

В.А. Иванов¹, Л.В. Лыонг², А.М. Насыров², Н.В. Рябова¹¹Марийский государственный технический университет, Йошкар-Ола
vai@marstu.mari.ru, nvr@marstu.mari.ru²Казанский государственный университет, Казань
luongvietloc@mail.ru, nasYROV.albert@ksu.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОГРАММ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СУТОЧНЫЕ ХОДЫ МАКСИМАЛЬНО НАБЛЮДАЕМЫХ ЧАСТОТ

В работе представлены результаты численного моделирования влияния перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на МНЧ. Приведены модельные ионограммы наклонного зондирования на протяженных радиопутьях. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными, полученными методом зондирования с использованием линейно-частотной модуляции (ЛЧМ) сигнала.

Введение

Одним из важных параметров, определяющих возможности коротковолновой радиосвязи через ионосферу, является максимально наблюдаемая частота (МНЧ). Известно, что особенность ионосферы приводит к изменениям в суточных ходах МНЧ декаметровых линий связи.

Изменчивость и неоднородность ионосферы обусловлена различными процессами, один из них связан с прохождением в ионосфере внутренних гравитационных волн, вызывающих эффект перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Последние приводят к вариациям МНЧ радиопутьей. ЛЧМ ионозонд позволяет исследовать влияние этих эффектов на характеристики радиопутьей.

Существует проблема интерпретации натуральных экспериментальных данных, связанная с необходимостью решения обратных задач наклонного зондирования ионосферы.

Цель работы

- Разработка методики моделирования ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы и суточных ходов МНЧ с учетом ПИВ.
- Исследование связи между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ.
- Интерпретация данных натуральных экспериментов по наклонному зондированию ионосферы с использованием результатов модельных экспериментов.

Задачи исследования

- Построение метода синтеза ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы с учетом ПИВ;
- Построение метода разделения суточных ходов МНЧ на регулярную и остаточную (случайную) компоненты;
- Выделение связи между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ с использованием метода синтеза ионограмм;
- Анализ связи между модельными и натурными ионограммами для оценки эффективности метода моделирования. Интерпретация данных натуральных экспериментов по наклонному зондированию ионосферы.

Методика моделирования ионограмм наклонного зондирования ионосферы и суточных ходов максимально наблюдаемых частот с учетом перемещающихся ионосферных возмущений

Для проведения вычислительного эксперимента были выбраны математические модели как для профиля электронной концентрации ионосферы, так и для распространения радиоволн. Модель профиля электронной концентрации, учитывающая как регулярную, так и нерегулярную составляющие, задавалась в виде (Афраймович, 1982; Фаткуллин, 1981):

$$N_e(h) = N_p(h) \cdot (1 + N_n(h)), \quad (1)$$

где $N_p(h)$ – регулярная составляющая профиля, $N_n(h) = \frac{\Delta N}{N} \exp\left(-\frac{(h-h_c)^2}{z_m^2}\right) \cdot \sin(2\pi h/l)$ – его нерегулярная составляющая, $\delta N = \Delta N/N$ – вариация электронной концентрации, h_c – высота стратификации перемещающихся ионосферных возмущений, z_m – диапазон стратификации, l – вертикальный масштаб перемещающихся ионосферных возмущений.

Параметры ионосферы получены из международной статистической модели IRI, позволяющей рассчитывать профиль электронной концентрации для любой точки на Земле при заданных: сезоне, времени суток, активности Солнца и геомагнитной активности.

Для расчета МНЧ радиопутьей решалось волновое уравнение в приближении геометрической оптики для сферически симметричной ионосферы. Использовались теоремы эквивалентности (Дэвис, 1973), когда за основу брались результаты расчетов характеристик вертикального зондирования, которые затем по полученным формулам, положенным в основу алгоритма расчета МНЧ, пересчитывались на наклонное распространение:

$$f_H = f_o \sqrt{1 + \left(\frac{2R_s \sin \frac{D}{2R_s}}{c\tau_o + 2R_s \left(1 - \cos \frac{D}{2R_s}\right)} \right)^2}, \quad (2)$$

$$\tau_n = \left\{ \tau_e + \frac{2R_s}{c} \left(1 - \cos \frac{D}{2R_s} \right) \right\} \sqrt{1 + \left\{ \frac{2R_s \sin \frac{D}{2R_s}}{c\tau_e + 2R_s \left(1 - \cos \frac{D}{2R_s} \right)} \right\}^2}, \quad (4)$$

где f_c – критическая частота вертикального распространения, τ_e – задержка вертикального распространения, D – протяженность трассы, f_n – МНЧ эквивалентного наклонного распространения, τ_n – задержка эквивалентного наклонного распространения, $\theta \approx D/2R_s$ и

$$\tau(f) = \frac{d\varphi}{d\omega} = \frac{2}{c} \int_0^{h_r} \frac{d}{d\omega} (\omega \cdot n(h, \omega)) dh = \frac{2}{c} \int_0^{h_r} \frac{dh}{n(h, f)}$$

В этой работе разработана дискретная модель наклонного распространения КВ радиоволн в ионосфере, основанная на теоремах эквивалентности (Дэвис, 1973).

Вычислительные эксперименты по исследованию вариаций МНЧ радиолоний были проведены для сети радиолоний, представленных в табл. 1. Расчеты охватывали разные сезоны одного периода активности Солнца (11 лет) с 1994 по 2005 годы. Исследовался главный (односкачковый) мод распространения декаметровых радиоволн в ионосфере (мод $1F$).

Результаты исследования

Предполагалось, что суточные ходы МНЧ заданы последовательностью, содержащей как регулярную, так и остаточную компоненты:

$$u(t) = u_r(t) + \tilde{u}(t), \quad (4)$$

где $u_r(t)$ – регулярная компонента суточных ходов МНЧ; $\tilde{u}(t)$ – остаточная компонента суточных ходов МНЧ.

Суточные ходы МНЧ разделялись методом фильтрации низких частот, с частотой среза $8 - 10 F_{\phi}$, на регулярную и остаточную компоненты (Иванов и др., 2004). Для исследования зависимости вариаций остаточной компоненты су-

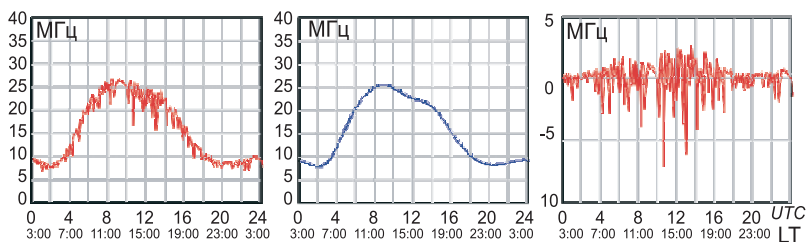


Рис. 1. Пример модели СХ МНЧ радиолонии Кипр – Йошкар-Ола и результаты разделения СХ МНЧ.

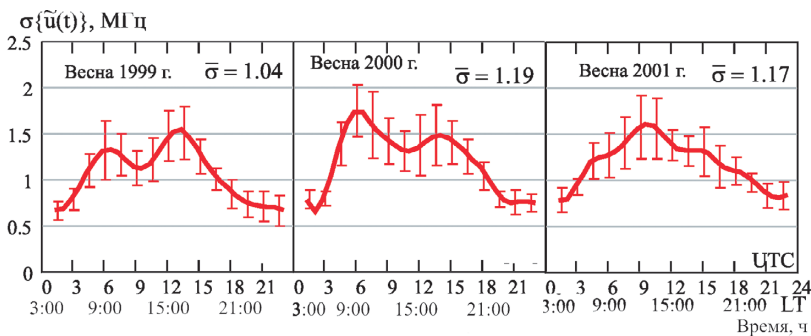


Рис. 2. Суточные вариации стандартного отклонения остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолонии Кипр – Йошкар-Ола для весеннего времени.

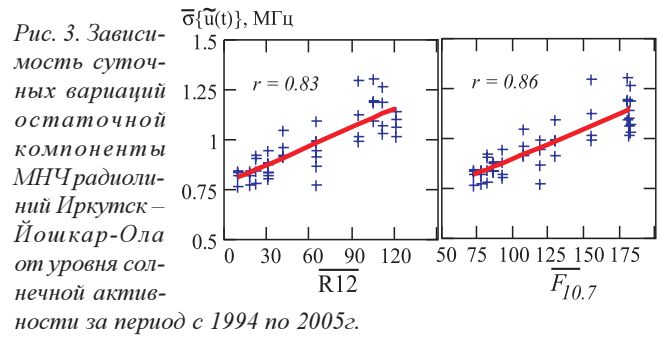


Рис. 3. Зависимость суточных вариаций остаточной компоненты МНЧ радиолоний Иркутск – Йошкар-Ола от уровня солнечной активности за период с 1994 по 2005г.

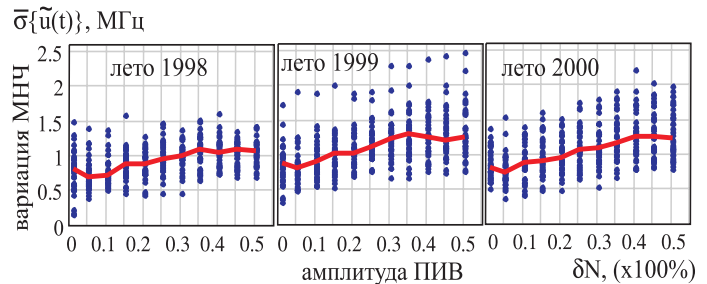


Рис. 4. Связь между амплитудой перемещающихся ионосферных возмущений и летними вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолонии Кипр – Йошкар-Ола.

точных ходов МНЧ от времени суток использовался метод скользящего временного окна с перекрытием 50% ($\delta T_w = 0.5$) и апертурой, равной 3 часам ($T_w = 3ч$). Исследовалась зависимость вариаций остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от времени суток. В качестве характеристик использовались математическое ожидание (μ) и стандартное отклонение (σ).

Пример модели СХ МНЧ радиолоний г. Кипр – г. Йошкар-Ола (2600км), полученный с использованием модели IRI и программы, разработанной по вышеприведенному методу, представлен на рис. 1. Показан результат разделения СХ МНЧ на регулярную и остаточную компоненты с помощью цифрового метода, реализующего фильтр низких частот (ФНЧ) с прямоугольным окном.

Результаты исследования характеристик стандартного отклонения остаточной компоненты суточных ходов МНЧ ($\sigma\{\tilde{u}(t)\}$) для весеннего времени, полученные для радиолонии Кипр – Йошкар-Ола (2600 км), представлены на рис. 2. Аналогичные зависимости имеют место и для других радиолоний. Их анализ позволяет сделать следующие обобщающие заключения:

- весной, осенью и зимой суточные вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ выше днем, чем ночью;
- летом разница между вариациями остаточ-

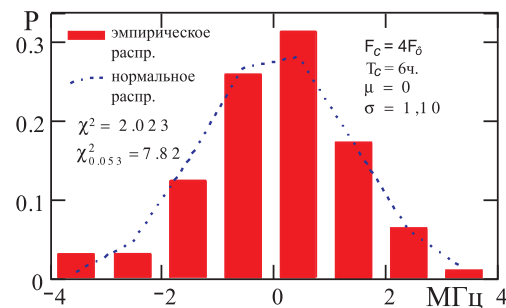


Рис. 5. Нормальный закон распределения остаточной компоненты СХ МНЧ в разное время.

ной компоненты суточных ходов МНЧ в течение суток менее выражена;

- 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 – 4:00 LT, т.е. сразу после захода и до восхода Солнца.

Результаты моделирования суточных ходов МНЧ на разных радиолниях за период 1994 – 2005 г. обнаруживают почти линейные зависимости ($\overline{\sigma\{\tilde{u}(t)\}}$) от среднего числа солнечных пятен ($\overline{R12}$), среднего значения солнечной радиации ($\overline{F_{10.7}}$). Для радиолнии Иркутск – Йошкар-Ола такая зависимость показана на рис. 3. Аналитически их можно представить следующей формулой:

$$\sigma_{\varepsilon}(\mu_R) = a_0\mu_R + a_1, \quad (0 \leq \mu_R \leq 150) \quad (5)$$

$$\sigma_{\varepsilon}(\mu_F) = b_0\mu_F + b_1, \quad (50 \leq \mu_F \leq 200) \quad (6)$$

где $\sigma_{\varepsilon} = \overline{\sigma\{\tilde{u}(t)\}}$, $\mu_R = \overline{R12}$ и $\mu_F = \overline{F_{10.7}}$, a_i, b_i – константы.

Исследовалась связь между вариациями остаточной компоненты суточных ходов МНЧ и характеристиками перемещающихся ионосферных возмущений. Результаты исследований, проведенных для всех радиолний в разное время суток, указывают на линейную возрастающую зависимость вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ от амплитуды перемещающихся ионосферных возмущений. Кроме этого, вариация остаточной компоненты суточных ходов МНЧ из-за перемещающихся ионосферных возмущений днем (7:00 – 19:00 LT) выше, чем ночью (19:00 – 07:00 LT). Это объясняется более высокой дневной электронной концентрацией в ионосферном F-слое.

На рис. 4 показаны функциональные зависимости вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ с амплитудой перемещающихся ионосферных возмущений для радиолнии Кипр – Йошкар-Ола в летное время.

Результаты исследования показывают, что вариации остаточной компоненты суточных ходов МНЧ, вызванные влиянием перемещающихся ионосферных возмущений, 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 перемещающихся ионосферных возмущений (δN) в форме полинома четвертой степени:

$$\sigma\{\tilde{u}(t)\} = F(\delta N) = \sum_{n=0}^4 a_n \cdot (\delta N)^n, \quad (7)$$

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

Полученные теоретические результаты представляют основу методики интерпретации результатов наклонного зондирования радиолний большой протяженности и позволяют сформулировать методику измерения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений по данным об остаточной компоненте суточных ходов МНЧ, определенным из результатов НЗ радиолний с помощью ЛЧМ ионозонда.

Далее, представлена интерпретация результатов натур-

ного эксперимента путем сопоставления их с данными проведенных в работе теоретических исследований. С использованием критериев Стьюдента, Дарбина-Уотсона, Пирсона доказан случайный характер остаточной компоненты натуральных суточных ходов МНЧ для радиолний с протяженностью 2,6 – 5,7 Мм. На рис. 5 представлен нормальный закон распределения остаточной компоненты СХ МНЧ для радиолнии Инскип – Йошкар-Ола.

Обнаружена корреляция мощности остаточной компоненты суточных ходов МНЧ разных модов распространения радиоволн в ионосфере с уровнем геомагнитной активности, иллюстрацией которой является рис. 6. На нем показана зависимость мощности (дисперсии – $\sigma^2\{\tilde{u}(t)\}$) остаточной компоненты суточных ходов МНЧ мода 1F от уровня геомагнитной активности. Видно, что в области частот 5 – 28 F_{ϕ} с ростом возмущенности увеличивается мощность остаточной компоненты.

Результаты анализа показали, что для спокойных дней полоса частот остаточной компоненты, имеющей связь с уровнем геомагнитной активности, превышает 40 F_{ϕ} , а для возмущенных дней меньше 40 F_{ϕ} . В частотных областях 10 – 16 F_{ϕ} и 22 – 28 F_{ϕ} были выделены периодические составляющие остаточной компоненты суточных ходов МНЧ с амплитудами ~ 0.2 – 1 МГц, которые согласно полученным результатам теоретических исследований обусловлены перемещающимися ионосферными возмущениями с периодами ~ 1 – 3 часа. Исследование вариаций текущего спектра остаточной компоненты суточных ходов МНЧ позволили выделить «восходно-заходные» эффекты, которые выражаются в значительных изменениях спектральных амплитуд и расширении полосы в область высоких частот в периоды восхода (4:00 – 8:00 LT) и захода (16:00 – 20:00 LT) Солнца по местному времени (LT).

На рис. 7 представлены спектры остаточной компоненты суточных ходов МНЧ радиолнии 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 перемещающиеся ионосферные возмущения, амплитуда и частотный диапазон которых увеличиваются с ростом геомагнитной активности. Оценены амплитуды перемещающихся ионосферных возмущений для восходного и заходного времени.

Результаты проведенных комплексных исследований свидетельствуют о том, что остаточная компонента суточных ходов МНЧ является чувствительным индикатором состояния космической погоды на уровнях верхней атмосферы Земли. В этой связи в работе предположен подход в исследовании одновременного влияния на дальнейшее распространение декаметровых радиоволн перемещающихся ионосферных возмущений, а также методика мониторинга ионосферы в областях отражения сверхширокополосных зондирующих ЛЧМ сигналов на дальних декаметровых радиолниях.

Заключение

1. Разработаны новые методики: интерпретации данных наклонного зондирования ионосферы с помощью ЛЧМ ионозонда, позволяющая в остаточной компонен-

