

УДК 621.391.81

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ IRI-2012 ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МПЧ НА ВЧ-ТРАССАХ

М.М. Анишин, Л.П. Радио

Приводятся результаты оценки эффективности использования для прогноза максимальной применимой частоты (МПЧ) ВЧ канала Международной справочной модели ионосферы IRI-2012. Проверка осуществлялась сравнением рассчитанных суточных зависимостей МПЧ с аналогичными измеренными зависимостями максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ), полученными на среднеширотной трассе наклонного зондирования. Приводятся численные значения за 13 месяцев вариаций МНЧ ото дня ко дню. Показано, что коррекция модели по данным вертикального зондирования является эффективным способом повышения точности оперативного прогноза МПЧ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРНЫЙ ВЧ РАДИОКАНАЛ, МЕЖДУНАРОДНАЯ СПРАВОЧНАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ IRI-2012, МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМАЯ ЧАСТОТА

ВВЕДЕНИЕ

Современные телекоммуникационные концепции выдвигают все более высокие требования к устойчивости, надежности, оперативности и гибкости связи. Для ионосферных радиоканалов, характеризующихся исключительной изменчивостью, их зависимостью от гелио- и геофизических условий, от протяженности и ориентации трасс, эти требования трудновыполнимы. Среди мер, которые должны в первую очередь обеспечить дальнейший прогресс в ВЧ-связи, называют совершенствование методов прогнозирования ионосферных условий. Для прогнозирования состояния ионосферы широкое применение находят ионосферные модели. Среди них особое место занимает Международная справочная модель ионосферы IRI [1, 2]. Она рекомендована как стандарт для международного использования Комитетом по космическим исследованиям (COOSPAR) и Международным радиосоюзом (URSI). Одним из преимуществ модели является возможность ее коррекции по данным текущей диагностики, в частности по результатам вертикального зондирования (ВЗ). В качестве адаптационного (управляющего) параметра, максимально влияющего на распространение ДКМВ, берется критическая частота слоя ионосферы F2.

Интересна оценка эффективности применения последней версии модели — IRI-2012 для долгосрочного и оперативного прогнозирования наиболее значимой характеристики ВЧ-канала — максимальной применимой частоты (МПЧ). Для этого осуществлялось сравнение рассчитанных среднемесячных суточных зависимостей МПЧ с аналогичными экспериментальными зависимостями максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) на среднеширотной трассе наклонного ЛЧМ-зондирования (НЗ). Одновременно определялись вариации МНЧ ото дня ко дню. При оперативном прогнозировании модель IRI корректировалась по критической частоте f_{oF2} по данным текущего вертикального зондирования (ВЗ).

СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ БАЗЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В расчетах использовалась база данных, предоставленная National Institute of Geophysics and Vulcanology (Италия) по значениям МНЧ, полученным методом наклонного ЛЧМ-зондирования на среднеширотной трассе Инскип (53,5°N; 2,5°W) — Рим (41,8°N; 12,5°E) протяженностью 1710 км (азимут 133 град.). Мощность излучения составляла 100 Вт. Продолжительность измерений 13 месяцев, с декабря 2004 г. по декабрь 2005 г. включительно. В этот период число солнечных пятен W изменялось от 36 до 22. Зондирование велось круглосуточно с интервалом в 5 мин. Объем обработанных экспериментальных данных составил более 20 000 ионограмм НЗ.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Результаты измерений обрабатывались в следующей последовательности. Для каждого месяца на плоскость «время суток – МНЧ» наносились все измеренные с шагом полчаса значения МНЧ. Затем, для фиксированных моментов времени находились средние значения. Примеры такой обработки приведены на рис. 1.

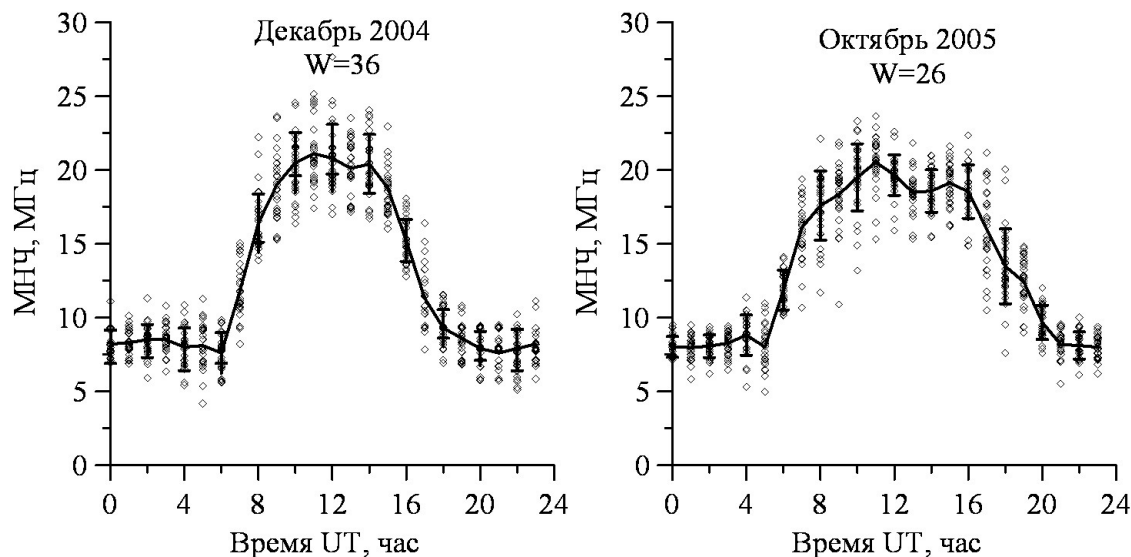


Рис. 1. Примеры среднемесячных суточных ходов МНЧ

Полученные таким образом точки соединялись кривой, которая рассматривалась как усредненный за месяц суточный ход МНЧ (сплошная кривая). Усреднение во всех случаях велось без исключения возмущенных условий распространения на трассе. Для оценки вариаций МНЧ ото дня ко дню рассчитывалось среднее квадратичное отклонение (СКО). На рисунках СКО нанесены вертикальными линиями.

ВАРИАЦИИ ОТО ДНЯ КО ДНЮ МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТОТЫ

Усредненные за месяц относительные среднее квадратичные отклонения для дневных, ночных и восходно-заходных часов, наблюдаемые в 2005 году, представлены отдельно в табл. 1, в последнем столбце – результаты усреднения за весь период измерений МНЧ.

Таблица 1. Среднее квадратичные отклонения МНЧ, % в 2005 г.

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	среднее
День	14,5	7,6	12,3	8,5	9,4	13,7	14,0	13,6	15,0	7,6	8,5	8,4	11
Ночь	14,7	14,9	13,7	13,8	19,6	15,0	18,4	14,0	16,0	9,8	9,2	14,4	15
Восходно-заходные часы	16,5	13,6	15,7	12,7	12,7	12,9	12,7	15,0	14,1	13,5	12,5	12,4	14

Вариации среднего квадратичного отклонения ото дня ко дню МНЧ не имеют ярко выраженного сезонного хода. Они минимальны в дневные часы (~ 11 %) и возрастают до 15 % в ночное время. Таким образом, можно считать, что вариации МНЧ ото дня ко дню в течение суток не превосходили 20 %. Такой вывод согласуется с результатами [3].

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ IRI ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МПЧ

Проверка эффективности применения IRI-2012 для долгосрочного прогнозирования проводилась в следующей последовательности. Рассчитывались суточные зависимости МПЧ с помощью пакета программ ТРАССА [4, 5], в котором ионосфера задается моделью IRI-2012. Далее прогнозируемые зависимости сопоставлялись со среднемесячными измеренными аналогичными зависимостями МНЧ. Примеры такой обработки для двух месяцев приведены на рис. 2. Здесь сплошными кривыми нанесены экспериментальные МНЧ, пунктирными — рассчитанные (прогнозируемые) МПЧ, вертикальные линии – вариации МНЧ ото дня ко дню.

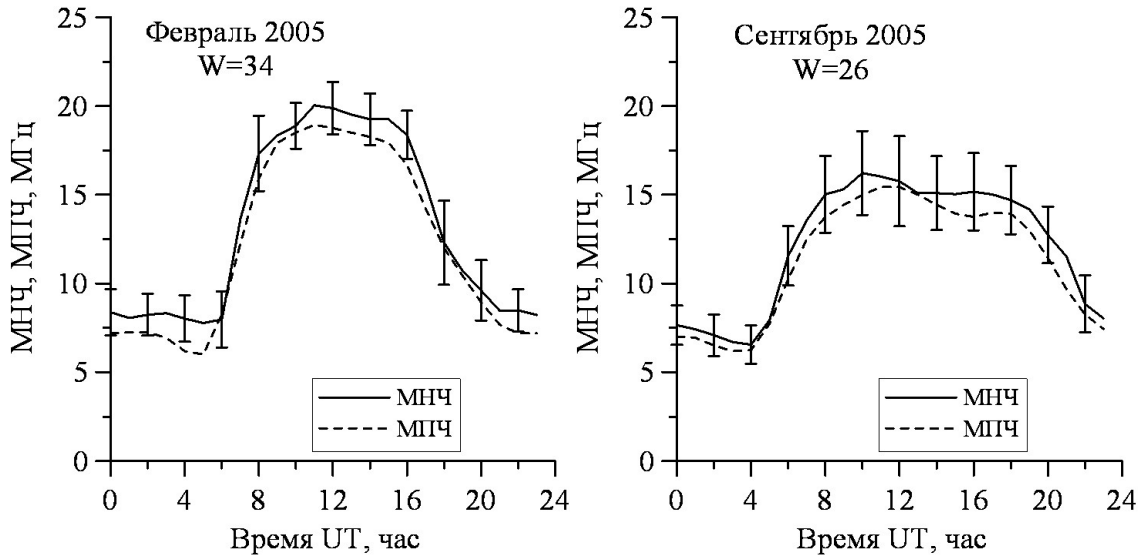


Рис. 2. Примеры сравнения суточных зависимостей МНЧ и МПЧ

Степень совпадения прогнозируемых МПЧ и измеренных значений МНЧ оценивалась следующими показателями:

Δ – усредненное абсолютное отклонение:

$$\Delta = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} |МНЧ_i - МПЧ_i|, \text{ МГц}; \quad (1)$$

$\sigma(\Delta)$ – среднеквадратичное отклонение (СКО), рассчитанное за сутки:

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (|МНЧ_i - МПЧ_i| - \Delta)^2}, \text{ МГц}; \quad (2)$$

ε – среднее относительное отклонение:

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{|МНЧ_i - МПЧ_i|}{МНЧ_i} \right) \times 100\%; \quad (3)$$

δ – усредненная относительная среднеквадратичная погрешность.

$$\delta = \left(\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \left(\frac{|МНЧ_i - МПЧ_i|}{МНЧ_i} \right)^2} \right) \times 100\%. \quad (4)$$

Во всех формулах i – номер часа.

Полученные результаты представлены в таблицах 2 и 3: в таблице 2 – среднесуточные статистические оценки; в таблице 3 – статистические оценки разделены на три периода суток – ночные, дневные и восходно-заходные часы.

Таблица 2. Среднесуточные статистические оценки

Стат. оценки	12/04	1/05	2/05	3/05	4/05	5/05	6/05	7/05	8/05	9/05	10/05	11/05	12/05	Среднее
Δ , МГц	1,2	0,5	1,0	0,7	0,8	0,7	1,1	1,2	1,1	0,8	1,3	1,1	1,6	1,0
$\sigma(\Delta)$, МГц	0,5	0,4	0,5	0,5	0,8	0,6	0,8	0,6	0,6	0,4	0,7	0,4	0,6	0,6
ε , %	12,0	4,4	9,0	6,7	6,0	4,7	8,4	9,1	8,7	7,0	10,3	10,4	14,9	8,6
δ , %	13,8	5,5	10,9	8,6	7,8	6,3	10,2	10,2	9,9	7,8	11,8	12,4	17,4	10,2

Таблица 3. Статистические оценки, усредненные по временным интервалам

Время суток	Стат. оценки	12/2004	1/2005	2/05	3/05	4/05	5/05	6/05	7/05	8/05	9/05	10/05	11/05	12/05	Среднее
Ночь	Δ , МГц	1,3	0,3	1,0	0,8	0,4	0,1	0,9	0,4	1,1	0,6	0,8	1,2	1,9	0,8
	$\sigma(\Delta)$, МГц	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1	0,5	0,1	0,1	0,2	0,5	0,2
	ε , %	16,3	4,5	12,5	9,7	3,9	1,2	8,1	4,4	11,0	7,5	10,3	14,7	22,0	9,7
	δ , %	18,4	5,8	14,2	11,0	5,5	2,5	9,5	5,2	12,6	8,4	11,6	16,6	25,3	11,3
День	Δ , МГц	1,3	0,9	0,9	0,3	0,4	1,6	2,3	2,2	1,8	0,6	1,5	1,0	1,5	1,2
	$\sigma(\Delta)$, МГц	0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,4	0,5	0,5	0,3	0,3
	ε , %	6,1	4,7	4,5	1,8	2,7	11,3	16,6	15,4	12,9	3,6	7,8	5,2	8,0	7,7
	δ , %	7,1	5,5	5,3	2,7	3,1	12,7	18,6	17,4	14,6	4,9	9,0	6,2	9,0	8,9
Восходно-заходные часы	Δ , МГц	1,1	0,4	1,1	0,9	1,0	0,5	0,6	0,8	0,7	1,0	1,4	1,0	1,6	1,0
	$\sigma(\Delta)$, МГц	0,5	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2	0,5	0,6	0,6	0,4	0,7	0,5	0,5	0,5
	ε , %	11,8	4,4	9,6	7,4	7,0	3,7	4,2	6,2	5,5	7,5	11,4	10,5	16,5	8,1
	δ , %	14,4	6,3	12,3	10,1	8,6	4,4	5,7	8,1	7,5	8,8	14,3	13,7	19,3	10,3

Из представленных результатов следует, что среднеквадратичная погрешность δ за весь период наблюдения составила 10,2 %, среднее относительное отклонение $\varepsilon = 8,6$ %, а среднее абсолютное отклонение $\Delta = 1,0$ МГц. Наименьшее отклонение прогнозируемых значений МПЧ от МНЧ наблюдалось в весенний период. Наибольшие отклонения отмечалось в осенние и зимние месяцы.

В дневные часы в летнее время отмечалось наихудшее совпадение прогноза и наблюдаемых МНЧ (в среднем $\varepsilon \approx 14$ %), в остальные сезоны в дневные часы МПЧ прогнозируются с погрешностью не более 8 %.

В ночные и сумеречные часы отклонения имели близкие значения в течение всего периода наблюдений. Наихудшее совпадение отмечалось в осенние месяцы и в декабре (среднем $\varepsilon \approx 14,5$ %). В остальные времена года в ночные и сумеречные часы МПЧ прогнозируются с погрешностью не более 10 %.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРРЕКЦИИ МОДЕЛИ IRI-2012 ПО ДАННЫМ ТЕКУЩЕЙ ДИАГНОСТИКИ

Одна из отличительных особенностей модели IRI-2012 заключается в возможности ее коррекции по данным текущей диагностики, в частности по значениям критической частоты слоя F2 — (foF2).

Оценка эффективности такой коррекции для последующего прогноза МПЧ была выполнена следующим образом.

С шагом один час рассчитывались суточные зависимости МПЧ по IRI-2012 с коррекцией по foF2. Для этого брались данные двух станций вертикального зондирования. Одна из них (Chilton) находилась вблизи соответственно пункта передачи. Вторая станция ВЗ (Dourbes) располагалась на удалении 260 км от середины трассы НЗ и была смещена на 90 км от плоскости большого круга, соединяющей пункты передачи и приема. Для компенсации смещения применялся метод кригинга [6]. Данные ВЗ брались из базы Digital Ionogramm DataBase (<http://ulcar.uml.edu/DIDBase/>) [7].

При расчете МПЧ коррекция модели ионосферы проводилась ежечасно. Затем рассчитанные суточные зависимости сравнивались с аналогичными зависимостями МНЧ. Далее по формулам (1–4) определялась ошибка оперативного прогноза МПЧ. Результаты сопоставления приведены в табл. 4.

Таблица 4. Среднесуточные статистические оценки с учетом коррекции модели IRI

Станция ВЗ	Стат. оценки	12/04	1/05	2/05	3/05	4/05	5/05	6/05	7/05	8/05	9/05	10/05	11/05	12/05	Среднее
IRI-2012 (без коррекции)	$\varepsilon, \%$	12,0	4,4	9,0	6,7	6,0	4,7	8,4	9,1	8,7	7,0	10,3	10,4	14,9	8,6
	$\delta, \%$	13,8	5,5	10,9	8,6	7,8	6,3	10,2	10,2	9,9	7,8	11,8	12,4	17,4	10,2
Chilton	$\varepsilon, \%$	5,8	4,1	8,2	6,0	5,2	4,8	7,7	7,6	7,0	4,8	11,4	9,9	11,4	7,2
	$\delta, \%$	8,5	5,2	10,1	7,4	7,6	6,3	9,3	8,8	8,4	5,8	14,0	11,5	13,3	8,9
Dourbes	$\varepsilon, \%$	3,8	3,2	4,8	5,0	5,3	5,6	8,0	7,3	6,3	4,3	9,9	6,1	6,8	5,9
	$\delta, \%$	5,1	4,0	6,0	6,2	7,2	7,1	9,9	8,8	8,2	5,4	11,4	7,0	7,9	7,3

Из таблицы следует:

1. При коррекции IRI-2012 по данным станции ВЗ, расположенной в пункте передачи, ошибка оперативного прогноза МПЧ уменьшалась в среднем на 1,4 %.

2. Более эффективной коррекция была по данным станции ВЗ, расположенной на незначительном удалении от центра трассы. Если до коррекции погрешность составляла 8,6 %, то после нее ошибка не превосходила 5,9 %. Можно предположить, что для дальнейшего снижения погрешности целесообразно использовать данные по высоте максимума слоя F2.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработана обширная база данных наклонного ионосферного зондирования на трассе протяженностью 1710 км — Инскип — Рим (более 20000 ионограмм НЗ). На этой основе определены вариации ото дня ко дню максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ). За весь период зондирования среднеквадратичные отклонения МНЧ составили в среднем около 13 %.

Сравнение измеренных МНЧ со значениями МПЧ, рассчитанными с применением модели IRI-2012, показало, что модель обеспечивала точность долгосрочного прогноза в среднем с погрешностью 8,6 %.

Возможность коррекции IRI-2012 по данным текущей диагностики позволяет использовать её для оперативного прогноза МПЧ. Проведена проверка точности прогноза при адаптации модели по критической частоте слоя F2. При коррекции по данным ВЗ в пункте передачи точность прогноза ε составила 7,2 %. При коррекции по данным станции ВЗ, расположенной вблизи середины трассы, погрешность снижалась до 5,9 %.

THE INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE IRI-2012 USING EXPERIENCE FOR MUF PREDICTION ON HF COMMUNICATION CHANNEL

M.M. Anishin, L.P. Radio.

Climatological models are widely used for prediction of ionospheric conditions. Among them is the International Reference Ionosphere model IRI. It is recommended as a standard for international use by the Committee on Space Research (COOSPAR) and the International Union of Radio Science (URSI). One-benefit model is the possibility of correction according to the current state of the ionosphere, in particular on the results of the vertical sounding (VS). As

adaptations of the parameter, the maximum effect on the propagation HF, takes a critical frequency of the ionosphere layer F2.

The message below reports the results of International Reference Ionosphere IRI-2012 using for prediction of maximum usable frequency (MUF), the most important characteristics of the HF channel.

The testing carried out by comparison of prediction median daily dependences of MUF with experimentally observed maximum observed frequency (MOF) on middle-latitude chirp-sounding channel.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilitza D., Reinisch B. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters// J. Adv. Space Res., 42, #4, 599-609, doi:10.1016/j.asr.2007.07.048, 2008.
2. Bilitza D. International Reference Ionosphere. //Radio Sci. 2001. V. 36, № 2. P. 261–275.
3. Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Родионов Т.С., Урядов В.П. Наклонное зондирование и прогнозирование максимально наблюдаемой частоты на трассах различной протяжённости и ориентации // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2007, № 3. С. 22–27.
4. Барабашов Б.Г., Анишин М.М. Прогнозирование характеристик декаметровых каналов связи // Труды НИИР. 2002. С. 99–103.
5. Barabashov V.G., Anishin M.M., Pelevin O.Y. (2009), High-frequency field strength prediction for ionospheric propagation at short- and medium- range radio paths// Radio Sci., 44, RS0A18, doi:10.1029/2008RS004038.
6. Samardjiev T., Bradley P.A., Cander L.R., Dick M.I. Ionospheric mapping by computer contouring techniques // Electronics Letters. 1993. V. 29, № 20. P. 1794–1795.
7. Reinisch, B.W., Galkin I.A., Khmyrov G., Kozlov A., Kitrosser D. F. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network// Adv. Radio Sci. (2004), 2: P. 241–247.