

13. ВЛИЯНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КВ-РАДИОВОЛН НА ТРАССЕ НОРИЛЬСК- ИРКУТСК (стендовый)

Портнягина О.Ю., Полех Н.М.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

***Аннотация.** На основе данных наклонного зондирования, полученных на трассе Норильск-Иркутск в течение месячных экспериментов в сентябре 2006-2009, анализируются вариации максимальных наблюдаемых частот в различных геофизических условиях. Было получено, что в минимуме солнечной активности в спокойных геомагнитных условиях главный ионосферный провал располагается севернее средней точки трассы, и его положение не оказывает существенного влияния на величины наблюдаемых максимальных частот (МНЧ). С ростом магнитной возмущенности положение провала сдвигается к экватору, и область пониженных значений электронной концентрации охватывает северный участок трассы вплоть до средней точки. Это приводит к резкому уменьшению МНЧ вплоть до отсутствия отраженных сигналов. Область низких значений МНЧ смещается на более ранние часы в вечернем секторе и на более поздние часы - в утреннем секторе.*

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что характеристики распространения декаметровых радиосигналов в значительной степени зависят от градиента электронной концентрации вдоль трассы распространения. Одной из таких крупномасштабных неоднородностей, существующей на границе среднеширотной и высокоширотной ионосферы, является главный ионосферный провал (ГИП). Исследованию физических процессов в области ГИП посвящено огромное количество оригинальных исследований, обзор которых выполнен в ряде монографий [1-3]. Это довольно устойчивое образование представляет собой обширную область, расположенную на инвариантных широтах 52°-64°, в которой значения электронной концентрации значительно ниже по

сравнению с окружающими областями. Главный ионосферный провал может существовать длительное время, особенно в зимний период, преимущественно на ночной стороне. Он регистрируется как при низкой, так и при высокой солнечной активности. Местоположение главного ионосферного провала может изменяться в зависимости от времени суток и геомагнитной обстановки, более высокоширотное положение он занимает в послеполуденные часы, а наиболее низкоширотное - в ночные. Средняя ширина провала в спокойных условиях составляет около 10° , с ростом возмущенности ширина провала уменьшается, и положение его границ смещается к экватору. Многочисленные экспериментальные данные, полученные на трассах наклонного зондирования, проходящих через область ГИП, показали, что характеристики КВ-сигналов существенно меняются: уменьшаются величины максимальных наблюдаемых частот (МНЧ), наблюдаются дополнительные сигналы с задержками, превышающими задержки основных модов распространения [1,4-6]. Появление таких сигналов может быть обусловлено отражением от полярной стенки провала, и их уровень может быть достаточно высоким, чтобы существенно влиять на работу систем связи. Несмотря на многолетние исследования характеристик распространения КВ-радиоволн в области ГИП, интерес к подобным исследованиям не ослабевает, так как большое количество среднеширотных трасс проходит вблизи ГИП. С одной стороны, важно знать изменение параметров КВ-радиосигналов на заданной трассе, проходящей через область ГИП как в спокойных, так и в возмущенных условиях. С другой стороны, данные наклонного зондирования могут дать информацию для диагностики состояния ионосферы вдоль трассы распространения радиосигналов. В данной работе проведен анализ вариаций МНЧ на трассе Норильск-Иркутск в различных геофизических условиях.

Для анализа были использованы данные наклонного зондирования на трассе Норильск-Иркутск, полученные в течение длительных непрерывных наблюдений в сентябре 2006-2009 годов. Протяженность данной трассы около 2080км. Средняя точка трассы расположена на широте $\approx 60^\circ$. Трасса практически ориентирована в меридиональном направлении, и северный участок трассы примыкает к области ГИП. Приемо-передающие пункты оборудованы ЛЧМ - ионозондами современной конструкции [7]. Зондирование на трассе осуществлялось с интервалом 5 минут. Кроме того, для анализа были привлечены данные вертикального зондирования, полученные на станциях Норильск и Иркутск.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для анализа геофизических условий были использованы индексы солнечной активности – поток солнечного радиоизлучения на волне 10.7 см ($F_{10.7}$) в единицах

10^{-22} Вт/(Гц·м²), индексы магнитной возмущенности: планетарный Кр-индекс, индекс авроральной активности (AE) и Dst-вариации. Эти данные были получены на сайтах Мирового Центра данных по Солнечно-земной физике: <http://www.wdc.rl.ac.uk/cgi-bin/wdcc1/secure/wdccdata>, <http://www.swpc.noaa.gov/ftpdir/latest/DSD.txt>. Ниже даны краткие характеристики геофизических условий дней эксперимента.

Сентябрь 2006 года. Вариации потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$ менялись от 70.3 до 89 с среднемесячным значением 78.6. Этот месяц наблюдений характеризовался наиболее возмущенными условиями из всех рассматриваемых экспериментальных данных (Рис. 1а). Первые дни сентября наблюдалось усиление магнитной активности: планетарный индекс Кр увеличился до 4⁺ (1 сентября) и 6⁻ (4 сентября). Авроральный индекс достигал значений 600 нТ и более. Величины Dst – индекса уменьшились до –70 нТ. Это суббуревая активность сохранялась в течение 5 дней. Вторая половина месяца также характеризовалась возмущенными условиями: 18, 23-24 сентября планетарный индекс Кр возрастал до 5. Уменьшение Dst – индекса свидетельствовало о развитии умеренных бурь.

Сентябрь 2007 г. В течение этого месяца наблюдений поток радиоизлучения Солнца $F_{10.7}$ менялся незначительно и не превышал 70. В первую неделю наблюдался рост магнитной возмущенности, которая сопровождалась увеличением индекса Кр и AE (Рис.1б). Третья декада наблюдений также характеризовалась усилением магнитной активности, особенно в последние дни этого месяца, когда наблюдалась умеренная магнитная буря с минимальными величинами Dst индекса –38 нТ, при увеличении Кр-индекса до 5.

Сентябрь 2008г. Геофизические условия сентября 2008 года были близки к условиям сентября 2007 года. Индекс солнечной активности этого месяца находился на низком уровне и очень мало менялся в течение всего месяца (Рис. 1 в). Четвертого сентября началась умеренная магнитная буря с понижением Dst индекса до –50 нТ. Во время этой бури отмечалось значительное возрастание AE-индекса и рост планетарного индекса Кр до 6. Вторая половина месяца характеризовалась относительно спокойными магнитными условиями.

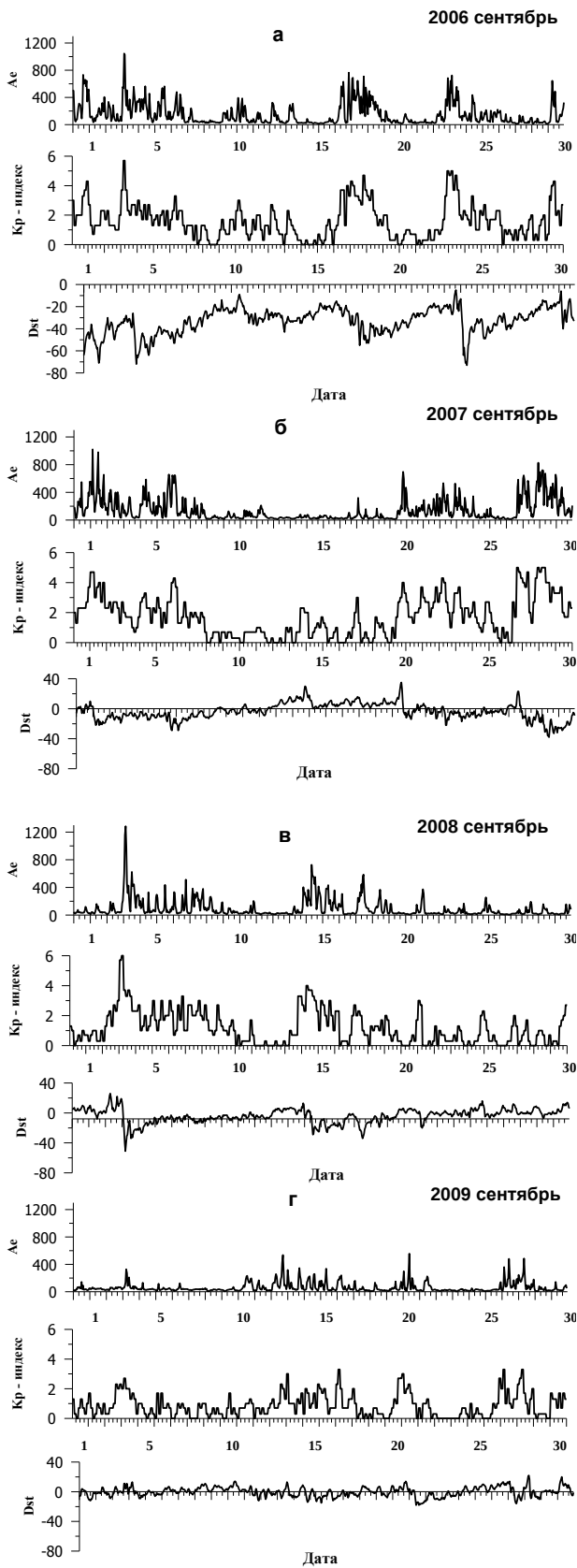


Рис. 1. Вариации индекса авральной активности (АЕ), планетарного индекса магнитной возмущенности Кр и Dst-вариаций во время наблюдений.

Сентябрь 2009г. Этот месячный цикл наблюдений можно отнести к самому спокойному периоду наблюдений. Уровень солнечной активности оставался на очень низком уровне, авроральная активность не превышала 450 нТ (Рис.1г). В течение всего месяца значения суммарного индекса K_p для всех дней не превышали 15, и только в отдельные часы его величина достигала 3+.(27-28 сентября). Вариации Dst –индекса были незначительны.

ВАРИАЦИИ МНЧ В СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ

Рис. 2 иллюстрирует изменения МНЧ в крайне спокойных условиях ($K_p \leq 1$), относящиеся примерно к середине месяца каждого года. Видно, что для всех приведенных кривых характерна большая изменчивость МНЧ. Максимальные дневные значения меняются от 13.5 до 16.5 МГц. В 2006 году эти величины выше и достигали 17-19 МГц, что связано с более высоким значением уровня солнечной активности $F_{10.7}$. Для остальных лет вариации дневных значений МНЧ отличаются незначительно. Можно отметить присутствие волнообразных возмущений различных периодов, которые наиболее выражены в дневные и переходные часы.

Минимальные значения регистрировались с 17-22 часов мирового времени (UT), что соответствует 23-04 местного времени (LT). Можно отметить крайне низкие величины МНЧ, наблюдавшиеся 13 сентября 2008 года (кривая 3). В этот день в Норильске 18 UT регистрировались также низкие значения критических частот (≤ 1.8 -1.4 МГц), что свидетельствует, что станция находилась в области ГИП. Низкие величины МНЧ в это же время указывают на то, что ГИП занимает обширную область широт, практически весь северный участок трассы, включая и среднюю точку. Отдельно следует отметить вариации МНЧ, зарегистрированные в сентябре 2009 года в очень спокойных геомагнитных условиях.

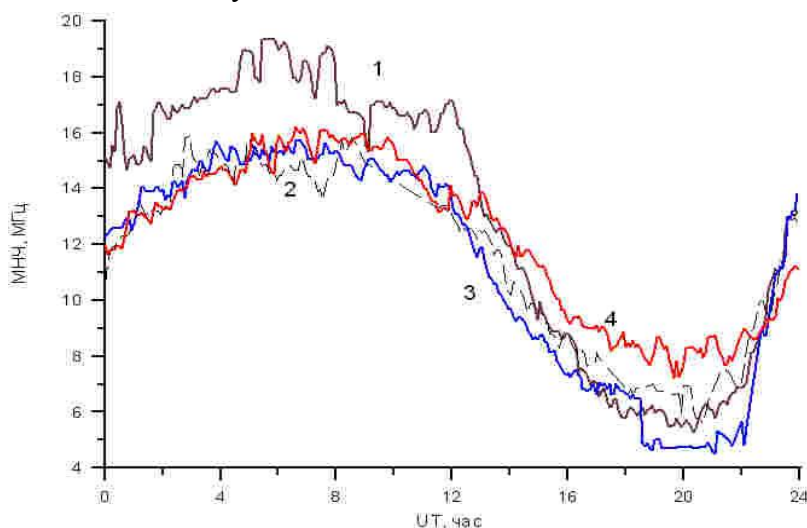


Рис.2. Вариации МНЧ в спокойных геомагнитных условиях: кривая 1 – 15.09.2006; кривая 2 – 12.09.2007; кривая 3 – 13.09.2008; кривая 4 -12.09.2009.

На Рис. 2 приведены значения МНЧ, относящиеся к 12 сентября 2009 года (кривая 4). Дневные значения незначительно отличаются от данных, полученных в 2007-2008 годах, а ночные значения значительно выше: в течение всей ночи регистрировались МНЧ, превышающие 8 МГц. Это типичная ситуация для спокойных геомагнитных условий, она наблюдалась и в другие дни при очень низких значениях планетарного индекса Кр в годы минимума солнечной активности. В Норильске в это время регистрировались спорадические экранирующие слои с частотами до 2.5-3.5 МГц, что говорит о том, что станция находилась в зоне диффузных высыпаний, ионизация в F-области была довольно низкой (< 2.5 МГц). Следовательно, что при очень спокойных геомагнитных условиях область ГИП располагается севернее средней точки трассы. Таким образом, можно отметить, что вариации МНЧ в ночных условиях имеют большой разброс даже в спокойных геомагнитных условиях.

ИЗМЕНЕНИЕ МНЧ В ВОЗМУЩЕННЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Как уже упоминалось, вариации МНЧ на исследуемой трассе очень «чувствительны» к изменению уровня магнитной активности вследствие того, что большой участок трассы расположен в области субавроральных широт. С увеличением магнитной активности границы морфологических структур (область высыпания авроральных частиц, главный ионосферный провал) смещаются к экватору. Как показали исследования ионосферных бурь в этом регионе, в утренние и дневные часы на субавроральных широтах, как правило, развиваются отрицательные ионосферные возмущения [8-9]. Изменение электронной концентрации вдоль трассы распространения определяет характер изменения МНЧ в зависимости от того, в какое время начинается возмущение.

На Рис.3а приведены изменения МНЧ на трассе Норильск-Иркутск в течение 4 последовательных суток для двух умеренных бурь. В верхней части рисунков представлены вариации Кр и АЕ индекса. Видно, что в течение первых двух суток 13-14 сентября 2006 г. геомагнитные условия были спокойными, только в конце вторых суток начинается усиление магнитной активности. Величины МНЧ 13-14 сентября в дневные часы составляли 15 -16.5 МГц, вечерние 6-7 МГц. Самые низкие значения МНЧ (~ 4.5 -5 МГц) были зарегистрированы после 18.5 UT, что соответствует послеполуночным часам местного времени. По мере развития возмущения в ночные МНЧ стали уменьшаться, самые низкие были зарегистрированы после 16 UT, что

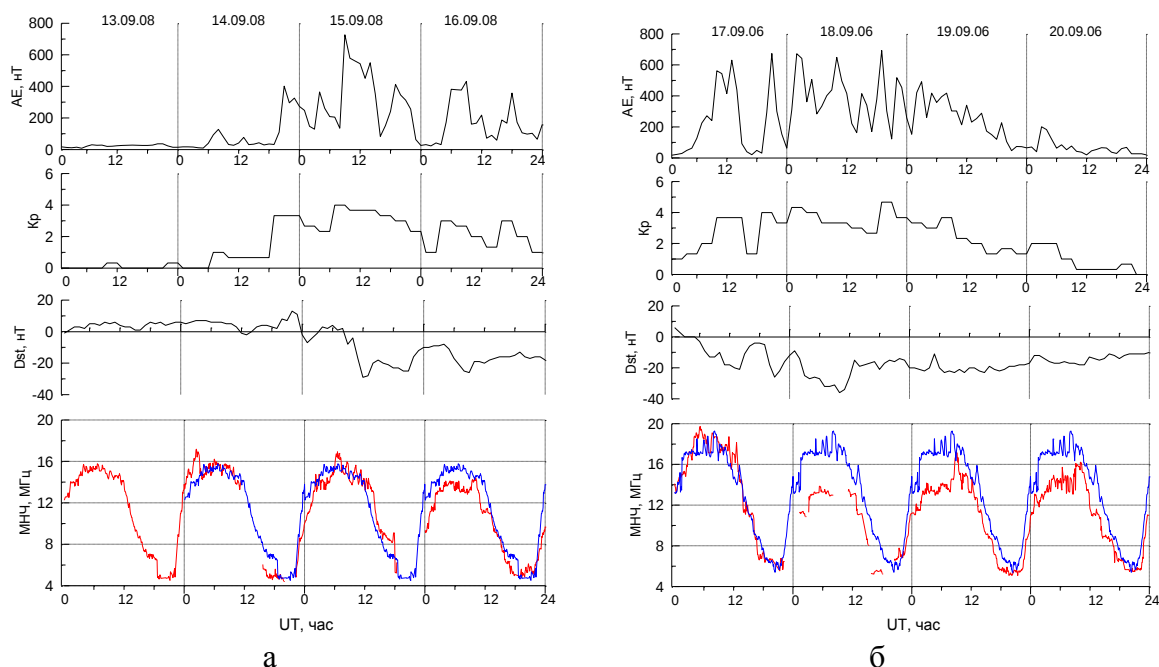


Рис.3. Временной ход геомагнитных индексов и МНЧ на трассе Норильск-Иркутск для двух уровней магнитной возмущенности : а– 13-16 сентября 2006; б – 17-20 сентября 2006 г. Красной линией отмечены текущие значения, синей линией для сравнения отмечены МНЧ, соответствующие спокойным геомагнитным условиям.

соответствует 22 LT. В последующие сутки 15 сентября в утренние часы и дневные часы МНЧ были на 2-2.5 МГц ниже, чем в предыдущие дни 13 -14 сентября. В вечернее время МНЧ резко упали, затем отражения отсутствовали до конца суток. На следующий день 16 сентября возмущение продолжилось, и пониженные МНЧ наблюдались в течение всех суток.

Таким образом, даже при умеренных магнитных бурях наблюдаются крайне низкие величины электронной концентрации, что приводит к исчезновению принимаемых сигналов.

Несколько иное развитие возмущения наблюдалось во время умеренной бури 17-20 сентября 2006 г., примерно равной интенсивности, но отличающейся временем начала магнитной бури. Видно, что рост Kp и AE 17 сентября не вызвал заметного изменения МНЧ, зато на следующий день 18 сентября дневные величины МНЧ уменьшились на 4-5 МГц. В последующие сутки значения МНЧ медленно восстанавливались до невозмущенного уровня, но в течение всех суток были ниже, чем накануне бури 16 сентября (спокойный невозмущенный уровень).

Как и предыдущем случае, наблюдалось уменьшение МНЧ в утреннее и дневное время, смещение самых низких величин МНЧ на более ранние часы. Кроме того, отмечается значительные колебания МНЧ разной амплитуды и периодичности.

ИЗМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА

Как показано в предыдущих разделах, минимальные значения МНЧ (< 5 МГц) наблюдаются во временном интервале 17-22 UT. Согласно методике, приведенной в [10], такие низкие значения МНЧ соответствуют критической частоте в средней точке трассы ≤ 2 МГц. Вариации таких низких частот в утренние и вечерние часы аналогичны изменениям критических частот, наблюдаемых в области главного ионосферного провала в этом долготном секторе [11]. Как было показано, в осенне-зимний период в годы минимума солнечной активности на большой территории субавроральных широт, включая Подкаменную Тунгуску (станции, расположенной вблизи средней точки трассы Норильск-Иркутск), существует обширная зона пониженных значений электронной концентрации. Следовательно, появление таких низких величин МНЧ в суточном ходе может служить признаком нахождения трассы в области главного ионосферного провала, и интервал их регистрации определяет время нахождения трассы в области ГИП. Так как зондирование на наклонной трассе осуществлялось с интервалом 5 минут, то интервал регистрации таких значений определялся с этой точностью. Из всей совокупности экспериментальных данных были выбраны МНЧ, значения которых не превышали 5 МГц, и построены зависимости времени их появления от вариаций аврорального индекса АЕ для вечернего и утреннего секторов (Рис. 4). Следует отметить, что при значительных вариациях АЕ отражения радиосигналов на этой трассе в вечерние и ночные часы часто отсутствуют [12].

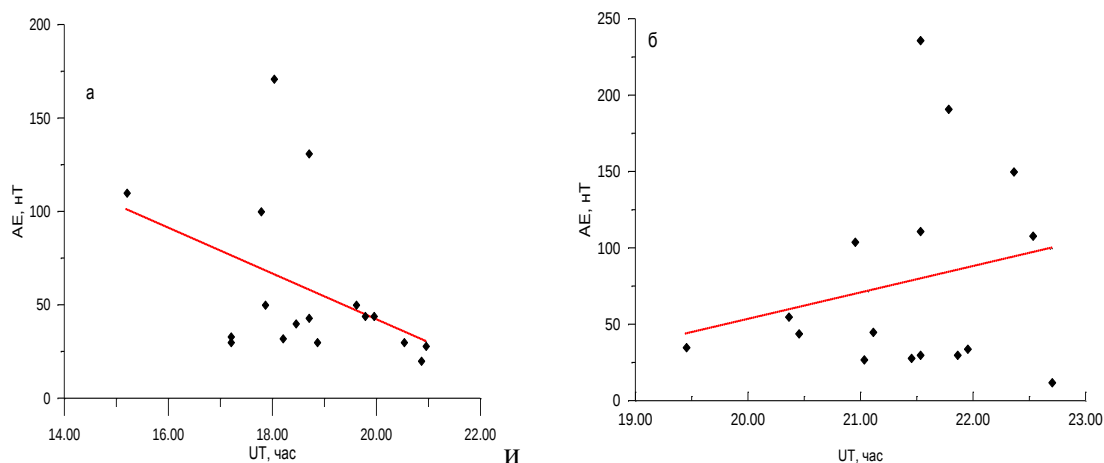


Рис.4. Зависимость появления низких МНЧ от аврорального индекса АЕ: а – вечерний сектор; б – утренний сектор.

Из этого рисунка следует, что при низких значениях АЕ трасса находится в области главного ионосферного провала с 23-до 04 часов местного времени. С ростом магнитной возмущенности время нахождения трассы в области ГИП смещается на более ранние часы в вечернее время, и на более поздние – утром.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ максимальных наблюдаемых частот, полученных в течение продолжительных экспериментов в сентябре 2006-2009 гг. на меридиональной трассе Норильск-Иркутск, позволил сделать следующие выводы:

1. В годы минимальной солнечной активности в равноденствие при очень спокойных геомагнитных условиях в вечерние и ночные часы область главного ионосферного провала располагается вблизи передающего пункта, Величины МНЧ в это время находятся в диапазоне 7-8 МГц и определяются уменьшением ионизации в вечернее время.

2. Увеличение магнитной активности сопровождается развитием отрицательных возмущений в ионосфере в утренние и дневные часы, в результате дневные МНЧ уменьшаются. В вечерние и ночные часы рост магнитной активности приводит к смещению границ ГИП, появлению резких градиентов ионизации вдоль трассы распространения радиосигнала и в конечном итоге – к резкому уменьшению МНЧ и к отсутствию принимаемых сигналов в вечерние и ночные часы. Это является признаком того, что граница ГИП располагается вблизи средней точки трассы.

3. Во время слабых бурь трасса находится в области главного ионосферного провала с 23-до 04 часов местного времени. С ростом магнитной возмущенности время вхождения трассы в ГИП смещается на более ранние часы в вечернее время и на более поздние – утром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.В. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов, М.:Наука, 1987, 272 с.
2. Жеребцов Г.А., Мизун Ю.Г., Мингалев В.С. Физические процессы в полярной ионосфере, М.: Наука, 1988, 232 с.
3. Мизун Ю.Г. Полярная ионосфера, Ленинград: Наука, 1980, 216 с.

4. Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Смирнов В.Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования //Солнечно-земная физика, 2004, вып. 5, С. 124-127.
5. Урядов В.И., Куркин В.И., Ветроградов В.Г., Понятов А.А., Пономарчук С.Н. Особенности распространения КВ сигналов на среднеширотных трассах в условиях геомагнитных возмущений // Известия вузов. Радиофизика.2004.- Т.47.- № 12, с.1041-1054.
6. Kurkin V.I., Matyushonok S.M., Pirog O.M., Poddelsky I.N., Ponomarchuk S.N., Rozanov S.V., Smirnov V.F. Dynamics of the auroral oval and ionospheric trough boundaries according to data from the DMSP satellites and ground-based ionosonde network// Advances in Space Research, 2006. –Vol. 38, Issue 3. –P.1772-1777.
7. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В. ЛЧМ-иозонд и его применение в ионосферных измерениях // Известия вузов. Радиофизика.2003.-Т.46.- №11.- С. 919-952.
8. Куркин В.И., Пирог О.М., Полех Н.М., Тащилин А.В., Шпынев Б.Г., Кручинина М.А., Смирнов В.Ф. Комплексные исследования ионосферных эффектов геомагнитных бурь в Северо-восточном регионе России //Труды XX Всероссийской конференции по распространению радиоволн, Нижний Новгород, 2-4 июля 2002 г., Нижний Новгород, 2002.- С. 62-63.
9. Пирог О.М., Полех Н.М., Чистякова Л.В., Зикрач Э.К. Исследование эффектов магнитных бурь в Азиатско-Тихоокеанском регионе //Геомагнетизм и аэрономия //Геомагнетизм и аэрономия, 2001.- Т.41.- №1.- С.65-75.
10. Ким А.Г., Котович Г.В., Михайлов С.Я., Грозов В.П., Михайлов Я.С. Определение критической частоты foF2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэрономия, 2006. –Т.46, № 4. –С.547-551.
11. Жеребцов Г.А., Пирог О.М., Разуваев О.И. Структура и динамика высокоширотной ионосферы //Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца, 1986, вып. 76.-С. 165-177.
12. Куркин В.И., Полех Н.М., Пирог О.М., Поддельский И.Н., Степанов А.Е. Ионосферные возмущения в в северо-восточном регионе России по данным иозондов в периоды равноденствия // Космические исследования, 2008. – Т.46.- № 4. – С.348-355.