

## Численное моделирование амплитудных карт для скорректированной модели IRI-2012 с периодическим возмущением ионосферы

А.С.Крюковский, В.И.Куркин, О.А.Ларюнин, Д.С.Лукин, А.В.Подлесный,  
Д.В.Растягаев, Я.М.Черняк

*Лаборатория комплексного мониторинга ионосферы Арктической зоны  
Российская Федерация, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-а, E-mail: JackCh@mail.ru*

*С помощью метода бихарактеристик, глобальной модели электронной концентрации в ионосфере IRI-2012, скорректированной по экспериментальным данным, и модели магнитного поля Земли World Magnetic Model проведено численное моделирование распространения коротких волн на короткой трассе. Показано, что периодическое возмущение ионосферы может являться причиной возникновения вертикальных структур на амплитудных картах. Проведено качественное сравнение расчетных и экспериментальных данных.*

*Numerical simulation of short wave propagation on short distance was carried out with use of bi-characteristic method, global electron density model IRI-2012 corrected with experimental data and World Magnetic Model. Periodic perturbation of the ionosphere is likely to be a cause of vertical structures on the amplitude maps. Qualitative comparisons of calculated and experimental data are shown.*

Исследование различных ионосферных неоднородностей представляет важную роль в изучении распространения коротких волн. Численное моделирование позволяет описывать поведение, оценивать характеристики волн, а так же совершенствовать точность различных измерений, имеющих прямое или косвенное отношение к ионосфере. Подобные исследования помогают лучше понять процессы, происходящие в ионосфере Земли и в долгосрочной перспективе скорректировать имеющиеся представления и модели.

Рассмотрим экспериментальные данные на 16.09.2013 (см. рис. 1) по временной динамике зависимости амплитуды от частоты на Трассе Усолье – Торы (120 км) [1]. По горизонтали указано время по UTC, по вертикали – частота. Оттенками серого обозначена измеренная амплитуда сигнала. На этой амплитудной карте (А-карте) можно обнаружить чередующиеся вертикальные полосы. Попробуем получить аналогичный результат с помощью численного моделирования амплитудной карты на этот день по данным модели IRI с учётом корректировки модели и синусоидального возмущения ионосферы.

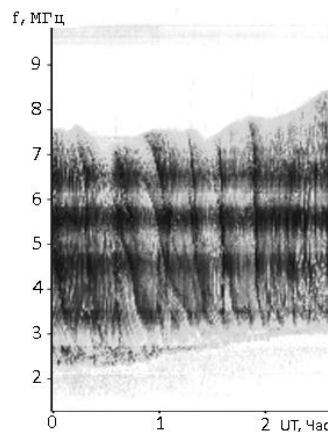


Рис. 1. Экспериментально полученная А-карта на трассе Усолье-Торы на 16.09.2013.

Для расчёта лучевой структуры применяется численное интегрирование бихарактеристической системы обыкновенных дифференциальных уравнений [2-7]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \left( \frac{c^2}{\omega} \vec{k} - \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{k}} \right) \left( \varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right)^{-1} \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{r}} \left[ \varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1}, \quad (1)$$

с начальными условиями, которые рассчитываются исходя из географической широты, долготы и высоты источника и углов выхода лучей из источника.

При расчёте Земля считается сферической, а центр координат расположен в её центре. Для решения вопроса о многоскачковом распространении реализован алгоритм, описывающий зеркальное отражение луча от поверхности земли.

Интенсивность на луче определялась исходя из оценки столкновительного поглощения и Якобиана расходимости.

Для учёта эффекта смещения луча вследствие боковых градиентов, необходима полная информация об электронной концентрации в окрестности заданной области, а для вычисления амплитудной карты необходимо иметь информацию о естественном динамическом изменении электронной концентрации в ионосфере. Поэтому для определения электронной концентрации использовалась модель глобального распределения электронной IRI-2012 [8]. Используя эту модель можно построить пространственную трёхмерную решётку, в узлах которой определена электронная концентрация. Для решения задачи распространения коротких волн в ионосферной плазме необходима непрерывность вторых производных электронной концентрации по всем направлениям. Поэтому значение электронной концентрации между узлами решётки можно получить используя интерполяцию кубическими сплайнами в трёхмерном пространстве. Такая интерполяция позволяет определить значение в любой точке по 64 ближайшим соседним точкам и при этом обеспечить непрерывность вторых производных по всем пространственным направлениям. Значения электронной концентрации в узловых точках сетки программа вычисляет с помощью модели IRI-2012 только по мере необходимости. Таким образом, расчёт электронной концентрации ионосферы выполняется только в окрестности области распространения луча.

Перед расчетом была проведена корректировка данных трёхмерной модели IRI-2012. Исходными данными корректировки были экспериментальные данные по вертикальному зондированию над посёлком Торы (Республика Бурятия) [1,9,10]. По этим данным было проведено преобразование в виде сдвига, сжатия/растяжения профиля IRI над Торми таким образом, что высоты и значения максимумов слоёв E и F2 совпали. То же самое преобразование с теми же коэффициентами выполнялось для профиля электронной концентрации на всей трассе. Таким образом, экспериментальное распределение электронной концентрации над Торами приблизительно совпало со скорректированной моделью IRI-2012. При этом сохранилась информация о боковых градиентах в данной местности, а так же временная зависимость электронной концентрации в окрестности интересующего нас времени.

Для получения вектора напряжённости магнитного поля Земли использовалась модель World Magnetic Model (WMM) [11].

Согласно предположению о том, что причиной вертикальных полос на амплитудной карте является периодическая неоднородность, для численного моделирования выбрана синусоидальная модуляция. Тогда промодулированная электронная концентрация  $Ne_{Modulation}$  может быть выражена через исходную концентрацию  $Ne_0$  следующим образом:

$$Ne_{Modulation} = \left( 1 + Md \cdot \left( \frac{1}{2} - F(Lat, Lon) \right) \right) \cdot Ne_0 \quad (2)$$

где  $Md$  – глубина модуляции,

$F$  – периодическая функция, задающая периодическую неоднородность,

$Lat$  и  $Lon$  – широта и долгота соответственно, выраженные в радианах.

Неоднородность может быть повернута на некоторый произвольный угол  $\beta$  относительно экватора, одинаковый для всего рассматриваемого региона. Тогда функция  $F$  может определяться формулой:

$$F(Lat, Lon) = \sin \left[ \frac{(Lat \cdot \cos(\beta) / \cos(Lat) - Lon \cdot \sin(\beta))}{M} + \Phi \right], \quad (3)$$

где  $M$  – масштабный множитель, пропорциональный аналогу длине волны в периодической функции.

Фазовое смещение синусоидальной неоднородности зависит от времени:  $\Phi = \frac{2\pi \cdot t}{T}$ ,

где  $T$  – период неоднородности, а  $t$  – текущее время. Кроме коэффициента  $M$ , расстояние между максимумами зависит и от широты, что является недостатком такого способа задания неоднородности. Однако этот недостаток практически отсутствует при  $M$  порядка и меньше единицы. В этом случае достаточно точно описывает расстояние между максимумами следующая формула:

$$D(Lat, M) = \frac{2\pi^2 \cdot R_{EARTH} M \cos(Lat)}{180}. \quad (4)$$

Типичная картина лучевой структуры в случае периодической неоднородности показана на рис. 2. Чтобы не загромождать рисунки, на них показан только первый скачок. По вертикальной оси отсчитывается высота, по горизонтальной оси – расстояние вдоль трассы Усолье-Торы.

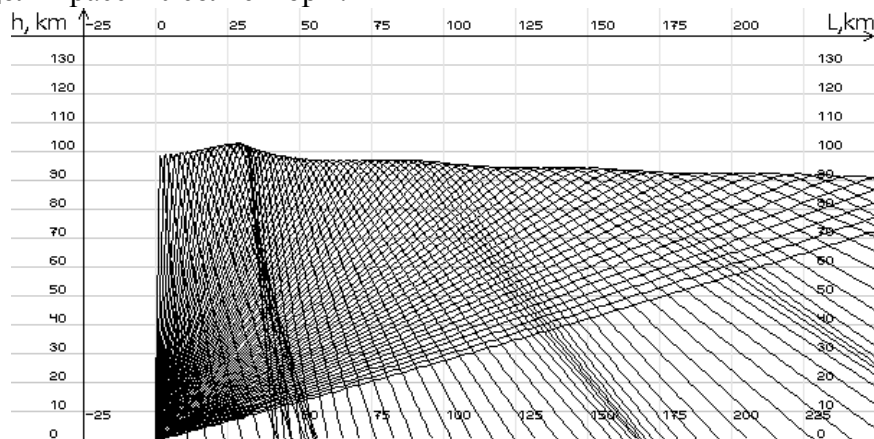


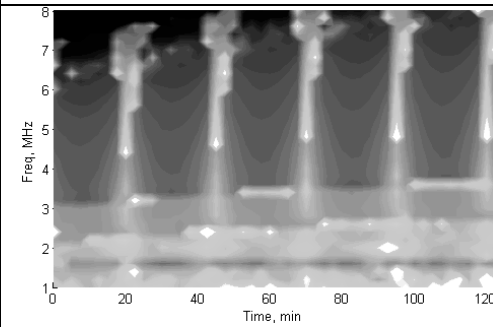
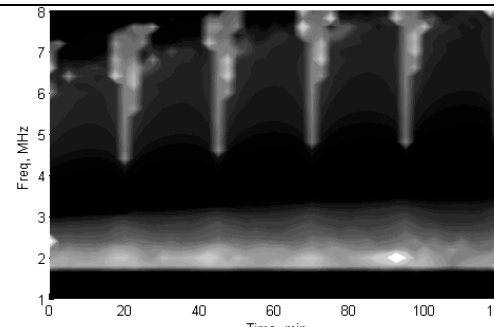
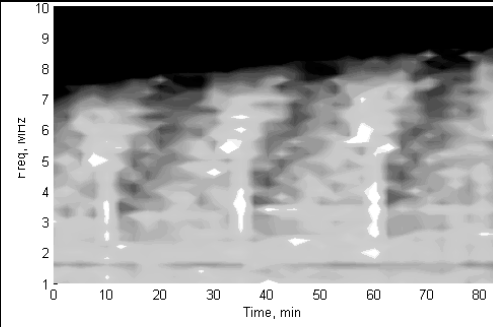
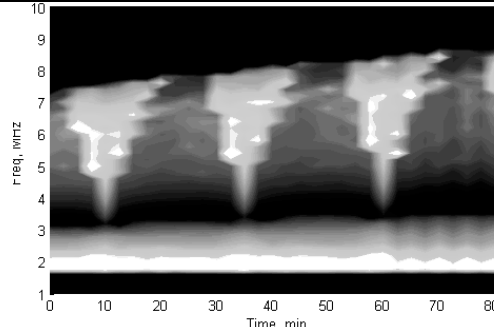
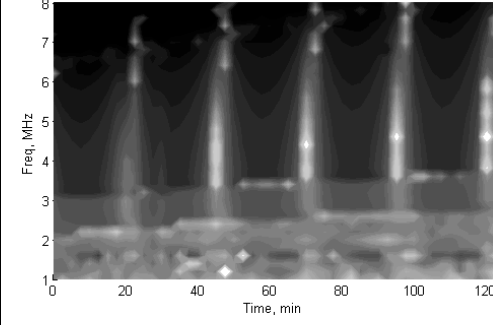
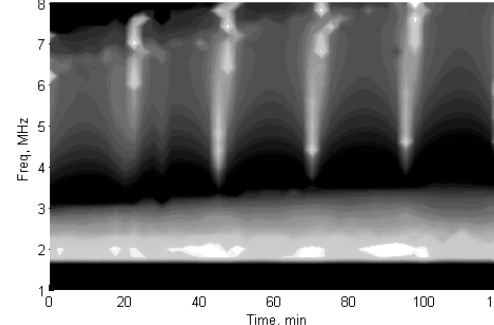
Рис. 2. Пример лучевой структуры на трассе Усолье-Торы. Частота 2.9 МГц.

Вследствие расходимости, можно видеть периодически повторяющиеся фокусировки и дефокусировки, то есть чередующиеся области повышенной и пониженной амплитуды проходящей волны. Если приёмный пункт находится или в области фокусировки, или в области дефокусировки, то это может объяснить природу наблюдаемой структуры на амплитудной карте.

Численный расчёт А-карты проводился с шагом 0,2 МГц по частоте и с шагом 2 минуты 30 секунд по времени. Расчет вёлся для короткого временного промежутка (1-2

часа) начиная с 00:00 UTC. Моделирование проводилось как для обыкновенной, так и для необыкновенной волны. Результаты, полученные при различных параметрах, представлены в таблице 1. Для удобства представления различных областей на графиках, светлым цветом обозначена большая амплитуда. В таблице  $\beta$  обозначен угол поворота периодической неоднородности относительно трассы,  $M$  – масштабный коэффициент,  $D_{\text{Торы}}$  – расстояние между соседними максимумами синусоидальной неоднородности на широте населённого пункта Торы,  $T$  – период неоднородности.

Таблица 1. Численный расчёт А-карт.

Значения переменных	Только Якобиан расходимости	Якобиан расходимости + поглощение
$\beta = 0$ , $M = 0.3$ , $D_{\text{Торы}} = 129 \text{ км}$ $T = 25 \text{ мин}$		
$\beta = 0$ , $M = 0.4418$ , $D_{\text{Торы}} = 190 \text{ км}$ $T = 25 \text{ мин}$		
$\beta = \frac{\pi}{4}$ , $M = 0.3$ , $D_{\text{Торы}} = 129 \text{ км}$ $T = 25 \text{ мин}$		

При расчете учитывалось два переотражения от Земли – три скачка. В соответствии с формулой столкновительного поглощения, на каждом из переотражений, при уменьшении частоты увеличивается поглощение. На рисунках с поглощением, для первого скачка на частотах с 8 по 3 МГц, можно видеть падение амплитуды. На трёх мегагерцах и ниже амплитуда вновь резко возрастает, так как она соответствует уже второму скачку. На двух мегагерцах амплитуда возрастает вследствие третьего скачка. На частотах меньших 1.8 МГц, поле вновь падает, что соответствует экспериментальным данным.

Вертикальные полосы с повышенной амплитудой соответствующие фокусировкам электромагнитного поля аналогичны наблюдаемым полосам по своему характеру и по периодичности.

Таким образом, модель IRI-2012 была скорректирована по экспериментальным данным для выбранного времени и были подобраны параметры периодических синусоидальных неоднородностей электронной концентрации ионосферной плазмы. Для полученной периодической неоднородной электронной концентрации с помощью метода бихарактеристик построены и проанализированы лучевые структуры. На полученной путём численного расчета амплитудной карте хорошо наблюдается структура вертикальных полос фокусировки коротких радиоволн, которые соответствуют экспериментальным данным, полученным в работе [1].

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного фонда (проект № 14-37-00027).*

### **Литература**

1. Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В., Черняк Я.М., Лукин Д.С., Крюковский А.С., Растягаев Д.В. Исследование квазипериодических ионосферных возмущений с помощью амплитудных карт // *Нелинейный мир*, 2014. Т.12. № 12.
2. Казанцев А.Н., Лукин Д.С. Исследование ионосферного распространения радиоволн. // *Радиотехника и электроника*. 1967. Т.12. № 2. С. 1891.
3. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере // *Космические исследования*. 1967. Т.5. № 4. С.593.
4. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде // *Радиотехника и электроника*. 1969. Т.14. № 9. С. 1673.
5. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Фоминых С.И. Метод расчета рефракции радиоволн и рефракционных ошибок при определении траектории ИСЗ // *Космические исследования*. 1967. Т. 5. № 4. С. 602.
6. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Математическое моделирование распространения радиоволн в анизотропной неоднородной ионосфере // *Вестник Российского нового университета. Сер. «Управление, вычислительная техника и информатика»*. 2009. Вып. 2. С. 7.
7. 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.
8. Черняк Я.М. Численное моделирование распространения коротких волн с учётом магнитного поля земли и модели IRI-2012 глобального распределения электронной концентрации // *Радиотехника и электроника*. 2014. Т. 59. № 3. С. 253-259.
9. Куркин В.И., Ларюнин О.А., Подлесный А.В., Пежемская М.Д., Чистякова Л.В. Морфологические особенности признаков перемещающихся ионосферных неоднородностей по данным слабонаклонного зондирования ионосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 2014. Т.27. №2. С. 158-163.
10. Ларюнин О.А., Куркин В.И., Подлесный А.В. Использование данных двух близко расположенных ионозондов при диагностике перемещающихся ионосферных возмущений // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т.19. №1. С. 10-17.
11. Лукин Д.С., Крюковский А.С., Черняк Я.М. Анализ влияния моделей магнитного поля при численном моделировании распространения коротких волн в ионосфере Земли // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2014. Т. 8. № 12. С. 55-58.