

УДК 550.385

**ОПЕРАТИВНЫЙ ПРОГНОЗ МАКСИМАЛЬНЫХ ПРИМЕНИМЫХ ЧАСТОТ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ**

**В.А. Иванова, Н.М. Полех, В.И. Куркин, А.В. Ойнац, С.Н. Пономарчук**

**ON-LINE FORECAST OF MAXIMUM USABLE FREQUENCIES  
USING DATA FROM OBLIQUE-INCIDENCE SOUNDING OF THE IONOSPHERE**

**V.A. Ivanova, N.M. Polekh, V.I. Kurkin, A.V. Oinats, S.N. Ponomarchuk**

На базе большого экспериментального материала исследуется точность методики оперативного прогноза максимальных применимых частот (МПЧ) с использованием данных линейно-частотно-модулирующего ионозонда. Исследуемая методика оперативного прогноза основана на применении интерполяционной формулы Ньютона.

Based on large amount of experimental data, we investigate accuracy of on-line forecast of maximum usable frequencies using data from the FMCW ionosonde. The studied method of on-line forecast is based on the Newton interpolation formula.

**Введение**

В предыдущих работах [1, 2] исследовались различные варианты оперативного прогноза с использованием интерполяционной формулы Ньютона. Было оценено количественно, что наибольшей точностью обладает линейное приближение оперативного прогноза с использованием значений долгосрочного прогноза МПЧ независимо от интервала заблаговременности и уровня возмущенности ионосферы. Оценки проводились на основе данных наклонного зондирования ионосферы, полученных с интервалом 15 мин.

В последние годы в ИСЗФ СО РАН проводятся циклы непрерывных измерений с интервалами 2–5 мин. Этот экспериментальный материал позволяет провести более детальный анализ точности методики оперативного прогноза.

**Описание методики оперативного прогноза**

Обозначим массив значений МПЧ на конкретной трассе в моменты времени  $t_i$  как  $f_i$ . При экстраполяции во времени вперед за основу берется формула Ньютона для интерполирующего многочлена  $P(t)$  для равностоящих значений независимого переменного [3]:

$$P(t) = f(t_0) + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta^k f(t_0)}{k!h^k} (t-t_0)(t-(t_0+h)) \dots (t-(t_0+(k-1)h)). \quad (1)$$

Здесь  $h$  – шаг по переменной  $t$ ,  $\Delta^k f(t_0)$  – последовательные разности функции  $f(t)$ , вычисляемые по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta f(t) &= f(t) - f(t-h), \\ \Delta^2 f(t) &= \Delta f(t) - \Delta f(t-h) = \\ &= f(t) - 2f(t-h) + f(t-2h), \\ \Delta^3 f(t) &= \Delta^2 f(t) - \Delta^2 f(t-h) = \\ &= f(t) - 3f(t-h) + 3f(t-2h) - f(t-3h), \\ \Delta^n f(t) &= \Delta^{n-1} f(t) - \Delta^{n-1} f(t-h). \end{aligned} \quad (2)$$

Оперативный прогноз путем экстраполяции экспериментальных значений за предшествующие мо-

менты времени в соответствии с формулой (1) можно осуществить ограничиваясь различными степенями представления  $P(t)$ .

При нулевой степени (так называемый наивный прогноз):

$$f_i = f_{i-1}; \quad (3)$$

в линейном приближении:

$$f_i = f_{i-1} + (f_{i-1} - f_{i-2}); \quad (4)$$

в квадратичном приближении:

$$f_i = f_{i-1} + (f_{i-1} - f_{i-2}) + (f_{i-1} - 2f_{i-2} + f_{i-3}) \quad (5)$$

и т. д.

С учетом того, что долгосрочный прогноз качественно верно описывает временную зависимость максимальных применимых частот, формулы (4–5) модифицируются следующим образом:

в линейном приближении:

$$f_{i+1} = f_i + (f_{i+1}^m - f_i^m), \quad (6)$$

в квадратичном приближении:

$$f_{i+1} = f_i + (f_{i+1}^m - f_i^m) + [(f_{i+1}^m - f_i^m) - (f_i^m - f_{i-1}^m)]. \quad (7)$$

В формулах (6–7)  $f_i^m$  – значения МПЧ, рассчитанные по модели.

Формулы (3–7) использовались в качестве исходных соотношений при экстраполяции по времени максимальных наблюдаемых частот. Причем коэффициенты при степенях интерполирующего полинома берутся с использованием конечных разностей, вычисленных для текущего интервала экстраполяции по модели и по экспериментальным данным за предыдущий временной интервал.

Для учета разницы между абсолютными значениями модели долгосрочного прогноза и экспериментальными значениями было выдвинуто предположение ввести дополнительный коэффициент  $\frac{f_i}{f_i^m}$

перед конечными разностями приращения по модели. Для этого варианта оперативного прогноза формулы (6–7) модифицируются следующим образом:

$$f_{i+1} = f_i + \frac{f_i}{f_i^m} (f_{i+1}^m - f_i^m), \quad (8)$$

$$f_{i+1} = f_i + \frac{f_i}{f_i^m} (f_{i+1}^m - f_i^m) + \frac{f_i}{f_i^m} [(f_{i+1}^m - f_i^m) - (f_i^m - f_{i-1}^m)]. \quad (9)$$

### Полученные результаты

С целью выбора наиболее оптимального варианта оперативного прогноза (ОП) были проведены расчеты по всем типам прогноза для 164 суток в различные сезоны с интервалами заблаговременности 5, 10, 15, 30 и 45 мин. Использовались экспериментальные данные максимальных наблюдаемых частот, полученные на трассе Магадан–Иркутск во время непрерывных измерений с интервалами зондирования 2–5 мин в сентябре 2006–2008, марте 2006–2007 и январе–феврале 2009 гг. Долгосрочное прогнозирование проводилось по модели IRI и программному комплексу на основе метода нормальных волн [4, 5].

Рассчитывались среднеквадратичные отклонения (СКО) долгосрочного и различных вариантов оперативного прогнозов, а также отклонения в процентах оперативного и долгосрочного прогноза от экспериментальных данных.

На рис. 1 представлена гистограмма распределения среднесуточных значений СКО (в процентах) для линейного приближения ОП с экстраполяцией по модели с заблаговременностью 30 мин. На оси ординат показано количество дней, когда были получены данные значения СКО. В 84 % от всех исследованных дней среднесуточные СКО изменялись в пределах 3–8 %.

Наибольшие ошибки долгосрочного прогноза в рассмотренные периоды времени зарегистрированы в январе–феврале 2009 г. В этот период СКО долгосрочного прогноза превышало 20 %, тогда как в другие исследуемые месяцы оно было менее 12 %. В связи с этим увеличилось и ошибки оперативного прогноза.

Для нужд практической радиосвязи целесообразно рассматривать суточные изменения отклонений ОП.

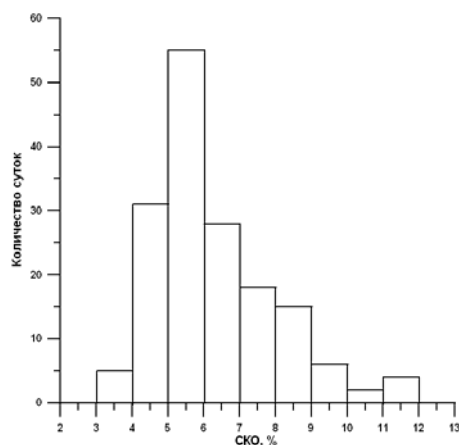


Рис. 1. Гистограмма распределения среднесуточных значений СКО (в процентах) для линейного приближения оперативного прогноза с экстраполяцией по модели с заблаговременностью 30 мин.

На рис. 2, а показаны отклонения (в процентах) оперативного прогноза, рассчитанного по формуле (6), с заблаговременностью 30 мин (сплошная линия), а также отклонения долгосрочного прогноза (штриховая линия) от экспериментальных данных для 13 марта 2007 г. СКО долгосрочного прогноза составило 13.3 %, линейного приближения оперативного прогноза с экстраполяцией по модели – 5.3 %. Достаточно большие – свыше 10 процентов – ошибки линейного приближения оперативного прогноза с экстраполяцией по модели наблюдались в переходные и ночные часы.

На рис. 2, б показаны отклонения (в процентах) долгосрочного прогноза и линейного приближения оперативного прогноза с экстраполяцией по модели с заблаговременностью 30 минут от экспериментальных данных для 24 января 2009 г. СКО долгосрочного прогноза для этого дня – 21.9 %, линейного прогноза с экстраполяцией по модели – 8.3 %. Как видно из рисунка, в 8 UT отклонение долгосрочного прогноза от МНЧ превысило 50 %, ошибки линейного приближения ОП с экстраполяцией по модели в отдельные моменты времени достигали 30 %. Такие большие ошибки ОП связаны с тем, что изменения МПЧ, рассчитанные по долгосрочному прогнозу, и зарегистрированные МНЧ изменяются с разными знаками.

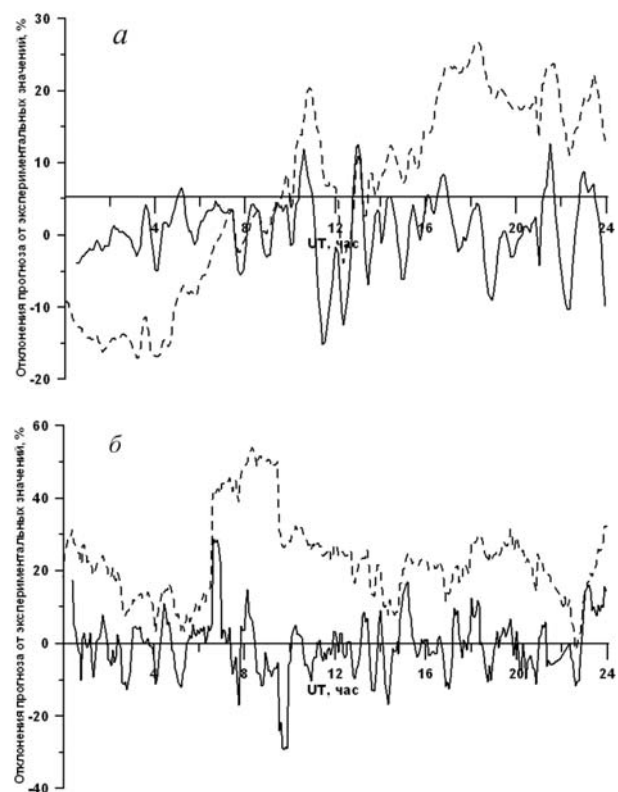


Рис. 2. Отклонения (в процентах) долгосрочного прогноза (штриховая линия) и линейного приближения оперативного прогноза с экстраполяцией по модели с заблаговременностью 30 мин (сплошная линия) для 13.03.2007 (а) и 24.01.2009 (б).

Введение дополнительного коэффициента в формулах (8–9) не дает желаемого увеличения точности прогноза. Расчеты, проведенные по формуле (8), показывают, что данный тип прогноза лишь в некоторые дни оказывается незначительно точнее линейного прогноза с экстраполяцией по модели, проводимого по формуле (6).

#### **Выводы**

Как было показано в предыдущих работах, наибольшей точностью в целом обладает линейное приближение оперативного прогноза с использованием значений долгосрочного прогноза МПЧ. Однако в отдельные часы некоторых суток даже этот тип оперативного прогноза не дает желаемой точности. Необходима разработка дополнительных схем для увеличения точности оперативного прогноза в переходные и ночные часы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант N 08-05-00658-а).

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Куркин В.И., Полех Н.М., Чистякова Л.В. Оперативный прогноз МПЧ при наклонном зондировании ионосферы // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. Издательство СО РАН. 1997. Вып. 105. С. 168–174.
2. Мошкова В.А., Полех Н.М. Исследование точностных характеристик оперативного прогноза максимальных применимых частот по данным ЛЧМ-зондирования // Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды III сессии молодых ученых «Физика больших природных систем». Иркутск, 2000. С. 94–98.
3. Гельфонд А.О. Исчисление конечных разностей. М.: Наука, 1967. 432 с.
4. Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме КВ радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.
5. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. Radio Science. 2001. V. 36, N. 2. P. 261–275.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*