



УДК 550.388.2

В.П. Урядов, д.ф.-м.н., зав. сектором НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а

Ф.И. Выборнов, д.ф.-м.н., профессор ВГУВТ, внс НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а

А.В. Першин, мнс НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского
603950, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, д. 25/12а

КРАТКОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОСВЯЗИ

Ключевые слова: ионосфера, распространение радиоволн, коротковолновый диапазон, ЛЧМ сигнал, прогнозирование радиосвязи.

Представлены результаты прогнозирования и экстраполяции максимально применимой частоты (МПЧ) на субавроральных и среднеширотной трассах путем адаптации справочной модели ионосферы IRI-2012 к результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы на контрольных и рабочих трассах с приемным пунктом в Нижнем Новгороде.

Введение

Эффективное управление системами коротковолновой (КВ) радиосвязью целиком зависит от точности и оперативности прогнозирования характеристик ионосферного радиоканала. Различают долгосрочное и краткосрочное прогнозирование. Долгосрочное прогнозирование, имеющее важное значение для выбора стратегии функционирования коротковолновых радиотехнических систем, основано на статистической модели ионосферных параметров и может выполняться для любой даты и времени суток. В настоящее время, как правило, долгосрочное прогнозирование выполняется с использованием справочной модели ионосферы International Reference Ionosphere (IRI), разработанной и постоянно корректируемой рабочей группой в рамках проекта URSI COSPAR [1]. Эффективность такого прогнозирования зависит от гелиогеофизических условий.

Краткосрочное прогнозирование (на день, час или несколько минут) проводится с использованием мониторинга ионосферных параметров. Для корректировки ионосферных параметров и повышения точности прогноза используют данные вертикального (ВЗ), наклонного (НЗ) и возвратно-наклонного (ВНЗ) зондирования ионосферы, полученные в реальном масштабе времени. Наличие сети таких станций позволяет оперативно получать сведения о реальном состоянии ионосферы в контрольных точках и экстраполировать их на близлежащий регион, где средства зондирования ионосферного канала отсутствуют.

Схема эксперимента и результаты наблюдений

Исследования пространственно-временных корреляционных связей максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) проводились на субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования Соданкюля (Финляндия) – Нижний Новгород, Ловозеро (Мурманская обл.)

– Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород и на среднеширотной трассе ст. Горьковская (Ленинградская обл.) – Нижний Новгород.

Наблюдения проводились в 2016 – 2017 годах. Здесь представлены результаты прогнозирования МПЧ для условий спокойной ионосферы 17.12.2016 г. с магнитным индексом $K_p = 1-2$. Передатчики в Ловозеро, Салехарде, Диксоне и ст. Горьковская работали круглосуточно в диапазоне частот 2-30 МГц со скоростью перестройки частоты 550 кГц/с с интервалом зондирования 15 минут. Передатчик в Соданкюля работал в диапазоне частот 2 – 16 МГц со скоростью перестройки частоты 500 кГц/с и интервалом зондирования 5 минут. Схема эксперимента показана на рис. 1.

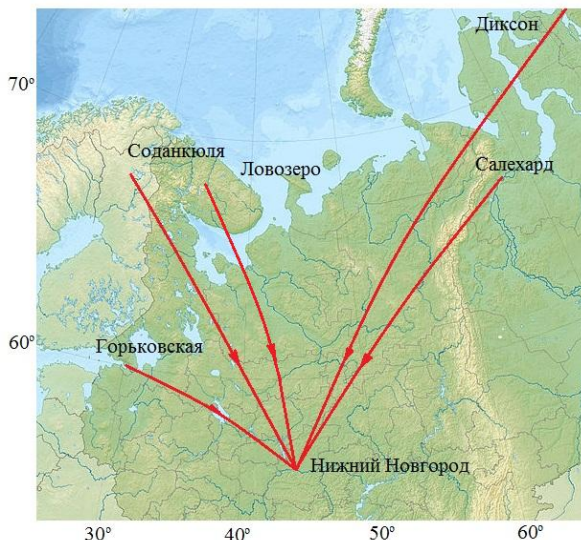
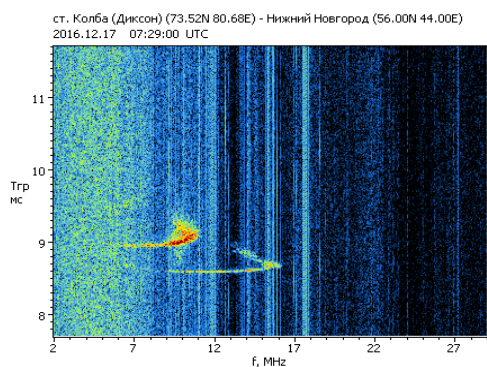


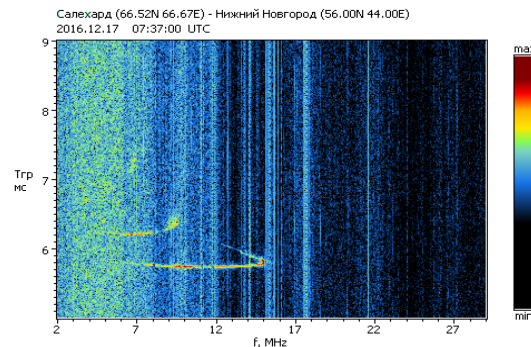
Рис.1

На рис. 2 приведены зависимости времени задержки распространения ЛЧМ сигнала от частоты (ионограммы) для трасс Диксон – Нижний Новгород (а), Салехард – Нижний Новгород (б), ст. Горьковская (Ленинградская обл.) – Нижний Новгород (в) и Ловозеро (Мурманская обл.) – Нижний Новгород (в) в близкие моменты времени (07:29 – 07:37 UT) 17 декабря 2016 года.

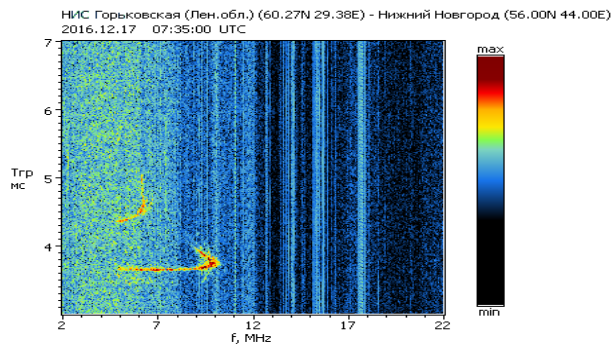
Для всех трасс эксперимента по полученным массивам ионограмм определялись максимально наблюдаемые частоты моды 1F2 для интервала прогноза.



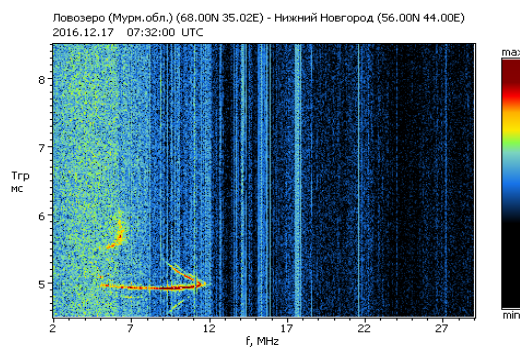
а



б



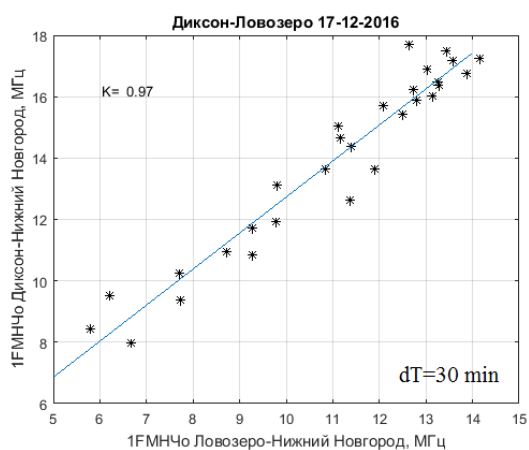
В



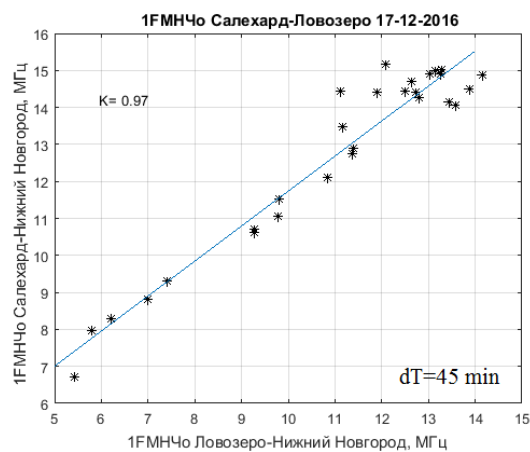
Г

Рис. 2

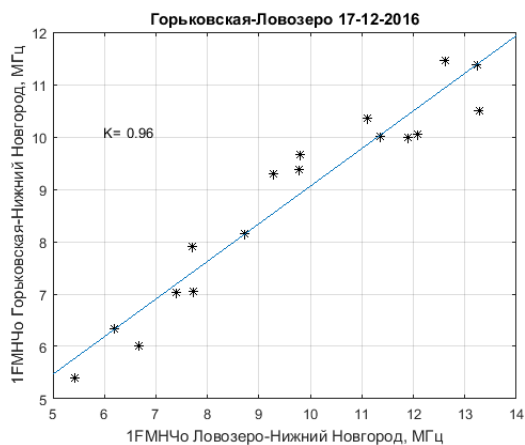
На основе измерений МНЧ определялись коэффициенты временной и пространственной корреляции. Согласно полученным данным коэффициент корреляции МНЧ моды 1F2 на интервал прогноза $\tau \approx 0,5 - 1$ час составлял величину $\rho \sim 0,7 - 0,9$. С ростом τ коэффициент корреляции уменьшался. Коэффициент пространственной корреляции МНЧ моды 1F2 составлял величину $\rho \sim 0,8 - 0,97$. На рис. 3 приведены зависимости МНЧ моды 1F на взаимных трассах Диксон – Нижний Новгород и Ловозеро – Нижний Новгород (а), Салехард – Нижний Новгород и Ловозеро – Нижний Новгород (б), ст. Горьковская – Нижний Новгород и Ловозеро – Нижний Новгород (в), Соданкюля – Нижний Новгород и Ловозеро – Нижний Новгород (г).



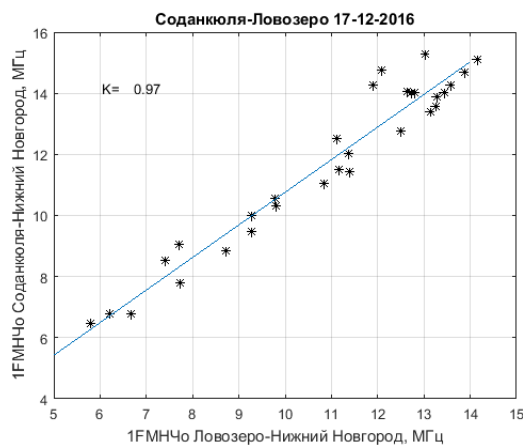
а



б



в



г

Рис.3

Высокие значения коэффициентов пространственной корреляции МНЧ позволили применить для прогнозирования МПЧ метод адаптации глобальной модели ионосферы к результатам НЗ на контрольной (Ловозеро – Нижний Новгород) и рабочих (Соданкюля – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород, Горьковская – Нижний Новгород) радиолиниях.

Метод адаптации глобальной модели ионосферы осуществлялся путем коррекции ее основного параметра — среднемесячного числа солнечных пятен W . Коррекция W приводит к изменению распределения электронной концентрации вдоль трассы, т.е. к изменению ее МПЧ, которая определяется путем моделирования ионограммы НЗ на основе скорректированных данных. Коррекция W позволяет подогнать рассчитанное значение МПЧ к экспериментальной МНЧ с некоторой погрешностью σ .

Далее считалось, что модель с выбранным значением W адекватно описывает распределение электронной концентрации в окрестности исследуемой трассы. Адаптированная таким образом модель используется как для прогнозирования поведения МПЧ для данной трассы на временной интервал прогноза, так и для экстраполяции МПЧ на соседние трассы, не оснащенные средствами диагностики. Подбор нового значения W производился в том случае, когда отклонение σ превышало заданное значение σ_{max} .

В качестве контрольной трассы использовалась трасса Ловозеро – Нижний Новгород. На рис.4 показан временной ход МНЧ моды 1F2 на этой трассе для 17.12.2016 г. Путем подбора числа солнечных пятен W проводилось моделирование ионограмм наклонного зондирования для наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной ионограмм. Модельная кривая МПЧ, рассчитанная для условий проведения эксперимента по модели ионосферы IRI-2012, приведена на рис.4. Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчетах изменялось число W . Значение W в каждом временном интервале указано в поле рисунка. Эффективность прогноза оценивалась по формуле [2]

$$\delta = \frac{\left[\sum_i (P_i - Q_i)^2 \right]^{1/2}}{\left(\sum_i Q_i^2 \right)^{1/2}} \cdot 100\% ,$$

где P_i - прогноз (МПЧ), Q_i – эксперимент (МНЧ).

Рассчитывалось также среднее отклонение

$$\Delta(M\Gamma\mathcal{U}) = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (МПЧ_i - МНЧ_i)^2 \right]^{1/2} .$$

Согласно оценкам $\delta = 4.7\%$. По долгосрочному прогнозу (ДП), когда по данным [3] для условий проведения эксперимента значение $W = 15$, ошибка прогноза составляет $\delta = 19.1\%$, т.е. существенно выше, чем для прогноза по адаптированной модели (АМ) ионосферы.

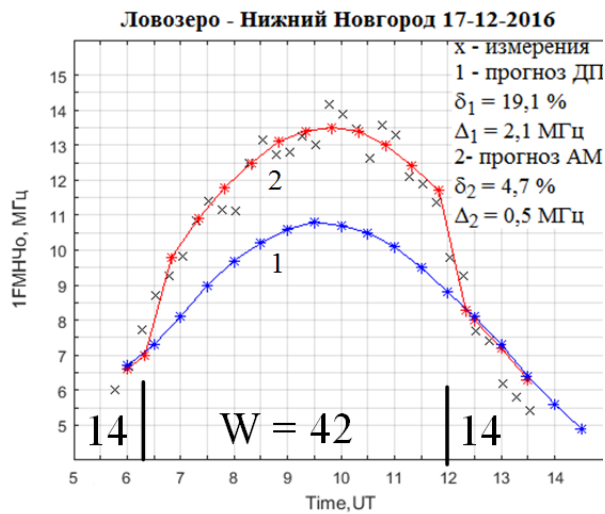


Рис.4

Среднее значение Δ для всего временного ряда составляет величину ~ 0.5 МГц. На рис. 5-8 приведены экспериментальные (МНЧ) и расчетные (МПЧ) для рабочих субавроральных трасс Соданкюля – Нижний Новгород, Салехард – Нижний Новгород, Диксон – Нижний Новгород и среднеширотной трассы Горьковская – Нижний Новгород. Для всех этих трасс в расчетах использовались значения W , полученные на контрольной трассе Ловозеро – Нижний Новгород. В поле всех рисунков приведены значения W , ошибки прогноза δ и отклонения Δ для ДП и АМ. Как видно из рисунков в утренние и вечерние часы в период перестройки ионосферы моменты времени изменения значения W для различных трасс могут отличаться на небольшую величину ~ 20 -30 минут.

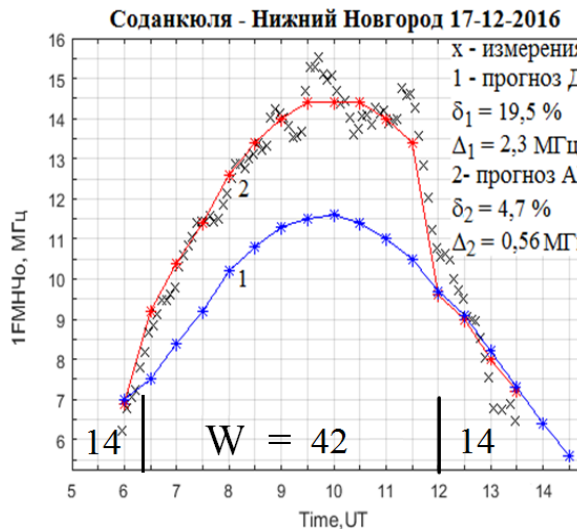


Рис.5

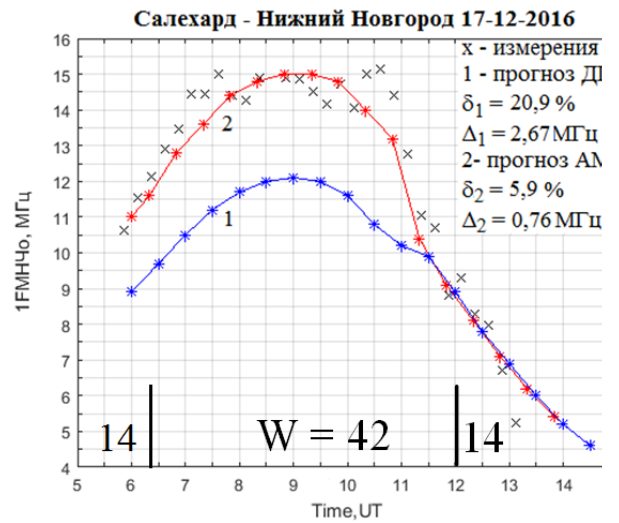


Рис.6

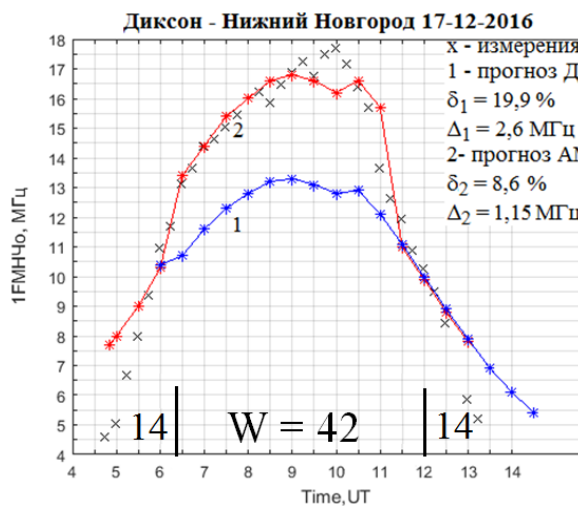


Рис.7

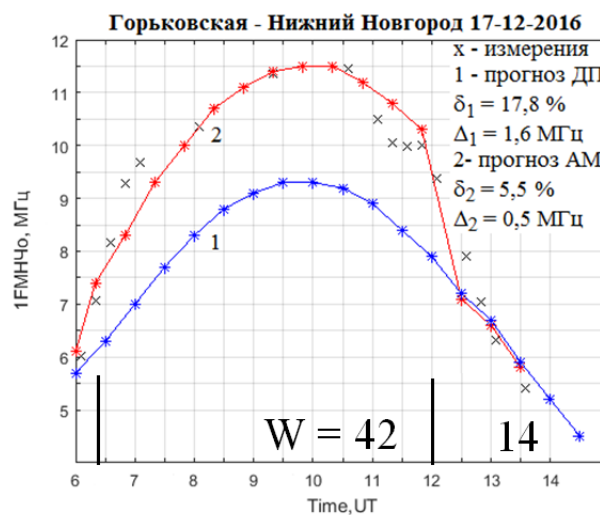


Рис.8

Выводы

Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования МПЧ на контрольной трассе и ошибки экстраполяции МПЧ на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния $\sim 180 \div 870$ км составляют $\sim 4.7 \div 8.6\%$, что существенно меньше, чем по данным долгосрочного прогнозирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

Список литературы:

- [1]. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions//Space Weather. 2017. V.15. no.2. pp.418-429.
- [2]. Четыркин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977, 200 с.
- [3]. <http://www.sec.noaa.gov>

SHORT-TERM FORECASTING OF SHORT WAVE RADIO COMMUNICATION

Valery Uryadov (Pavlovich), Fedor Vybornov (Ivanovich), Alexander Pershin (Vladimirovich)

The results of prediction and extrapolation of the maximum applicable frequency (MUF) on the subauroral and mid-latitude paths are presented by adapting the IRI-2012 reference ionosphere model to the results of the oblique chirp of the ionosphere on the control and working routes with a receiving point in Nizhny Novgorod.