

## СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ В КРАТКОСРОЧНОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ МПЧ – ИНДИКАТОРЕ СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Н.В. Рябова

### MODERN APPROACHES IN SHORT-TERM FORECASTING MAXIMALLY APPLICABLE FREQUENCY – AN INDICATOR OF THE CONDITION OF THE SPACE WEATHER

N.V. Ryabova

Максимально применимые частоты (МПЧ) ионосферных радиотрасс являются важными характеристиками состояния ионосферы для различных групп пользователей, так как МПЧ может служить, с одной стороны, индикатором космической погоды в исследуемом регионе, что вызывает интерес радио- и геофизиков, с другой стороны, значения МПЧ также важны с практической точки зрения для организации эффективной работы декаметровых радиотехнических систем дальней радиосвязи и загоризонтной радиолокации.

#### Методы прогнозирования МПЧ

МПЧ зависит от состояния среды распространения (ионосферы) и механизмов распространения радиоволн от излучателя до точки приема. Изменчивость среды и механизмов распространения определяет необходимость прогнозирования МПЧ. В практике прогнозирования различают два основных вида прогнозов: долгосрочный (ДП) и краткосрочный (КП). Долгосрочный прогноз используется для предсказания долгопериодических, регулярных процессов, при планировании работы действующих радиотехнических систем (РТС) и разработке новых РТС. Как следствие, он не учитывает короткопериодические процессы, связанные с нерегулярными и случайными явлениями, и имеет соответственно невысокую точность 50–60 %. Такая точность не удовлетворяет требованиям оперативной работы РТС. Поэтому для этих целей используется другой метод. Краткосрочный прогноз рассчитан на периоды: сутки, часы. При этом учитываются нерегулярные вариации ионосферы с такими же характерными масштабами времени. Для краткосрочных и оперативных прогнозов кроме моделей ионосферы и распространения радиоволн используются данные текущего зондирования ионосферы, при этом, как показали результаты экспериментов, наклонное зондирование действующей радиолинии более эффективно, чем вертикальное. В настоящее время актуальной является задача реализации краткосрочного прогноза в автоматическом режиме.

Известны различные прогностические модели ионосферы: теоретические, эмпирические и полуэмпирические (см., например, [1–7]). Теоретические модели [8, 9] требуют больших вычислительных затрат (как по ресурсам, так и по времени расчета), поэтому 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 (см., например, [6, 7]). Поэтому в последнее время в прогнозировании большое распространение получили эмпирические модели ионосферы. Наибольшую известность имеет совершенствуемая международная модель IRI. В нашей стране модели ионосферы разрабатывались в ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ИПГ. При этом в каче-

стве стандарта некоторое время использовалась модель СМИ. Среди моделей распространения радиоволн от точки передачи к точке приема наибольшее применение нашли лучевой подход и метод нормальных волн [10].

Наряду со сложными моделями прогнозирования PROFET, IONCAP, учитывающими множество факторов, модели MINIMUF, MINIFTZ являются более простыми и требуют меньше вычислительных ресурсов, поэтому они рассчитаны для процессоров, встраиваемых в аппаратуру связи. Упрощенные модели имеют ограничения на протяженность радиолиний ( $400 < D < 10000$  км). Кроме того, считается (не бесспорно), что они обеспечивают меньшие точности прогнозов. Однако компактность этих моделей позволяет использовать их в системах автоматического прогнозирования.

Существуют методики прогнозирования, основанные на использовании адиабатических соотношений характеристик распространения радиоволн при изменениях параметров ионосферы [11].

Реализация краткосрочного прогноза требует использования текущих данных наклонного зондирования ионосферных линий связи. Использование для этих целей маломощных ЛЧМ-ионозондов позволяет применять одни и те же антенны, что и в действующей радиотехнической системе. Это исключает необходимость пересчета энергетических характеристик зондирующей радиолинии на связанные радиолинии.

В последнее время в краткосрочном прогнозировании перспективным считается направление, связанное с коррекцией статистических моделей ионосферы по данным наклонного зондирования ионосферы. Однако данный подход требует научного обоснования и исследования его эффективности.

#### Разделение суточных вариаций МПЧ (и МНЧ) ионосферных радиолиний на регулярную и остаточную компоненты

В экспериментах по наклонному зондированию, как правило, измеряется максимально наблюдаемая частота (МНЧ) радиолинии. Суточные ходы (СХ) МНЧ, получаемые при наклонном зондировании радиолинии, имеют вид временных рядов. Их спектральный анализ (рис. 1) показывает, что суточный

ход МПЧ в своей основе является полигармоническим процессом с фундаментальной частотой, обратной периоду суток:

$$u_r(t) = U_0 + \sum_{n=1}^N U_{nr} \cos(2\pi n f_1 t - \theta_n),$$

где  $U_0$  – амплитуда постоянной составляющей;  $U_{nr}$  – амплитуды соответствующих гармоник;  $\theta_n$  ( $n=1, N$ ) – начальные фазы гармоник. Можно считать, что этот достаточно регулярный процесс зашумлен случайными возмущениями и ошибками измерений [12]. Поэтому можно высказать гипотезу о том, что СХ МПЧ содержат как регулярную  $u_r(t)$ , так и остаточную  $\tilde{u}(t)$  компоненты:

$$u(t) = u_r(t) + \tilde{u}(t).$$

В этом случае задача краткосрочного прогноза становится аналогичной задаче автоматического управления, когда управляющий сигнал зашумлен погрешностями. При этом, как известно [34], оптимальное прогнозирование (в нашем случае связанное с управлением (коррекцией) моделью) должно проводиться относительно регулярной компоненты. При этом остаточная компонента будет определять ошибку прогнозов.

Суточные ходы МНЧ на компоненты можно разделять, используя цифровую фильтрацию скользящими окнами. Экспериментально получено, что частота среза фильтра должна быть  $(8-10)F_\phi$ . На рис. 2 показан пример разделения суточного хода МНЧ (рис. 2, а) на регулярную (рис. 2, б) и остаточную (рис. 2, в) компоненты [12, 22].

**Исследование остаточной компоненты суточных вариаций МНЧ и их связь с космической погодой**

Результаты исследования остаточной компоненты СХ МНЧ представлены в работах [12–24]. В них для выделения остаточной компоненты использовался метод скользящего временного окна с перекрытием 50 % ( $\delta T_w$ ) и апертурой, равной 3 часам ( $T_w$ ). Исследовалась зависимость вариаций остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от времени суток. В качестве характеристик использовались математическое ожидание ( $\mu$ ) и стандартное отклонение ( $\sigma$ ). Характерные для различных радиолиний результаты для суточного стандартного отклонения остаточной компоненты суточных ходов

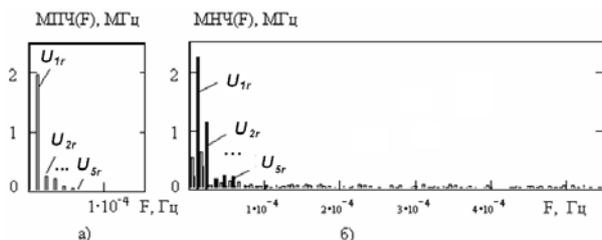


Рис. 1. Результаты спектрального анализа суточных вариаций МПЧ (а) и МНЧ (б).

МНЧ ( $\sigma\{\tilde{u}(t)\}$ ), полученные на радиолинии Кипр – Йошкар-Ола (2600 км), представлены на рис. 3.

Их анализ позволяет сделать следующие обобщающие заключения:

- 1) весной, осенью и зимой суточные вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ выше днем, чем ночью;
- 2) летом разница между вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ в течение суток менее выражена;
- 3) вариация остаточной компоненты суточных ходов МНЧ достигает максимума в периоды около полудня, восхода и захода Солнца. Минимум вариации имеет место в моменты времени 22:00–04:00 LT, т.е. сразу после захода и до восхода Солнца.

Моделирование суточных ходов МНЧ [22] для разных радиолиний за период 1994–2005 гг. показало линейные зависимости ( $\overline{\sigma\{\tilde{u}(t)\}}$ ) от среднего числа солнечных пятен ( $\overline{R12}$ ), среднего значения солнечной радиации ( $\overline{F_{10.7}}$ ). Для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола такие зависимости показаны на рис. 4. Аналитически их можно представить следующими формулами:

$$\sigma_\epsilon(\mu_R) = a_0 \mu_R + a_1, \quad (0 \leq \mu_R \leq 150);$$

$$\sigma_\epsilon(\mu_F) = b_0 \mu_F + b_1, \quad (50 \leq \mu_F \leq 200),$$

где  $\sigma = \overline{\sigma\{\tilde{u}(t)\}}$ ;  $\mu_R = \overline{R12}$ ;  $\mu_F = \overline{F_{10.7}}$ .

В работах [22, 25] исследовалась связь между вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и характеристиками перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Результаты исследований, проведенных для всех радиолиний в разное время суток, указывают на линейную возрастающую зависимость вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от амплитуды ПИВ. Кроме этого, вариация остаточной компоненты суточных ходов МНЧ из-за ПИВ днем (07:00–19:00 LT) выше, чем ночью (19:00–07:00 LT). Это объясняется более высокой дневной электронной концентрацией в ионосферном F-слое.

На рис. 5 показаны функциональные зависимости вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ с амплитудой ПИВ для радиолинии Кипр–Йошкар-Ола в летнее время. Результаты исследования показывают, что вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ, вызванные влиянием ПИВ, выше в полуденное время (10:00–14:00 LT) и ниже ночью. Такая зависимость от времени суток проявляется в большей степени в периоды высокой солнечной активности (1999–2003 г.). Математический анализ позволил установить связь между вариацией остаточной компоненты суточных ходов МНЧ ( $\sigma\{\tilde{u}(t)\}$ ) и амплитудой ПИВ ( $\delta N$ ) в форме полинома четвертой степени:

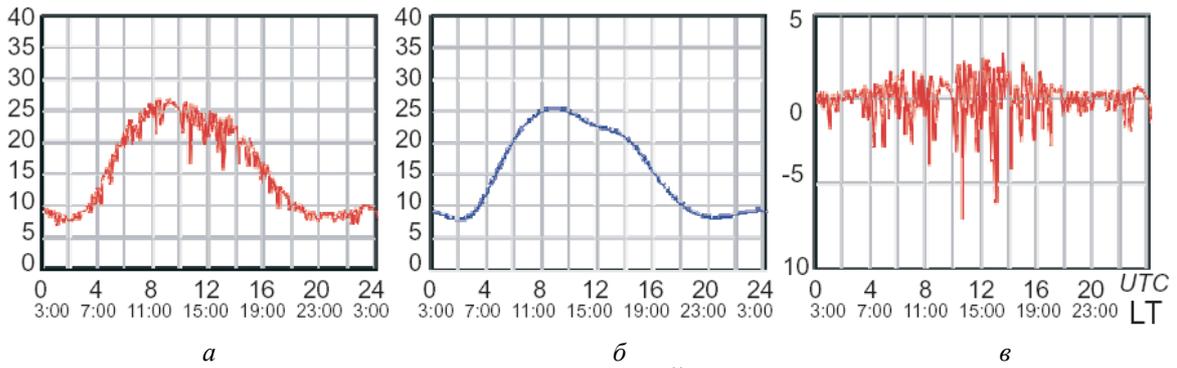


Рис. 2. Пример модели суточного хода МНЧ радиолнии Кипр–Йошкар-Ола и результаты разделения суточного хода МНЧ.

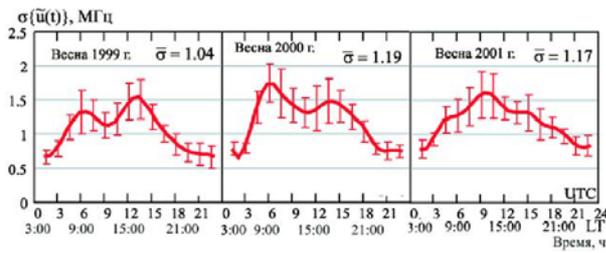


Рис. 3. Суточные вариации стандартного отклонения суточных ходов МНЧ радиолнии Кипр–Йошкар-Ола для весеннего времени.

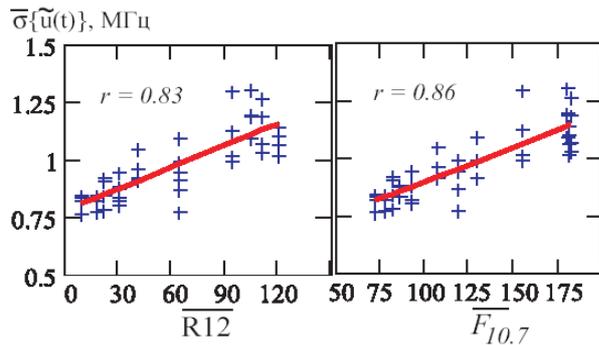


Рис. 4. Зависимость суточных вариаций остаточной компоненты МНЧ радиолнии Иркутск–Йошкар-Ола от уровня солнечной активности за период с 1994 по 2005 гг.

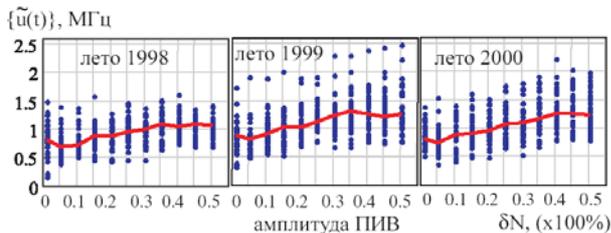


Рис. 5. Связь между амплитудами ПИВ и летними вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолнии Кипр–Йошкар-Ола.

$$\sigma\{\tilde{u}(t)\} = F(\delta N) = \sum_{n=0}^4 a_n (\delta N)^n,$$

где  $10^{-1} \leq \delta N \leq 5 \cdot 10^{-1}$ .

Обнаружена корреляция мощности остаточной компоненты суточных ходов МНЧ разных модов распространения радиоволн в ионосфере с уровнем геомагнитной активности, что иллюстрирует рис. 6.

Видно, что в области частот 5–28  $F_\phi$  с ростом возмущенности увеличивается мощность остаточ-

ной компоненты. Результаты анализа показали, что для спокойных дней полоса частот остаточной компоненты, имеющей связь с уровнем геомагнитной активности, превышает  $40F_\phi$ , а для возмущенных дней меньше  $40F_\phi$ . В частотных областях 10–16  $F_\phi$  и 22–28  $F_\phi$  были выделены периодические составляющие остаточной компоненты суточных ходов МНЧ с амплитудами  $\sim 0.2$ –1 МГц, которые, согласно полученным результатам теоретических исследований, обусловлены ПИВ с периодами  $\sim 1$ –3 часа.

В работах [15, 18, 22] были выделены «восточно-заходные» эффекты в текущих спектрах остаточной компоненты суточных ходов МНЧ, выражающиеся в значительных изменениях спектральных амплитуд и расширении полосы в область высоких частот в периоды восхода (04:00–08:00 LT) и захода (16:00–20:00 LT) Солнца по местному времени. Эти эффекты иллюстрирует рис. 7, где представлены спектры остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиотрассы Инскип–Йошкар-Ола в периоды разной геомагнитной активности.

Видно, что с увеличением геомагнитной возмущенности амплитуда синусоидальных составляющих растет, а занимаемый ими диапазон расширяется в область высоких частот. Это означает, что в области терминатора возбуждаются ПИВ, амплитуда и частотный диапазон которых увеличиваются с ростом геомагнитной активности. В работе [22] разработана методика и приведены измерения амплитуды и периодов ПИВ для восходного и заходного времени.

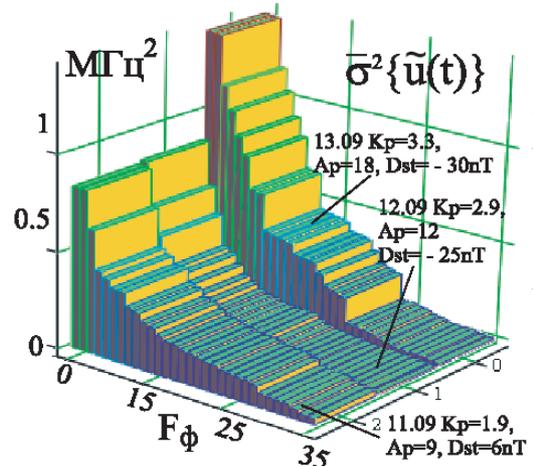


Рис. 6. Мощность остаточной компоненты суточных ходов МНЧ мода 1F трассы Инскип–Йошкар-Ола.

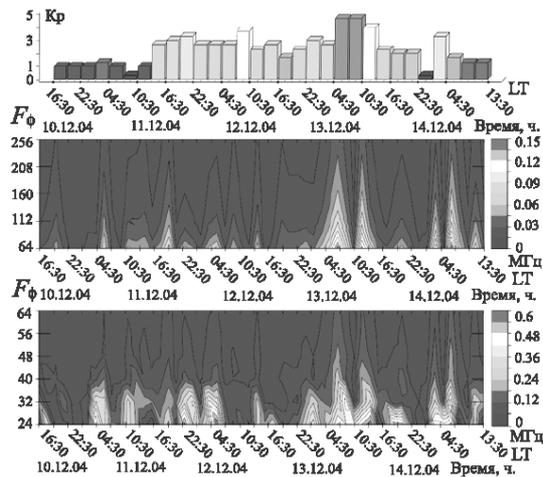


Рис. 7. Спектры остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолнии Инскип–Йошкар-Ола, полученные в период с 10.09.2001 по 14.09.2001 г.

Итак, рассмотренные результаты свидетельствуют о том, что остаточная компонента суточных ходов МНЧ является чувствительным индикатором состояния космической погоды на уровнях верхней атмосферы Земли.

**Алгоритм автоматического краткосрочного прогнозирования МПЧ, оценка точности прогноза**

Алгоритм автоматического краткосрочного прогнозирования [12] изображен на рис. 8 и содержит следующие основные шаги. Сперва по поступившим с ЛЧМ-ионозонда и отфильтрованным уровням временного ряда для МНЧ радиолнии производится настройка модели (по заданной солнечной активности  $W(t)$ ) и по ней прогнозируется уровень для регулярной составляющей с заданным периодом упреждения  $T$ . Отклонение полученного значения от измеренного системой фактического уровня временного ряда МНЧ расценивается как ошибка прогнозирования. Далее оценивается ошибка прогнозирования регулярной составляющей ряда, которая учитывается в соответствии с разработанным алгоритмом при корректировке параметров модели. Далее по модели со скорректированными параметрами рассчитывается прогнозная оценка на следующий период упреждения и т. д. Таким образом, модель постоянно «впитывает» новую информацию и к концу периода обучения отражает наиболее существенные изменения МПЧ.

Результаты экспериментальных исследований точностных характеристик алгоритма представлены в работах [12, 25]. Расчет ошибок временных прогнозов, полученных для интервалов  $\Delta T=1-24$  ч, позволил построить экспериментальную модель для СКО:

$$СКО(\Delta T) = \begin{cases} 1.2\sqrt{\Delta T^2}, & \Delta T \in (1, 8), \\ 2.2, & \Delta T \in (8, 24). \end{cases}$$

Видно, что на интервале  $\Delta T=1-4$  ч СКО меняется почти линейно:  $СКО=0.254\Delta T+0.84$ . Относительные ошибки прогнозов с использованием разработанного алгоритма имеют близкие значения с результатами, полученными авторами [26, 27] по другим методикам.

**Прогнозирование МПЧ радиолний, не обеспеченных диагностической аппаратурой**

Значительный интерес для практики работы ионосферных радиолний представляет пространственный прогноз их параметров, сведения о котором могут быть использованы для улучшения работы региональных сетей. Краткосрочный пространственный прогноз МПЧ ионосферных радиолний возможен при достаточно высокой корреляции временных рядов для одноименных прогнозируемых функций в различных точках приема (пространственная корреляция), а время прогноза определяется автокорреляцией этих рядов в одной из точек приема. Следует отметить, что исследованию пространственно-временной корреляции МНЧ посвящен ряд работ, выполненных ААНИИ для высокоширотных радиолний [28] и за рубежом (например, [29]) для среднеширотных радиолний. Исследована возможность линейной интерполяции на другие радиолнии результатов прогнозов, полученных для опорных радиолний. Показано, что в направлении восток–запад интерполяция эффективна внутри 700-километровой зоны, а в направлении север–юг – в 400-километровой зоне, по широте это соответствует  $4^\circ$ , а по долготе  $6^\circ$ .

В нашем случае исследование временных корреляционных связей МНЧ было выполнено для российской (регион Сибири) и западноевропейской сетей радиолний [12, 30]. Западноевропейская сеть: Инскип–Йошкар-Ола, Сан-Торказ–Йошкар-Ола, Кипр–Йошкар-Ола; российская сеть: Хабаровск–Йошкар-Ола, Иркутск–Йошкар-Ола, Магадан–Йошкар-Ола. Протяженность радиолний исследуемой западноевропейской сети от 2500 км до 4200 км; протяженность российских радиолний выше – от 3500 км до 5700 км. Пространственное разнесение вершин скачков радиолний составляет для западноевропейской сети от 1000 км до 1500 км, а для российских дальних радиолний от 750 км до 2500 км. Следует отметить, что на величину пространственной корреляции параметров ионосферных радиолний существенное влияние оказывает уровень геомагнитной возмущенности, причем эффект носит пороговый характер. Для значений  $\Sigma K_p < 25-35$  пространственная корреляция МНЧ 0.88–0.93, а при  $\Sigma K_p > 35-40$  коэффициент пространственной корреляции МНЧ меньше 0.5, что, по-видимому, связано с разрушением регулярной структуры ионосферного канала.

Сопоставление результатов измерений для линий различной ориентации показывает, что коэффициен-

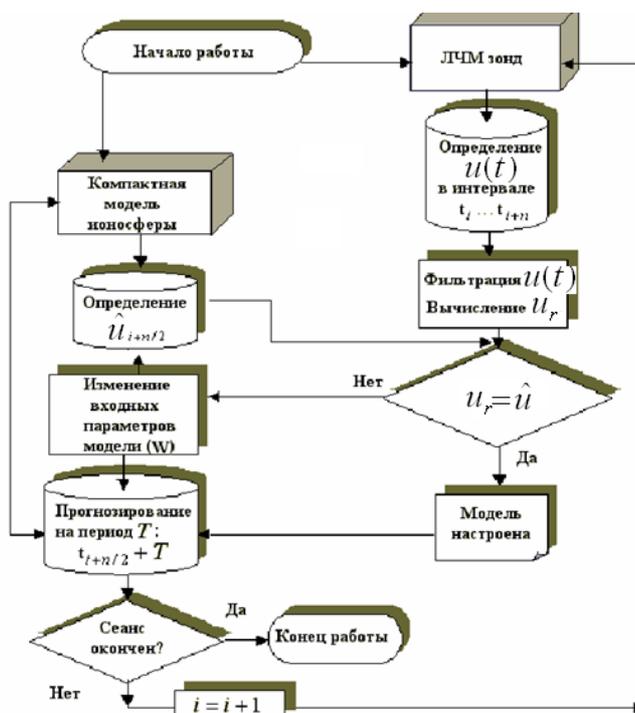


Рис. 8. Алгоритм адаптивного автоматического прогнозирования на основе данных ЛЧМ-ионозонда.

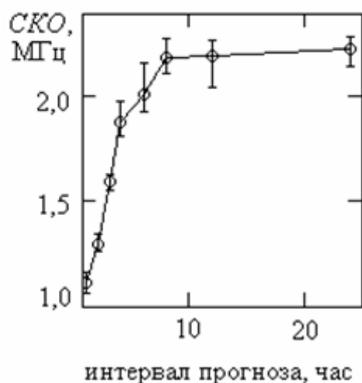


Рис. 9. Ошибки прогнозов МПЧ, полученных для периодов упреждения  $\Delta T=1, 2, 3, 4, 6, 8, 12$  и  $24$  ч.

ты пространственной корреляции параметров ионосферного радиоканала, измеренные для двухскачковых широтных радиолоний, превышают значения коэффициентов корреляции для меридиональных односкачковых радиолоний при одинаковом разнесении приемных пунктов [12, 31–33]. Заметим, что корреляционные поля показывают имеющееся время запаздывания между временными рядами МПЧ, которое составляет 1–2 ч. Высокие значения коэффициентов пространственной корреляции МПЧ, полученные в экспериментах на радиолониях сетей, позволяют применить для прогнозирования метод коррекции модели ионосферы.

Модель позволяет рассчитать пространственное распределение электронной концентрации в ионосфере вдоль радиолонии. Как было показано выше, основным внешним параметром модели является  $W$  – уровень солнечной активности (сглаженное среднемесячное число пятен). Вариации  $W$  приводят к изменениям распределения электронной концентрации  $N(h)$ , т.е. к изменениям МПЧ. Варьируя  $W$ , можно

добиться выполнения условия  $\sigma \leq \sigma_0$ . Далее считаем, что модель с выбранным  $W$  адекватно описывает распределение  $N(h)$  на радиолонии. Используя скорректированную модель, можно спрогнозировать поведение МПЧ на интервал прогноза для радиолонии, проходящей через близлежащий регион и не обеспеченной диагностикой [12, 30].

Результаты исследования погрешности пространственного прогноза МПЧ на западноевропейской и российской сетях изображены на рис. 10. Ошибки прогнозов составили в среднем 12–15 % для западноевропейской сети и 15–18 % для российской сети. По сравнению с ошибками долгосрочных прогнозов, ошибки прогнозов, выполненных по разработанной технологии с помощью скорректированной глобальной модели ионосферы, в 2–3 раза меньше.

### Заключение

Следующим шагом развития системы автоматического краткосрочного прогнозирования является оптимизация процесса прогноза по критерию минимизации ошибки, или минимизации остаточной компоненты. Укрупненная блок-схема алгоритма представлена на рис. 11.

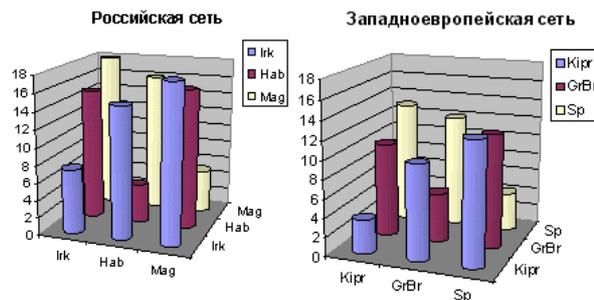


Рис. 10. Ошибки пространственного прогноза МПЧ с использованием данных ЛЧМ-ионозонда.

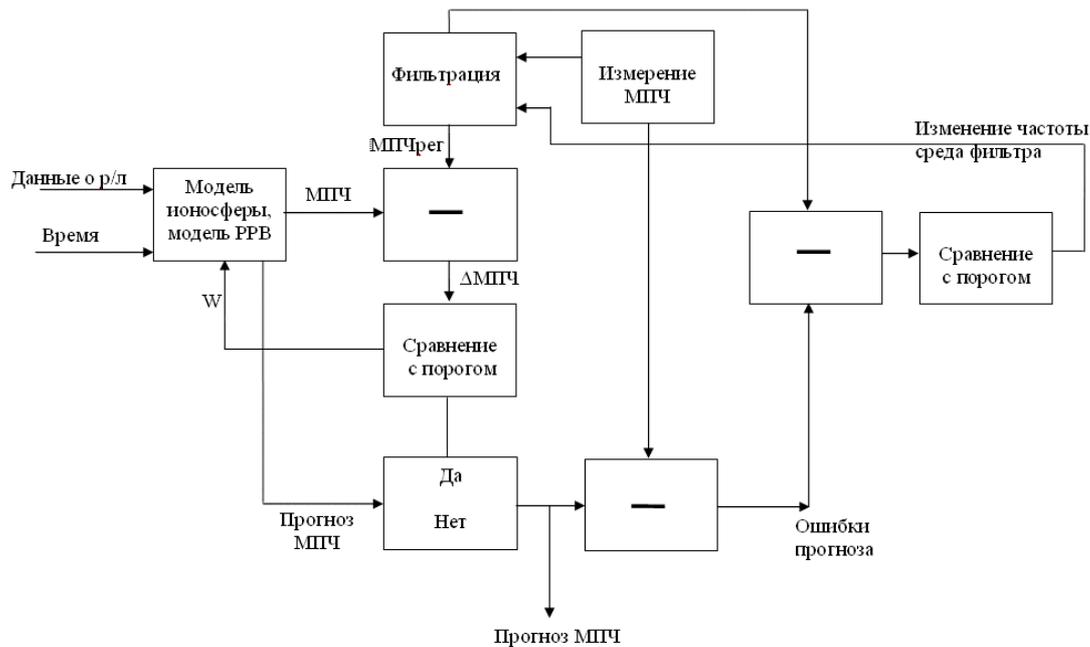


Рис. 11.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bilitza D., Rawer K. Electron density profile distribution in the international reference ionosphere // J. Atmosf. Terr. Phys. 1989. V. 51, N 9–10. P. 781–790.
2. Chin G.T. An improved phenomenological model of ionospheric density // Ibid. V. 37, N 12. P. 1588–1589.
3. Справочная модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере на высотах ниже 200 км / Под ред. Часовитина Ю.К. Обнинск, 1983. 133 с.
4. Глобальная эмпирическая модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования. 1988. N 44. С. 6–14.
5. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. 4.2. таблица параметров. ГОСТ 25645, 146–89 СССР.
6. Полуэмпирическая модель ионосферы / В.М. Поляков, В.Е. Суходольская, М.К. Ивельская и др. М.: МЦД, 1978. 111 с.
7. Двинских Н.М. Региональные эмпирические модели ионосферы. / Н.М.Двинских, Н.Я. Найденева // Препринт СибИЗМИР. 1–89, Иркутск, 1989. 23 с.
8. Намгаладзе А.А. Численные теоретические модели ионосферы и перспективы их использования в ионосферном прогнозировании / А.А. Намгаладзе // Прогнозирование ионосферных, магнитосферных возмущений и солнечной активности. М.: 1987. С. 160–176.
9. Брюлелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы М.: Наука, 1988. 528 с.
10. Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 122 с.
11. Куркин В.И., Полех Н.М., Чистякова Л.В. // Исследования по геомагнетизму, аэронавигации и физике Солнца. 1997. Вып. 105. С.68
12. Рябова Н.В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. 292 с.
13. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Фильтрация случайной компоненты суточных

вариаций максимально наблюдаемых частот дальних ионосферных радиолоний // «Радиолокация, навигация, связь»: Сб. статей X международной научно-технической конференции. Воронеж, 2004. Том 2. С. 1129–1139.

14. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Исследование регулярной и случайной составляющих суточного хода максимально наблюдаемых частот среднеширотных радиолоний протяженностью 2–6 Мм // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Взаимодействие полей и излучение с веществом»: Сб. докладов VII-й конференций молодых ученых. Иркутск. 2004. С. 132–134.
15. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М. и др. Влияние геомагнитной активности на остаточную компоненту суточных вариаций максимально наблюдаемых частот // Секция «Распространение радиоволн и дифракция»: Сб. докладов. 60-й научной сессии русской радиотехники, электроники и общества связи, посвященной дню Радио. Москва, 2005. Том. 2. С. 141–143.
16. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Связь между характеристиками остаточной компоненты суточного хода максимально наблюдаемых частот и уровнем геомагнитной активности // «Распространение радиоволн»: Сб. докладов XXI Всероссийской научной конференции. Йошкар-Ола. 2005. Том. 1. С. 231–235.
17. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Восходный и заходный эффекты в остаточной компоненте суточного хода максимально наблюдаемых частот // «Распространение радиоволн»: Сб. докладов XXI-й Всероссийской научной конференции. Йошкар-Ола. 2005. Том. 1. С. 226–230.
18. Ivanov V.A., Luong Viet Loc, Nasyrov A.M., Ryabova N.V. Investigating long-range ionospheric radiolines by analyzing maximum observed frequencies daily variances // Proceeding papers of the 18<sup>th</sup> IEEE international conference on applied electromagnetics and communications (ICECom 2005). Dubrovnik. 2005. P. 79–82.
19. Иванов В.А., Лыонг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Моделирование ионограмм для исследования влияния ионосферных стратификаций на суточные ходы МНЧ // «Распространение радиоволн»: Сб. докладов XI-й конференция северо-западного региона России. С. Петербург. 2005. С. 35–37.

20. Иванов В.А., Льюнг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Моделирование влияния ионосферных возмущений на дальнее распространение декаметровых радиоволн // Сб. статей XII-й международной научно-технической конференции. Воронеж. 2006.
21. Иванов В.А., Льюнг Вьет Лок, Насыров А.М., Рябова Н.В. Моделирование ионограмм для исследования перемещающихся ионосферных возмущений и их влияния на суточные ходы максимально наблюдаемых частот // «Радиолокационное исследование природных сред»: Сб. статей XXIV Всероссийского симпозиума. С. Петербург. 2006.
22. Рябова Н.В., Иванов В.А., Льюнг Вьет Лок, Насыров А.М. Моделирование ионограмм для исследования перемещающихся ионосферных возмущений и их влияние на суточные ходы максимально наблюдаемых частот // Георесурсы. 2004. Т. 2, N 16. С. 3–6.
23. Рябова Н.В., Егошин А.Б., Иванов Д.В., Иванов В.А. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровой радиосвязи. 2006. Йошкар-Ола: МарГТУ, 253 с.
24. Рябова Н.В., Иванов В.А. Автоматизация прогноза МПЧ КВ радиосвязи по данным ЛЧМ-зонда // Радиолокация, навигация, связь: Сб. ст. VII междунар. конф. Воронеж. 2001. Т. 2. С. 915–924.
25. Рябова Н.В., Иванов В.А. Автоматизация краткосрочного прогнозирования МПЧ КВ радиосвязи с использованием ЛЧМ-зонда и компактной модели ионосферы // В кн: LVI Научн сессия, посвящ Дню радио, РНТО РЭС им. А.С. Попова, М.: 2001. Т. 2. С. 270–272.
26. Агарышев А.И. Возможности краткосрочного прогноза характеристик декаметровых радиоволн с использованием данных наклонного зондирования ионосферы // 50 Научн. Сессия, посвящ. Дню Радио. М.: 1995. Т. 2. С. 38–39.
27. Агарышев А.И. Возможности совершенствования прогнозов МПЧ при учете влияния регулярной и случайной неоднородности ионосферы // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. Новосибирск: Наука. 1995. Вып. 103. С. 186–193.
28. Лукашкин В.М., Егорова А.В. Численный краткосрочный прогноз максимальных частот КВ диапазона на высокоширотных трассах // Прогнозирование ионосферы и условий распространения радиоволн. М.: Наука, 1985. С. 190–195.
29. Rush С.М. An ionosphere observation networks for use in short-term propagation predictions // Telecommunication journal. 43, 544–549. 1976.
30. Рябова Н.В., Иванов В.А. Временной и пространственный краткосрочный прогноз МПЧ // Труды XX Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн». 2–4 июля 2002. Н.Новгород. Н.Новгород: 2002. С. 115–116.
31. Рябова Н.В., Иванов В.А., Урядов В.П. Исследование пространственной корреляции МНЧ на среднеширотных трассах // XVII конференция по распространению радиоволн: Тез. докл. Ульяновск, 1993. С. 37.
32. Рябова Н.В., Иванов В.А., Урядов В.П. Экстраполяция на соседние КВ-радиолинии максимально наблюдаемых частот по данным сети станций НЗИ // 48-я научная сессия, посв. Дню радио: Тез. докл. М.: 1993. С. 93–94.
33. Рябова Н.В., Иванов В.А., Урядов В.П., и др. Прогнозирование и экстраполяция параметров КВ-радиоканала по данным наклонного зондирования ионосферы // Радиотехника. 1997. № 7. С. 28–30.
34. Основы автоматического управления. / Под ред. В.С. Пугачева. М.: Наука. 1974. 720 с.

Марийский государственный технический университет,  
Йошкар-Ола