницын В.Е., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Кирьянова К.С. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии. // «Распространение радиоволн», сб. докл. XXIII Всероссийской научной конференции. (23–26 мая 2011; Йошкар-Ола) /Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. Т.3 С. 288-291.
4. Куницын В.Е., Е.Д.Терещенко, Е.С.Андреева. Радиотомография ионосферы. М., Физматлит, 2007, 345 с.
5. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Franke S.J., Yeh K.C. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // Geophysical Research Letters, 2003, V.30, No.16, 1851-1854.
6. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т.14. № 8. С. 17-26.
7. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т.15. № 8. С. 5-11.
8. Крюковский А.С., Кирьянова К.С. Особенности лучевого распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии. // Электромагнитные волны и электронные системы, 2011, № 8, стр. 21-24.
9. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. // Радиотехника и электроника, М.: Наука. 2012. Т.57. №9. С. 1028-1034.
10. Kiryanova K.S., Kryukovsky A.S., Lukin D.S. Simulation of decametric wave propagation un the ionospheric plasma. // Revista de Matematica. Teoria y Aplicaciones, 2013. V. 20. № 1. P. 21-34.
11. Бутримов М.А., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Сопоставление результатов численного моделирования распространения радиоволн на основе модели ионосферы Земли, основанной на данных радиотомографии, и модели IRI //Вестник Российского нового университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика» / М.: РосНОУ, 2013. Выпуск 4. – С. 7–11.