

Исследование параметров ПИВ методом наземного зондирования ионосферы Земли

В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, Лыонг Вьет Лок, М.И. Рябова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Поволжский государственный технологический университет»

424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3, RyabovaMI@volgategatech.net

Представлены результаты моделирования остаточной компоненты суточного хода максимально наблюдаемых частот для дальних декаметровых радиолиний. Исследована связь между характеристиками остаточной компоненты и параметрами перемещающихся ионосферных возмущений. Представлены экспериментальные данные о «восходно-заходном эффекте» в остаточной компоненте, обнаруженном в частотной области. Дана интерпретация эффекта на основе модельных ионограмм НЗИ, полученных с учетом влияния ПИВ.

The simulation results of the residual components of diurnal variation of the maximum observed frequencies for long-distance decameter radio links. The relation between the characteristics of the residual components and parameters of traveling ionospheric disturbances.

Введение

Исследования ионосферы Земли [1-4], проводившиеся на протяжении десятилетий с помощью наземных методов, ракет и искусственных спутников убедительно показывают, что ее характерной особенностью вплоть до высот 1000 км является изменчивость и неоднородность [5, 6]. Эта 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 радиолиний. Отсутствие эффективных средств наклонного зондирования ионосферы долгое время сдерживало исследования данных эффектов. Ситуация резко изменилась с появлением наклонных ЛЧМ ионозондов. Однако существует проблема интерпретации экспериментальных данных наклонного зондирования, связанная с необходимостью решения обратных задач наклонного зондирования ионосферы.

Цель работы: разработать методику моделирования ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы и суточных ходов МНЧ с учетом ПИВ. Исследовать связь между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ. Интерпретировать данные натуральных экспериментов по наклонному зондированию ионосферы с использованием результатов модельных экспериментов.

Условия проведения эксперимента и объем экспериментальных данных.

Исследования проводились для двух дальних радиолиний протяженностью порядка 3000км: г.Иркутск – г.Йошкар-Ола (3500км) и г.Инскип (Великобритания) – г.Йошкар-Ола (3100км). Во всех экспериментах приемник был расположен в г.Йошкар-Оле.

Параметры ионосферы рассчитывались с помощью международной эмпирической модели IRI (International Reference Ionosphere). Вычислительный эксперимент охватывает период активности Солнца (11 лет) с 1994г. по 2005г. Основной задачей

являлось нахождение характеристик остаточной компоненты СХ МНЧ в зависимости от времени суток и сезона (день, месяц, сезон, год), а также определение влияния геомагнитных возмущений и солнечной активности.

Были проведены исследования вариации числа солнечных пятен (R), уровня солнечной радиации ($F_{10.7}$), Kp и Dst индексов в период 1994 – 2005 гг., соответственно (получены с помощью SPIDR-NGDC).

В период с 1999г. до 2002г. солнечная активность была высокой, а с 1994г. по 1997г. годы – низкой. Вероятность ионосферных возмущений была высокой в 1994г. и 2003г., а в 1996г. и 1997г она была значительно ниже.

Для выделения случайной компоненты суточного хода МНЧ использовался цифровой метод, реализующий фильтр низких частот (ФНЧ) с прямоугольным окном, и метод взвешенной скользящей средней с гауссовым ядром.

Примеры СХ МНЧ радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола, полученные с использованием модели IRI и программы, разработанной по вышеприведенному алгоритму (см. п.4), представлены на рис. 1.

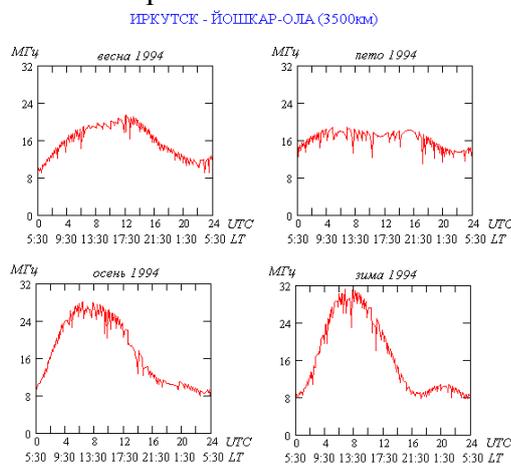


Рис. 1. Примеры суточных ходов МНЧ радиолиний

Вариации остаточной компоненты СХ МНЧ является одной из ее важных характеристик, которая несет информацию о неоднородностях ионосферы, в частности ПИВ, поэтому далее анализируется стандартное отклонение (σ) остаточной компоненты СХ МНЧ для исследуемых радиолиний в разное время суток и для разных сезонов года.

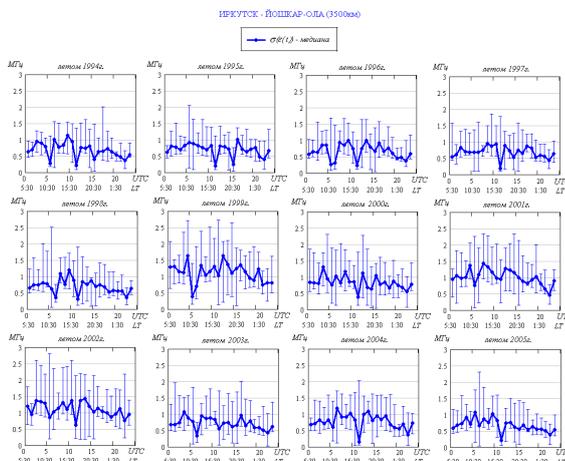


Рис. 2. Вариации стандартного отклонения остаточной компоненты СХ МНЧ летом в период 1994г. – 2005г. для радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола

Результаты моделирования СХ МНЧ показывают, что летом наблюдаются большие вариации МНЧ в период восхода, захода Солнца и полудня по местному времени (LT), а зимой вариации МНЧ такого порядка наблюдаются днем и достигают максимума в период около полудня. Кроме этого, вариации остаточной компоненты СХ МНЧ летом и зимой на радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола были значительны в периоды достаточно высокого уровня солнечной активности и большой вероятности появления ионосферных возмущений (1998г. - 2005г.). Весной и осенью были обнаружены аналогичные зависимости мощности остаточной компоненты СХ МНЧ от времени суток. Таким образом, проведенный эксперимент показывает на значимую связь между вариациями остаточной компоненты СХ МНЧ и уровнем геомагнитной активности.

Далее исследовалась связь между σ остаточной компоненты СХ МНЧ и основными параметрами ПИВ. Этими параметрами для модели, представленной в (4), являются: вариация электронной концентрации или амплитуда ПИВ ($\delta N = \Delta N / N$), высота стратификации (h_c), диапазон стратификации (z_m), и вертикальный масштаб ПИВ (l). Результаты анализа показывают, что существует значимая связь между амплитудой ПИВ (δN) и вариациями остаточной компоненты СХ МНЧ.

На рис. 3. показаны зависимости между амплитудой ПИВ δN и σ остаточной компоненты СХ МНЧ в период времени 0:00-4:00 (UTC) летом и зимой для радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола.

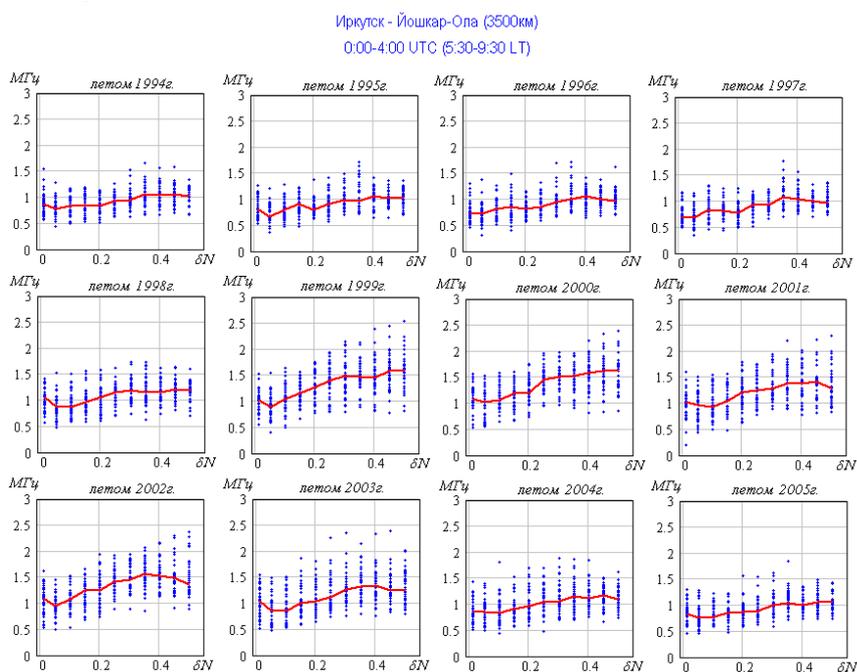


Рис. 3. Связь между амплитудой ПИВ и σ остаточной компоненты СХ МНЧ в период 0:00-4:00 (UTC) летом для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола

Видно, что σ остаточной компоненты СХ МНЧ увеличивается при росте амплитуды ПИВ. Такая же зависимость была обнаружена на радиолинии г.Инскип – г.Йошкар-Ола в период с 1994г. до 2005г. Кроме того, связь между амплитудой ПИВ и σ остаточной компоненты СХ МНЧ более выражена во время высокой солнечной активности (1999г. - 2003г.).

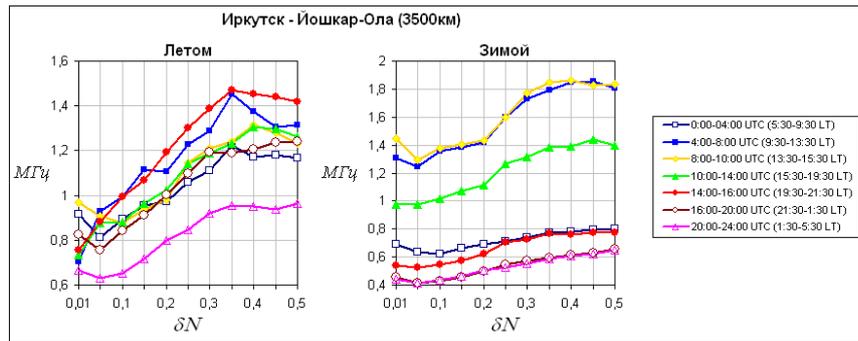


Рис. 4. Связь между амплитудой ПИВ и вариацией остаточной компоненты СХ МНЧ летом и зимой для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола

Рис. 4. иллюстрирует влияние ПИВ на величину σ остаточной компоненты СХ МНЧ. Видно, что σ испытывает сильные изменения в период около полудня, восхода и захода Солнца по местному времени (LT). Данный результат позволяет сделать вывод о существовании значимой связи между вариацией остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ.

В работе [4] нами было показано, что остаточная компонента СХ МНЧ испытывает существенные вариации в периоды восхода (для средней точки исследуемой радиолинии) (0:00-7:00 LT) и захода Солнца (15:00-21:00 LT). Эти явления мы назвали «восходно-заходными» эффектами. На рис. 5 приведены вариации текущих спектров остаточной компоненты СХ МНЧ, полученные на радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола в двух частотных областях (24-64 F_{ϕ} и 64-256 F_{ϕ}) для 06.12.2004 – 09.12.2004. В верхней части рисунка приведены суточные ходы индекса магнитной активности K_p . Видно, что низкому уровню геомагнитной активности соответствуют «короткие» всплески остаточной компоненты СХ МНЧ. В периоды роста геомагнитной активности продолжительность «всплесков» и их амплитуды увеличиваются.

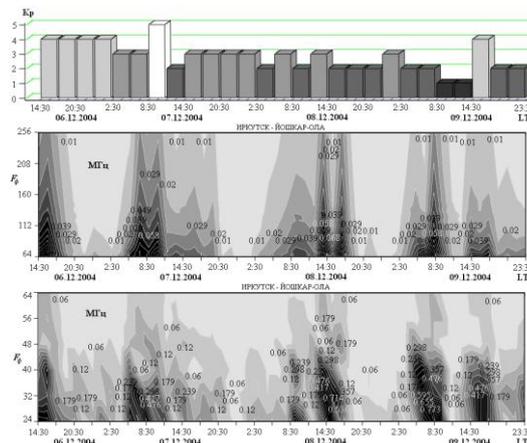


Рис. 5. Спектры остаточной компоненты СХ МНЧ радиолинии г.Иркутск – г.Йошкар-Ола с 06.12.2004 по 09.12.2004.

Отметим, что 06.12.2004 и 07.12.2004, когда уровень геомагнитной активности был высоким ($K_p \sim 5$) в спектре остаточной компоненты СХ МНЧ наблюдалось много уровней амплитуды спектральных составляющих, максимальные значения при этом достигали единиц МГц. Это значит, что в периоды повышенной геомагнитной активности СХ остаточной компоненты МНЧ испытывал сильные вариации: ее спектральные компоненты усиливались, а спектр расширялся.

Выводы

Разработана методика моделирования ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы и суточных ходов МНЧ с учетом влияния перемещающихся ионосферных возмущений

1. Проведены исследования за период 11-летнего цикла солнечной активности 1994-2005 гг.

2. В результате моделирования показано, что σ МНЧ увеличивается в период восхода и захода Солнца («восходно-заходный» эффект) и полудня по местному времени (LT).

3. СКО остаточной компоненты СХ МНЧ больше в периоды, когда уровень солнечной активности и вероятность появления ионосферных возмущений повышены.

4. Получены экспериментальные функциональные зависимости между характеристиками остаточной компоненты СХ МНЧ и основными параметрами ПИВ. Установлено, что СКО остаточной компоненты СХ МНЧ увеличивается с ростом амплитуды ПИВ. Кроме того, связь между амплитудой ПИВ и σ остаточной компоненты СХ МНЧ ярче выражена во время высокой солнечной активности.

5. Концентрация электронов и их число в ионосфере (слои *D*, *E*, *F*) зависит от скорости диссоциированной и рекомбинационной реакций. Скорость этих реакций пропорциональна температуре нагрева Солнцем ионосферы Земли, и быстро меняется в периоды восхода и захода Солнца. Результаты натуральных исследований и вычислительного эксперимента подтверждают факт наличия связей между характеристикой остаточной компоненты СХ МНЧ и параметрами ПИВ и подтверждают высказанную выше гипотезу. Таким образом, существование восходно-заходных эффектов является логичным.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 15-07-05280; 15-07-05294), госзадания Министерства образования и науки РФ (проекты 8.2697.2014/К, 3.2695.2014/К).

Литература

1. Дробжев В.И. Волновые возмущения в ионосфере / В.И. Дробжев, Г.М. Куделин, В.И. Нургожин и др. – Алма – Ата: Наука, 1975. – 178 с.
2. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы.- М.: Наука, 1982. 196 с.
3. Филипп Н.Д. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере / Н.Д. Филипп, Н.Ш. Блаунштейн, Л.М. Ерухимов и др. – Кишинев: Штиинца, 1991. – 287 с.
4. Иванов, В.А. Многомерный высокочастотный радиоканал и экспериментальные исследования его основных характеристик / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Чернов // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2013. Т. 18, № 8. С. 40-48.
5. Иванов, В.А. Исследование факторов, приводящих к искажению высокочастотных сигналов с расширенным спектром при их квазизенитном распространении в ионосфере / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2011. - Т. 16, № 8. - С. 33-39.
6. Иванов, В.А. Особенности характеристик высокочастотных ионосферных радиолиний квазизенитного распространения / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, Е.В. Тимофеев // Электросвязь. - 2013. - № 5. - С. 45-48.