

Аномальный ход МНЧ на трассе наклонного зондирования Кипр-Москва в период зимнего солнцестояния

В. Ю. Ким, Ю.Я. Ружин

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкина Российской академии наук, ИЗМИРАН
108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское ш.4
E-mail: vkim@izmiran.ru*

Представлены результаты экспериментальных исследований суточного хода МНЧ на трассе наклонного зондирования Кипр - Москва во время зимнего солнцестояния. Обнаружен аномальный ход МНЧ в предвосходные часы, при котором наблюдается локальный максимум величины МНЧ на ~ 10%. Такой рост МНЧ связан с ростом электронной концентрации на ~ 20% в области отражения зондирующих радиоволн. Рост концентрации в слое F2 ионосферы может быть связан с прохождением со сверхзвуковой скоростью солнечного терминатора через магнитно-сопряженную область ионосферы. Ключевые слова: ионосфера, наклонное зондирование, максимальная наблюдаемая частота (МНЧ)

Anomalous course of the MNP on the Cyprus-Moscow oblique sounding path during the winter solstice

V. Yu. Kim, Yu. Ya. Ruzhin

*Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation named after N.V. Pushkova Russian Academy of Sciences, IZMIRAN
108840, Moscow, Troitsk, Kaluzhskoe highway 4
E-mail: vkim@izmiran.ru*

The results of experimental studies of the MNP diurnal variation on the Cyprus - Moscow oblique sounding path during the winter solstice are presented. An anomalous behavior of the magnetic nanoparticles was found in the pre-sunrise hours, at which a local maximum of the magnetic nanoparticles was observed by ~ 10%. Such an increase in MNPs is associated with an increase in the electron density by ~ 20% in the region of reflection of probe radio waves. The increase in the concentration in the F2 layer of the ionosphere can be associated with the passage of the solar terminator at a supersonic speed through the magnetically conjugated region of the ionosphere. Keywords: ionosphere, oblique sounding, maximum observable frequency (MNF)

Введение

Исследование ионосферных вариаций различных пространственно-временных масштабов важно для разработки методов прогноза распространения радиоволн ВЧ радиоволн. Сезонные и суточные изменения основных ионосферных параметров и их влияние на распространение радиоволн на трассах наклонного зондирования (НЗ) достаточно хорошо изучены. Вместе с тем есть проблема повышения точности краткосрочного прогноза распространения ВЧ радиоволн в ночное время суток, когда ионосферные возмущения снижают точность прогноза ионосферных параметров. Одним из важных факторов появления возмущений в ночной области F2 является влияние различных

плазменных процессов, происходящих во внешней ионосфере. Это связано с особенностями ионообразования в ночной ионосфере, где основную роль играют потоки ионизирующих частиц из плазмосферы и которая, в свою очередь, подвержена влиянию различных электромагнитных процессов в магнитосфере Земли [1]. Поэтому важной задачей является изучение регулярных факторов, влияющих на вариации электронной концентрации в ночной области $F2$.

В работах [2], [3], [4] вариации параметров ночной ионосферы исследовались методом вертикального зондирования (ВЗ) и основное внимание было уделено взаимному влиянию магнитно-сопряженных областей (МСО) ионосферы. В работах [2] и [3] по ионограммам ВЗ и доплеровским измерениям было показано, что вероятность появления ночного спорадического слоя E_s в пункте наблюдения Москва повышается в период прохождения солнечного терминатора через магнитно-сопряженную к Москве область ионосферы. В [4] путем анализа ионограмм ВЗ для целого ряда магнитно-сопряженных пунктов наблюдения были исследованы восходные эффекты в ионосферном слое $F2$. При этом была выявлена взаимосвязь между прохождением терминатора в магнитно-сопряженной к пункту наблюдений области ионосферы, в которой вследствие сверхзвукового движения терминатора возбуждаются альфвеновские волны и возбуждаются квазистатические электрические поля. Это приводит к увеличению потока надтепловых электронов из дневного слоя $F2$ ионосферы, которые, распространяясь вдоль силовых линий магнитного поля Земли, попадают в магнитно-сопряженную ночную область слоя $F2$ и вызывают дополнительную ионизацию ионосферной плазмы.

В данной работе проводилось экспериментальное исследование максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) на трассе Кипр-Москва в период зимнего солнцестояния, при котором ночные условия в ионосфере имеют максимальную продолжительность.

Постановка экспериментов

Наблюдения восходных эффектов проводились методом наклонного ЛЧМ зондирования на трассе Кипр-Москва (ИЗМИРАН), длина трассы составляла примерно $D = 2300$ км. Передатчик, излучавший радиосигналы ЛЧМ, находился в пункте с координатами (35 N; 34 E), приемный пункт располагался в ИЗМИРАН (55 N; 37 E), а середина трассы находилась в окрестности Ростова-на-Дону (47N; 39 E).

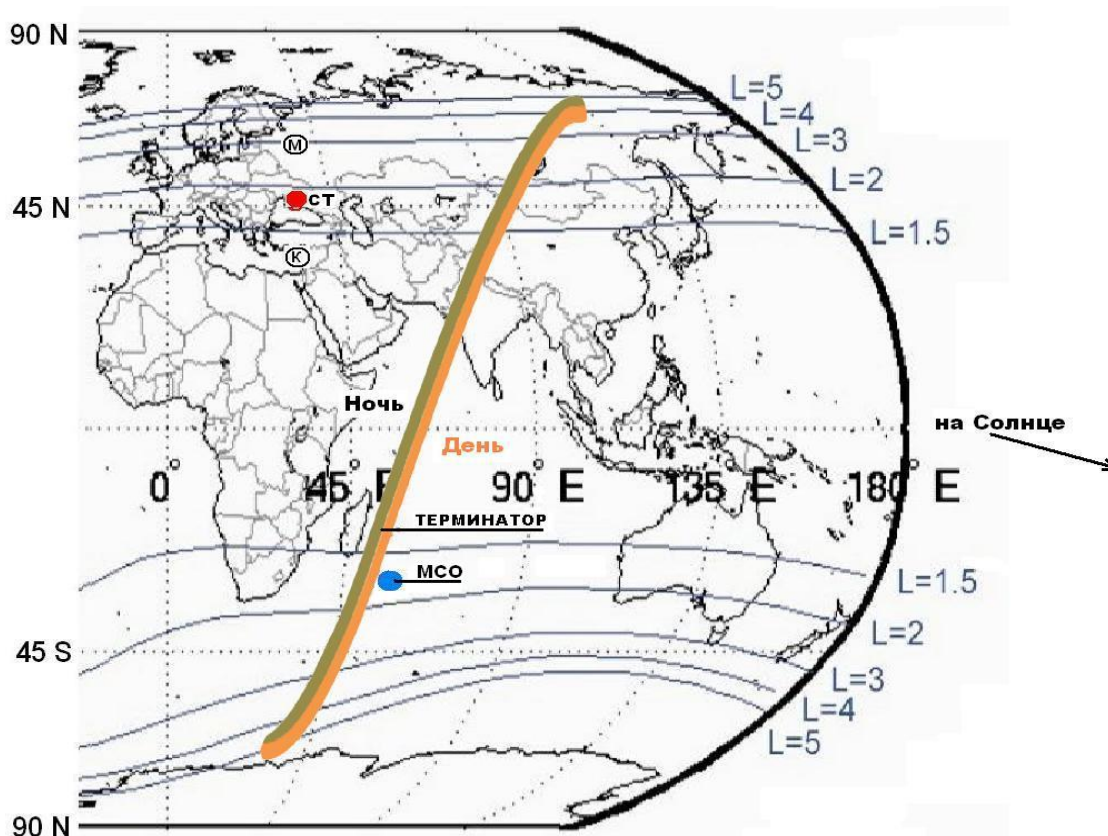


Рис. 1. Схема наблюдения эффектов солнечного терминатора на трассе наклонного ЛЧМ зондирования Кипр-Москва

Схема проведения экспериментов приведены на рис. 1, на котором условно показаны: пункт излучения ЛЧМ сигналов на Кипре К, пункт приема зондирующих сигналов в Москве М, окрестность средней точки трассы СТ показана красным кружочком с заливкой.

Окрестность магнитно-сопряженной области МСО (35 S; 54 E) показана синим кружочком в южном полушарии рядом с терминатором, направление на Солнце показано стрелкой. Контурами на карте показаны линии магнитного сопряжения для различных L-оболочек магнитного поля Земли и видно, что области СТ и МСО располагаются между оболочками $L = 1,5$ и $L = 2$. В рассматриваемой области ионосферы восход Солнца в МСО опережает восход в СТ примерно на 4 часа.

Экспериментальные исследования проводились в ИЗМИРАН с помощью специальной приемной ЛЧМ аппаратуры, которая была создана в 2009 году на базе промышленного радиоприемника типа «Катран» и позволяла принимать ЛЧМ сигналы в диапазоне от 1 МГц до 30 МГц. При этом скорость сканирования частоты могла составлять 50 – 1000 кГц/сек. Синхронизация старта сканирования частоты осуществляется с помощью спутниковой системы навигации GPS-ГЛОНАСС с точностью не хуже 10 мксек, при этом диапазон измеряемых групповых задержек составляет 1-20 мсек. Такие параметры установки позволяли проводить регистрацию ЛЧМ сигналов практически от любых действующих ЛЧМ передатчиков. В качестве приемной антенны использовалась широкополосная антенна типа «Дельта» с высотой подвеса 18 метров и ориентированной в направлении Север-Юг.

Результаты экспериментов

В ходе экспериментов в ИЗМИРАН проводилась круглосуточная регистрация ионограмм НЗ от ЛЧМ-передатчика на Кипре, при этом регистрация ионограмм производилась с различной периодичностью в режимах 10, 15 и 20 мин.

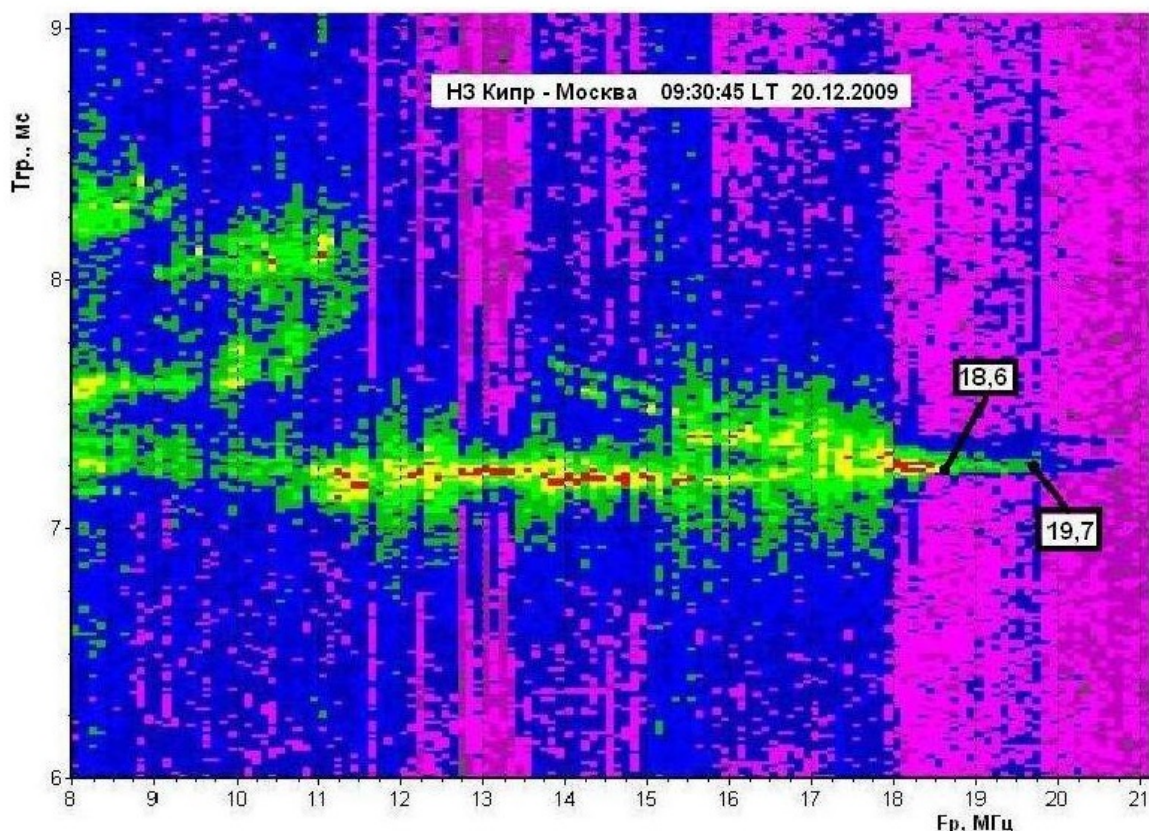


Рис. 2. Оценка величины МНЧ-Х на ионограмме наклонного ЛЧМ зондирования с помощью экранного интерфейса

Отражение радиоволн КВ диапазона в условиях ночной ионосферы происходит в условиях повышенной диффузности в слое F_2 и треки магнитоионных компонент на ионограммах НЗ на частотах вблизи МНЧ зачастую целесообразно использовать величину значения МНЧ для X компоненты (МНЧ-Х).

Оценка МНЧ из ионограмм НЗ производилась оператором на ПК с использованием экранного интерфейса и состояла в получении значения МНЧ-Х односкачковой моды F_2 -Х, как это показано на рис. 2. На рис.2 представлен фрагмент ЛЧМ-ионограммы, полученной на трассе Кипр-Москва 20 декабря 2009 г. в 09:30 LT. Оценка величины МНЧ-Х = 18,6 МГц получена с учетом интенсивности сигнала – точка отсчета частоты бралась сразу после максимума сигнала на “носу” трека $1F_2$ -Х, (относительная величина уровня сигнала на максимуме была равна 223 на частоте 18,4 МГц, в точке отсчета уровень сигнала был равен 184). Выше частоты отсчета уровень сигнала спадает до значения 162 на частоте 19,7 МГц. Погрешность оценки МНЧ-Х в данной методике обработки ионограмм можно оценить величиной $\sim 0,1 - 0,2$ МГц.

Наблюдения влияния прохождения терминатора на трассу НЗ Кипр-Москва были начаты в период зимнего солнцестояния 2009 году. Регистрация ЛЧМ-ионограмм проводилась в режиме 20 мин, диапазон рабочих частот зондирования был от 8 МГц до 30 МГц. Некоторые результаты анализа ночной и утренней частей (с 00:00 LT до 13:10 LT) суточного хода МНЧ-Х представлены на рис. 3, рис. 4 и рис. 5. На этих рисунках залитыми кружочками показаны

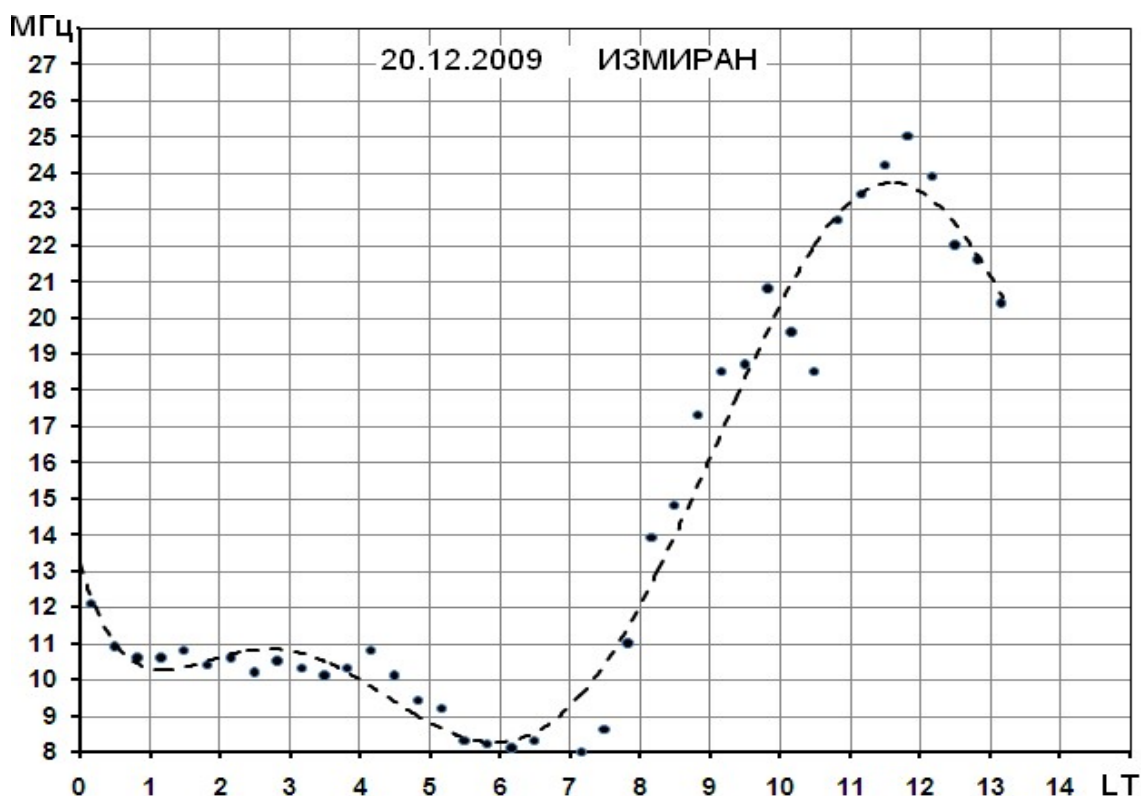


Рис. 3. Зависимость МНЧ-Х от времени за первую половину суток 20 декабря 2009 года на трассе Кипр- Москва. Значения МНЧ-Х показаны залитыми кружочками, сплошной линией показан аппроксимирующий сплайн. Время LT = UT + 3 часа

экспериментальные значения МНЧ-Х, диаметр этих кружочков соответствует погрешности оценки МНЧ-Х, сплошной линией показан аппроксимирующий график, полученный путем обработки экспериментальных данных с помощью сглаживающего кубического сплайна.

На рис. 3 показан результат обработки данных за первую половину суток 20 декабря 2009 года. Видно, что величина МНЧ-Х после 00:00 LT со значения ~ 12 МГц снижается и после 01:00 LT постепенно снижается до значения ~ 10 МГц в 03:30 LT, а затем наблюдается рост до ~ 11 МГц в 04:10 LT. После 04:10 LT наблюдается глубокий спад величины МНЧ-Х до значения ~ 8 МГц в 06:10 LT, а в 06:40 LT значение МНЧ-Х опустилось ниже 8 МГц и не могло наблюдаться. Затем после 07:10 LT начинается быстрый рост МНЧ-Х, который в полдень в 11:40 LT значение МНЧ-Х достигает значения 25 МГц. Далее, в соответствии с увеличением зенитного угла Солнца, начинается спад МНЧ-Х до значения 20,4 МГц в 13:10 LT. На рис. 3 видно, что в ночное время в окрестности средней точки трассы НЗ Кипр-Москва в слое *F2* ионосферы поддерживается достаточно высокий уровень электронной концентрации в ночное время. Об этом свидетельствуют значения МНЧ-Х на уровне ~ 10,5 МГц в интервале времени от 01:00 LT до 04:00 LT, которые на ~ 2,5 МГц превышают минимальные значения МНЧ-Х ~ 8 МГц в интервале времени от 05:30 LT до 07:10 LT.

На рис. 4 представлен результат наблюдения поведения МНЧ-Х за 21 декабря 2009 года и видно, что в целом суточный ход МНЧ-Х подобен показанному выше на рис.3 ходу МНЧ-Х за 20 декабря 2009 год, хотя есть различие в деталях.

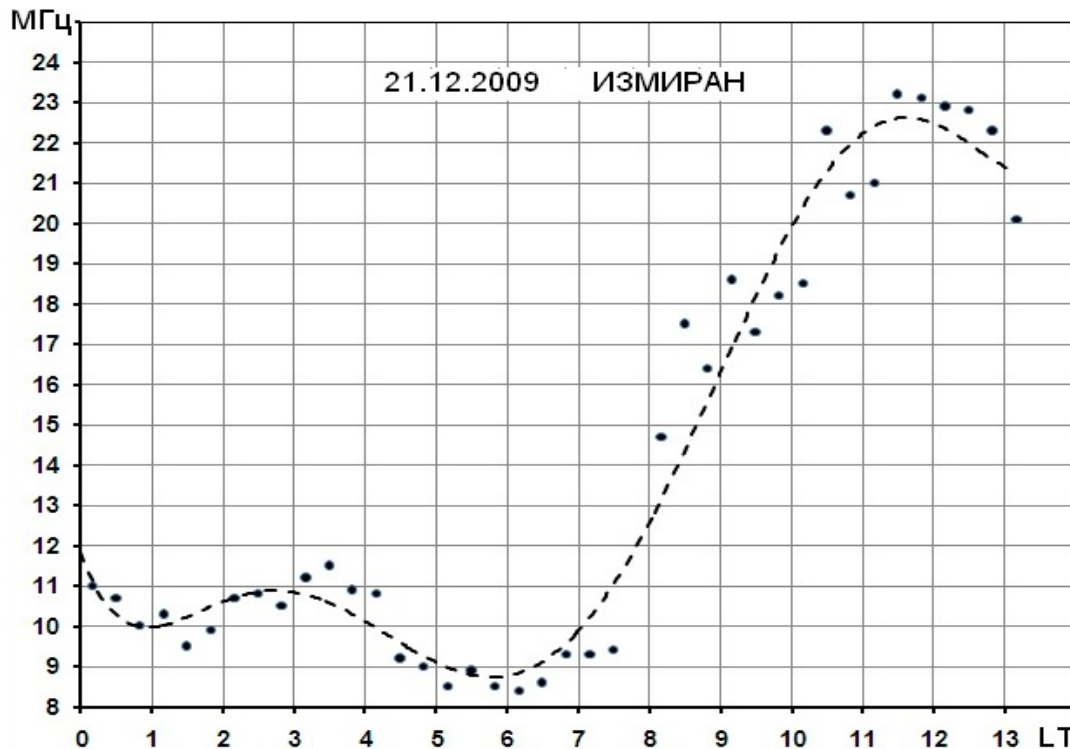


Рис. 4. Зависимость МНЧ-Х от времени за первую половину суток 21 декабря 2009 года на трассе Кипр-Москва. Значения МНЧ-Х показаны заливными кружочками, сплошной линией показан аппроксимирующий сплайн. Время LT = UT + 3 часа

На рис. 4 видно, что что величина МНЧ-Х со значения ~ 11 МГц в 00:10 LT снижается до значения ~ 9,5 МГц в 01:30 LT, а затем наблюдается рост МНЧ-Х до локального максимума ~ 11,5 МГц в 03:10 LT. После 03:30 LT происходит спад величины МНЧ-Х и достигает минимального значения ~ 8,4 МГц в 06:10 LT, а затем происходит рост МНЧ-Х, который в 11:30 LT достигает максимального значения 23,2 МГц. Далее, в соответствии с увеличением зенитного угла Солнца, начинается

вечерний спад МНЧ-Х до значения 20,1 МГц в 13:10 LT. Здесь превышение МНЧ-Х в локальном максимуме над минимальным значением МНЧ-Х составляет ~ 3,1 МГц. В целом видно, что аппроксимирующий сплайн на рис. 4 подобен линии аппроксимирующего сплайна на рис. 3, где представлен ход МНЧ-Х за 20 декабря 2009 год. Сходство состоит в том, что интервал относительно высоких ночных значений МНЧ-Х длится примерно от 00:00 LT до 04:00 LT, а минимальных значений МНЧ-Х ~ 8 МГц в обоих случаях составляет примерно 2,5 часа и утренний рост МНЧ-Х начинается примерно в 07:30 LT. Для сравнения на рис. 5 представлен ход МНЧ-Х на той же трассе Кипр-Москва в день весеннего равноденствия 21 марта 2010 г. На рис.5 видно, что в начале суток происходит немонотонный спад МНЧ-Х интервале времени с 00:05 LT (МНЧ-Х ~ 10,5 МГц) до 03:05 LT (МНЧ-Х ~ 9,6 МГц). Затем с 03:05 LT (МНЧ-Х ~ 9,8 МГц) начинается неравномерный подъем до значения МНЧ-Х ~ 11,4 МГц в 05:25 LT, а далее начинается быстрый рост МНЧ-Х, который достигает максимального значения МНЧ-Х ~ 23,4 МГц в 09:05 LT. Далее в течение всех дневных часов наблюдаются значительные вариации МНЧ-Х вплоть до ~ 20:45 LT, а затем происходит быстрый спад до ночных значений МНЧ-Х ~ 9 МГц в ~ 22 LT.

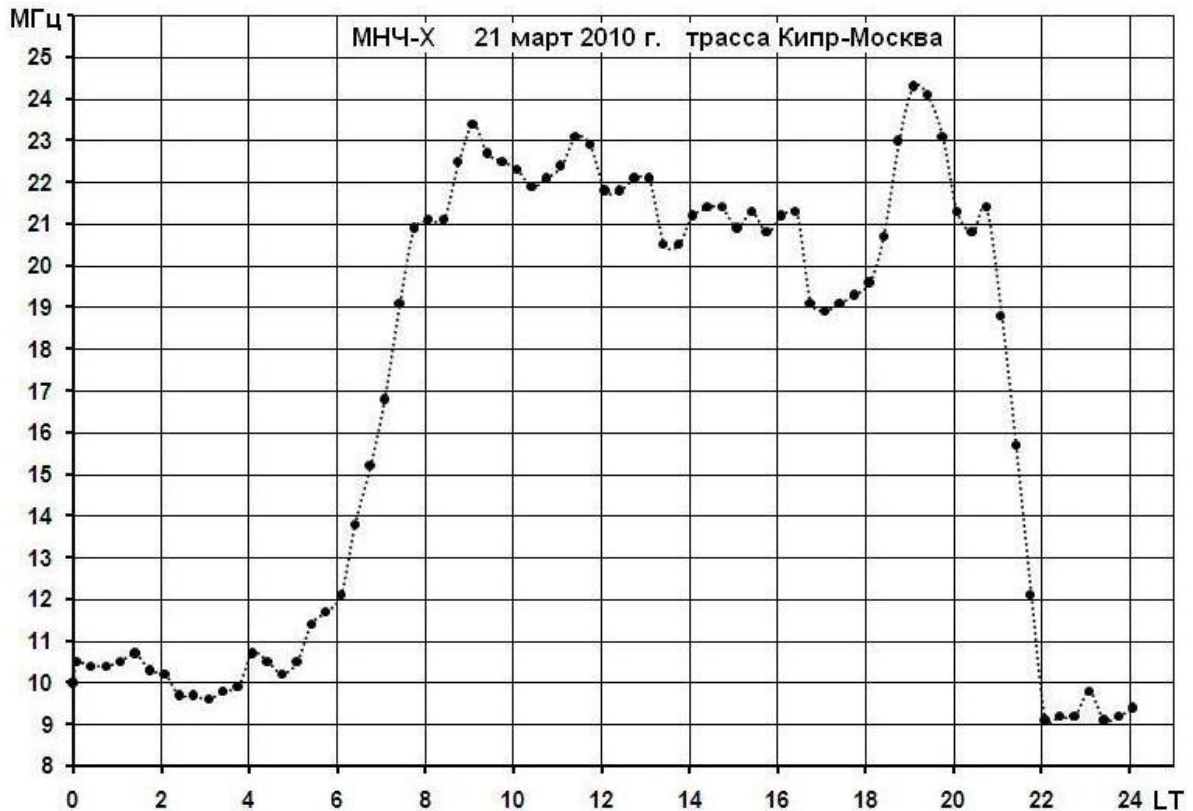


Рис. 5. Зависимость МНЧ-Х от времени суток 21 марта 2010 года на трассе Кипр- Москва. Экспериментальные значения МНЧ-Х показаны зачёркнутыми кружочками, сплошной линией показан аппроксимирующий сплайн. Время LT = UT + 3 часа

Показанный на рис. 5 суточный ход МНЧ-Х является вполне типичным для условий равноденствия, когда интервал времени высоких значений МНЧ-Х (в среднем около значения МНЧ-Х ~ 21 МГц) занимает практически 12 часов.

В целом видно, что аппроксимирующий сплайн на рис. 4 подобен линии аппроксимирующего сплайна на рис. 3, где представлен ход МНЧ-Х за 20 декабря 2009 год. Сходство состоит в том, что интервал относительно высоких ночных значений МНЧ-Х длится примерно от 00:00 LT до 04:00 LT, а минимальных значений МНЧ-Х ~ 8 МГц в обоих случаях составляет примерно 2,5 часа и утренний рост МНЧ-Х начинается примерно в 07:30 LT.

Обсуждение результатов

Электронная концентрация N_e в слое $F2$ ночью, когда прекращается ионизирующее излучение Солнца, поддерживается интенсивностью потока ионизирующих частиц из плазмосферы, при этом формируется зимний послеполуночный максимум f_0F2 , вслед за которым наступает минимум f_0F2 , [1]. При этом потоки фотоэлектронов из освещенной части могут двигаться в ночную ионосферу по магнитным силовым линиям между магнитно-сопряженными областями и приводить к дополнительным вариациям N_e , (или f_0F2) в слое $F2$ ионосферы.

Поэтому наблюдаемое на рис. 3 и рис.4 поведение МНЧ-Х в общем соответствует особенностям хода f_0F2 в зимний сезон. На рис. 3 максимум f_0F2 вблизи LT = 04:10 (20.12.2009г.) превышает среднее значение МНЧ-Х ~ 10 МГц на величину Δ МНЧ-Х ~ 1 МГц. На рис. 4 видим, что максимум f_0F2 вблизи LT = 04:00 (21.12.2009г.) превышает среднее значение МНЧ-Х ~ 10 МГц на величину Δ МНЧ-Х ~ 3 МГц.

Появление максимумов в МНЧ-Х на трассе Кипр-Москва связано с ростом электронной концентрации N_e в максимуме слоя $F2$ по времени суток около 04 LT. Этот момент времени практически совпадает с прохождением зоны терминатора через область ионосферы в южном полушарии, которая является магнитно-сопряженной по отношению к области отражения зондирующих радиоволн на трассе Кипр-Москва.

Для оценки величины относительного роста критической частоты ионосферы δf_0F2 в области отражения можно воспользоваться известным “законом секанса” в виде $f_k = \sec \varphi_0 f_0F2$. Положив $f_k = \text{МНЧ-Х}$ получим формулу $f_0F2X = \cos \varphi \text{МНЧ-Х}$, где f_0F2X - критическая частота для Х-компоненты при ВЗ и которая связана с критической частотой для О - компоненты соотношением $f_0F2 = f_0F2X - 0,7$ МГц. Полагая, что в данном эксперименте на трассе НЗ в период от 00:00 LT до 07:00 LT угол φ менялся мало, получим, что $\delta f_0F2X = \delta \text{МНЧ-Х}$. Тогда можно считать, что в слое $F2$ величина относительного возмущения критической частоты $\delta f_0F2 \sim \delta f_0F2X = \delta \text{МНЧ-Х}$.

Анализ представленных на рис. 4 данных показал, что в интересующем нас интервале времени суток от 00:00 до 07:00 LT среднее значение было МНЧ-Х $\sim 9,9$ МГц. Относительное превышение над средним значением в максимуме МНЧ-Х (в 03:10 LT) составило $\delta \text{МНЧ-Х} \sim 0,1$ или $\sim 10\%$. Такую же оценку можно дать для величины относительного возмущения критической частоты и получим $\delta f_0F2 \sim 10\%$. В пересчете на относительный рост электронной концентрации N_e в области отражения радиоволны получим оценку $\delta N_e \sim 20\%$. Этот локальный рост N_e может быть связан с ростом ионизации слоя $F2$ дополнительным потоком надтепловых фотоэлектронов из магнитосферы. Механизм появления потока электронов связан с возбуждением квазистатических электрических полей при прохождении линии солнечного терминатора через МСО. Распространение потока надтепловых электронов от МСО по магнитной оболочке $L \sim 1,7$ приводит к росту электронной концентрации N_e вблизи максимума слоя $F2$ ионосферы в окрестности середины трассы НЗ Кипр-Москва.

Отметим, что солнечная активность в период проведения экспериментов была низкой и показатель числа солнечных пятен составлял величину $W \sim 10$. Также, по данным магнитной обсерватории ИЗМИРАН, геомагнитная обстановка в последней декаде декабря 2009 г. была спокойной и индекс магнитной активности был низким с $K_i \sim 1$. Поэтому можно полагать, что отсутствие значительной магнитной и солнечной активности позволило успешно наблюдать ионосферные эффекты прохождения солнечного терминатора в магнитно-сопряженной ионосфере. Как показали длительные наблюдения [3], вероятность появления ночного спорадического E слоя во время восхода в магнитно-сопряженной области ионосферы была $\sim 40\%$. Поэтому можно ожидать, что и в слое $F2$ ионосферы вероятность проявления эффекта восхода в магнитно-сопряженной области ионосферы будет не менее $\sim 40\%$ и, соответственно, с такой же вероятностью может влиять на ход МНЧ.

Предварительный анализ массива ионограмм НЗ на трассе Кипр-Москва в течение 2009 и 2010 годов показал, что в зимних ночных условиях аномальный ход МНЧ наблюдается достаточно регулярно.

Заключение

Проведенные исследования распространения ВЧ радиоволн на трассе НЗ Кипр-Москва позволили выявить аномальный ход МНЧ в ночной ионосфере в период зимнего солнцестояния. Аномалия хода МНЧ состоит в появлении локального максимума МНЧ на величину $\sim 10\%$ вблизи LT $\sim 04:00$, который обусловлен ростом электронной концентрации в области отражения зондирующих радиоволн. Оценки показывают, что рост электронной концентрации в слое $F2$ может составить $\sim 20\%$ и может быть связан с влиянием восходных

явлений в магнитно-сопряженной области ионосферы. Движение линии терминатора в магнитно-сопряженной области ионосферы сопровождается возбуждением квазистатических электрических полей, что приводит к возникновению дополнительного потока фотоэлектронов, которые по магнитным силовым линиям магнитного поля Земли попадают в ночную ионосферу и дополнительно ионизируют плазму в слое *F2*.

Выявленный аномальный ход МНЧ в ночной зимней ионосфере имеет достаточно регулярный характер и должен учитываться при краткосрочном прогнозе распространения ВЧ радиоволн в ионосфере.

Литература

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М. Наука. 1988. – 527.
2. Абрамчук В.П. Некоторые особенности спорадических неоднородностей среднеширотной ионосферы в восходно-заходные периоды. Диссертация к.ф.-м.н., Москва, ИЗМИРАН. 1988.
3. Ю.Я Ружин Ю.Я., Ким В.Ю., Панченко В.А., Полиматиди В.П. Ночные спорадические слои во время восхода Солнца в магнитосопряженной ионосфере. Материалы Всероссийской открытой научной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». – Муром: Изд. – полиграфический центр МИ ВлГУ, 2019. –718 с. ISSN 2304-0297, С. 81-85.
4. Petelski E.F. Real height variations of the ionosphere F2 layer above some pairs of geomagnetically conjugate stations. - J. Atmos. Terr. Phys., 1972, v. 34, No 7, pp. 1163 - 1170.