

Препринт № 493

**ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ
НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ
ГЛАВНОГО ПРОВАЛА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ
НА СУБАВРОРАЛЬНОЙ И СРЕДНЕШИРОТНОЙ ТРАССАХ**

**Урядов В.П.
Понятов А.А.**

Нижний Новгород 2004

Урядов В.П., Понятов А.А.

ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНОЙ СТРУКТУРЫ ГЛАВНОГО ПРОВАЛА ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА СУБАВРОРАЛЬНОЙ И СРЕДНЕШИРОТНОЙ ТРАССАХ

Препринт № 493 – Нижний Новгород: НИРФИ, 2004 – 20с.

УДК 550.388.2

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей распространения КВ сигналов при ЛЧМ зондировании ионосферы на среднеширотной Хабаровск – Н.Новгород и субполярной Магадан – Н.Новгород трассах. Проведены измерения пространственной корреляции МНЧ. Проведен анализ характеристик сигналов в зависимости от ориентации трасс относительно ионосферного провала. Показано, что в 20 – 02^h мск трасса Магадан – Н.Новгород проходит вблизи северной стенки провала, а трасса Хабаровск – Н.Новгород – вблизи южной стенки. В это время на среднеширотной трассе распространение радиоволн осуществлялось стандартным скачковым способом, а на субавроральной трассе – посредством верхнего (педерсеновского) луча. Диффузность сигнала на трассе Магадан – Н.Новгород примерно в 2-3 раза превышает диффузность сигнала на трассе Хабаровск – Н.Новгород. Проведено сопоставление экспериментальных данных с результатами численного моделирования диффузности сигнала, обусловленной рассеянием радиоволн на ориентированных вдоль магнитного поля ионосферных неоднородностей, расположенных вблизи южной границы аврорального овала. Показано, что эффекты, наблюдаемые на ионограммах наклонного зондирования, связанные с рассеянием радиоволн и проявляемые различным образом на характеристиках КВ сигналов на субавроральной и среднеширотной трассах, позволяют прогнозировать неоднородную структуру главного ионосферного провала в различных геофизических условиях и могут быть использованы для прогнозирования условий КВ радиосвязи в высокоширотных районах.

Введение

Для обеспечения надежной работы радиоэлектронных систем различного назначения требуется диагностика среды распространения и заблаговременное прогнозирование ее состояния. Метод наклонного зондирования ионосферы на сети радиолиний позволяет прогнозировать высокоширотные явления, оказывающие существенное влияние на распространение радиоволн. С помощью такой сети трасс можно обнаруживать развитие возмущений, получать сведения о состоянии ионосферного канала, оценивать его на ближайшее время и экстраполировать на соседние радиолинии не оснащенные средствами диагностики. Эти меры являются необходимыми для прогнозирования условий КВ радиосвязи, загоризонтной КВ радиолокации, пеленгации и радионавигации, особенно во время геомагнитных возмущений. Несмотря на важность этой проблемы, задача прогнозирования распространения радиоволн в высоких широтах далека до завершения. Это связано как с многообразием и сложностью физических процессов в высокоширотной ионосфере, так и с трудностью организации и проведения исследований в высоких широтах.

Пространственно-временное распределение электронной концентрации в высокоширотной ионосфере во многом определяется магнитосферно-ионосферным взаимодействием. В высоких широтах важным фактором ионизации ионосферы, наряду с ультрафиолетовым излучением Солнца, является высыпание энергичных частиц. При взаимодействии энергичных частиц с ионосферой и высокими слоями атмосферы наблюдается целый ряд сложных геофизических явлений. Это полярные сияния, локальные электрические поля, формирование неоднородностей электронной концентрации различных масштабов и другие явления. В пространственно-временном распределении электронной концентрации высокоширотной ионосферы важную роль играют такие факторы, как

электрическое поле магнитосферной конвекции, нагрев ионосферы заряженными частицами и другие процессы.

Среднеширотный или главный провал ионизации в ионосфере является одним из проявлений магнитосферно-ионосферных связей. Ионосферный провал представляет собой кольцеобразную область пониженной электронной концентрации, наиболее ярко выраженную в ночное время зимой и в период равноденствия [1].

Интерес к исследованию ионосферного провала обусловлен тем обстоятельством, что провал граничит со среднеширотной ионосферой где пролегают основные каналы ДКМВ радиосвязи и смещение провала на более низкие широты во время магнитных бурь может приводить к нежелательным эффектам уменьшения максимально наблюдаемой частоты (МНЧ) и изменения модовой структуры сигнала.

В свою очередь, ионосферные неоднородности различных масштабов, генерируемые вблизи южной границы аврорального овала, приводят к увеличению диффузности сигналов стандартных мод распространения и появлению аномальных сигналов с задержками, значительно превышающими задержки основных мод, распространяющихся вдоль дуги большого круга. Уровень таких сигналов достаточно высок, и они оказывают существенное влияние на работу систем связи, загоризонтной КВ радиолокации, радиопеленгации, радионавигации [2,3]. С другой стороны, присутствие дополнительных сигналов на ионограммах наклонного зондирования на среднеширотных трассах в период возмущений может быть использовано для позиционирования границ главного ионосферного провала и диагностики мелкомасштабных ионосферных неоднородностей, сосредоточенных вблизи южной границы аврорального овала.

В настоящей работе на базе данных, полученных на субавроральной и среднеширотной трассах, проанализированы особенности распространения КВ сигналов на таких трассах с позиций диагностики и прогнозирования неоднородной структуры ионосферного провала электронной концентрации.

Морфология среднеширотного ионосферного провала

Согласно проведенным исследованиям, статистический центр среднеширотного ионосферного провала расположен возле проекции на ионосферу экваториальной плазмопаузы [4]. Важная особенность провала состоит в том, что, хотя провал представляет собой крупномасштабное образование, он подвержен сильным динамическим вариациям, как в пространстве, так и во времени и чувствителен к геомагнитной активности. Рост геомагнитной активности приводит к более быстрому смещению провала в экваториальном направлении, резкому росту горизонтального градиента ионизации на южной и особенно на северной границах провала, усилению турбулизации на стенках провала [4,5].

Эмпирическое выражение для инвариантной широты провала на поверхности Земли для различного уровня магнитной активности и различного местного времени имеет вид [6]

$$\Lambda_T = 65.2^\circ - 2.1 K_p - 0.5t \pm 2^\circ$$

K_p – величина планетарного индекса геомагнитной активности во время наблюдений, t – число часов от локальной полуночи в пределах от -5 до 5 час.

Схематически диаграмма среднеширотного провала показана на рис.1. Она охватывает три области: экваториальный край, который сильно варьируется и простирается в среднеширотную ионосферу; минимум провала, где плазменная частота достигает минимального значения, и полярный край. Последняя – это область повышенной электронной концентрации, как результат высыпания частиц, которая часто совпадает с южной границей аврорального овала. Диапазон частотного рассеяния ($F_s\text{spread}$) от полярного края провала значительно больше, чем от минимума провала или от экваториального края. Полюсный край провала в предполуночном секторе ($18^h < \text{MLT} < 24^h$) может быть определен по формуле

$$\Lambda_T = 19.2 + 0.35 K_p^2 + 0.17 K_p^2 + (1.3 + 2.56 K_p^2 - 0.34 K_p^2) \cdot \cos(\text{MLT}) \pm 0.13^\circ$$

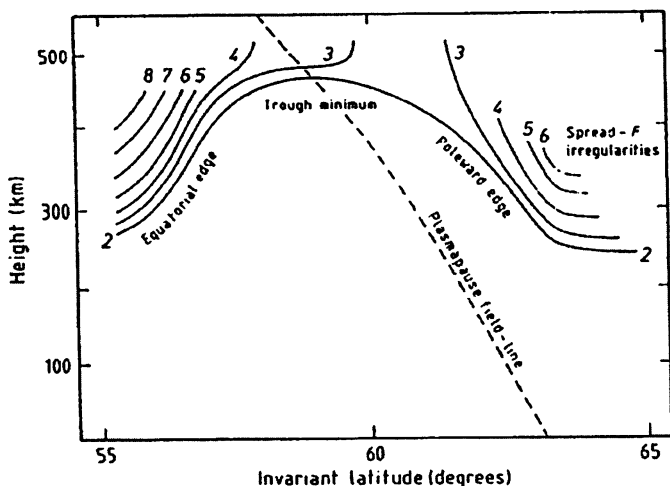


Рис.1 Схематический вид среднеширотного провала в окрестности Halley Bay [7]. Цифрами около кривых изолиний указаны плазменные частоты в мегагерцах. Показан ход силовой линии магнитного поля через статистически среднее положение плазмопаузы

Среднеширотный провал характеризуется наличием градиентов плотности, которые приводят к плазменным неустойчивостям. Согласно данным радара в Goose Bay [8], область источника неоднородностей, ответственных за рассеяние в сумеречной зоне, лежит в интервале магнитных широт, связанных со среднеширотным провалом. По данным спутниковых и радарных измерений известно, что неоднородности высокоширотной ионосферы вблизи экваториального края овала, ответственные за мерцания и обратное рассеяние, часто встречаются в широтно-ограниченных областях протяженностью порядка 100 км, и эти области с неоднородностями часто пространственно коррелируют с

100–километровыми областями увеличения плотности плазмы, называемых пэтчами. Градиенты, связанные с крупномасштабными неоднородностями, порождают спектр неоднородностей через каскадный процесс [9]. О связи мелкомасштабных неоднородностей с широким спектром неоднородностей указывается в работе [10].

Метровые неоднородности должны пространственно совпадать с доминирующей областью источника неоднородностей. Это следует из того, что м-неоднородности диссипируют в течение нескольких секунд и не могут конвектировать на значительные расстояния от источника генерации. Поэтому морфология м-неоднородностей может интерпретироваться как область источника неоднородностей [11].

Slater et al. [12] показали, что южная граница диффузной авроры пространственно коррелирует с низкоэнергичными ($E < 1 \text{ keV}$) высыпавшимися электронами и северной границей провала. С другой стороны, Weber et al. [13] моделировали измерения высыпания электронов и протонов и заключили, что высыпание было слишком слабым для объяснения наблюдаемой ионизации. Эти результаты позволяют заключить, что высыпание вдоль южной авроральной границы может быть перемежающимся, но иногда интенсивность высыпания достаточна для обеспечения вклада в ионизацию граничных пэтчей.

Особенности распространения радиоволн на субавроральной и среднеширотной трассах наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы

Большинство КВ радиотрасс, расположенных на широтах 50–70°, подвержено в определенных условиях воздействию ионосферного провала. Поэтому изучение влияния провала на прохождение сигналов на субавроральных трассах и прогнозирование поведения провала по данным наклонного зондирования имеют важное научное и прикладное значение.

К настоящему времени достаточно подробно исследованы зависимости положения и ширины провала от геомагнитной активности, местного времени, сезона. Вместе с тем, вопросы влияния провала на распространение радиоволн изучены в меньшей степени. Во время расположения трасс в зоне провала создаются сложные условия для распространения КВ сигналов. В этой связи значительный интерес представляют результаты исследования характеристик сигналов наклонного зондирования на трассах пересекающих ионосферный провал.

Как уже говорилось, результаты радарных наблюдений, данные о мерцаниях сигналов ИСЗ и непосредственные зондовые измерения электронной концентрации со спутников свидетельствуют о наличии на северной границе провала интенсивных неоднородностей. Сочетание интенсивных мелко- и крупномасштабных неоднородностей приводит к сложной картине распространения, вызывая фокусировку/дефокусировку сигналов, вариации углов прихода, рассеяние радиоволн, смену механизмов распространения и другие эффекты. С одной стороны, рассеяние радиоволн на неоднородностях приводит к многолучевости, интерференции и, как следствие, к замиранию, диффузности и ослаблению сигналов. С другой стороны, рассеяние может являться одним из механизмов возбуждения ИВК и способствовать реализации аномальных мод на высокоширотных трассах большой протяженности, пересекающих области с интенсивными ионосферными неоднородностями. Например, такой эффект наблюдался на трансэкваториальной трассе Алис Спрингс (Австралия) – Н.Новгород, когда радиоволны, захваченные в ионосферный волновод в результате рефракции в области с отрицательным градиентом электронной концентрации, выводились из канала за счет рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях субавроральной ионосферы [14].

На протяженных среднеширотных и высокоширотных трассах сигналы, связанные с рассеянием, могут играть важную роль для связи. Например, во время возмущений прямой сигнал ослабевает в результате увеличения потерь на поглощение, в то

время как интенсивность неоднородностей растет и возрастает интенсивность “бокового” рассеянного сигнала. В некоторых случаях, однако, “боковая” мода скорее недостаток, чем преимущество. Сильные “боковые” сигналы могут значительно снижать точность локации прямых сигналов. На трансполярных трассах максимальная наблюдаемая частота (МНЧ) такого “бокового” сигнала может быть выше, чем МНЧ прямого сигнала.

На характеристики КВ сигналов существенное влияние оказывают крупномасштабные неоднородности, определяя в ряде случаев механизм формирования поля принимаемого сигнала. Например, дифракция квазикритических лучей на вытянутых вдоль слоя крупномасштабных неоднородностях может приводить к эффекту стабилизации неустойчивых лучей (моды Педерсена), распространяющихся в окрестности минимума диэлектрической проницаемости и их усилению [15]. Необходимо заметить, что на протяженных трансполярных радиопутьях в условиях развитой неоднородной структуры выделить указанные выше эффекты достаточно сложно. Продвинуться в данном вопросе удалось, используя российскую сеть ЛЧМ ионозондов. Геометрия расположения ЛЧМ ионозондов позволяет исследовать влияние неоднородностей высокоширотной ионосферы на характеристики КВ сигналов на радиопутьях в евроазиатском долготном секторе. Согласно многочисленным измерениям (см., например, [11] и цитируемую там литературу) граница интенсивных неоднородностей, отделяющая ионосферу высоких широт от более регулярной среднеширотной ионосферы, в среднем совпадает с экваториальной границей аврорального овала и проходит вблизи северной стенки главного ионосферного провала. Северная граница провала характеризуется большим градиентом электронной концентрации (распределение последней имеет вид «утеса»). Градиенты и дрейфы, связанные с провалом, обуславливают образование источников энергии для роста неоднородностей через процессы плазменных неустойчивостей. Одновременные

наблюдения на различных трассах, в различных геофизических условиях позволили выделить характерные моды, в том числе на трассах, пересекающих терминатор и ионосферный провал, и оценить влияние градиентов ионизации и мелкомасштабной турбулентности на параметры сигнала. .

С другой стороны, наблюдения с помощью НЗ на субавроральной и среднеширотной трассах показывают возможность определения положения и динамики северной границы провала. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования распространения радиоволн на высокоширотных радиопутьях КВ радиосвязи.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные по сравнению характеристик КВ сигналов на среднеширотной трассе Хабаровск – Н.Новгород и субавроральной трассе Магадан – Н.Новгород и проведено сопоставление с результатами моделирования.

Эксперимент и моделирование

Наблюдения проводились в ноябре, декабре 1998г., феврале, марте и мае 1999г. на трассах ЛЧМ зондирования Магадан – Н.Новгород и Хабаровск – Н.Новгород. В данной статье основное внимание будет уделено исследованию влияния главного ионосферного провала (ГИП) на характеристики КВ сигналов на этих трассах. Трассы Магадан – Н.Новгород и Хабаровск – Н.Новгород близки по протяженности (~ 5900 км), но различным образом ориентированы относительно ГИП. Положение трасс относительно провала для различного времени суток при разных индексах магнитной активности K_p схематически показано на рис.2. Положение провала рассчитано по модели [16]. Двойной штриховкой отмечено дно провала. По данным зондирования определялись МНЧ, ННЧ различных мод сигнала, степень их диффузности, диапазон частот моды Педерсена, наличие отражений от E_s , амплитудные характеристики и другие параметры.

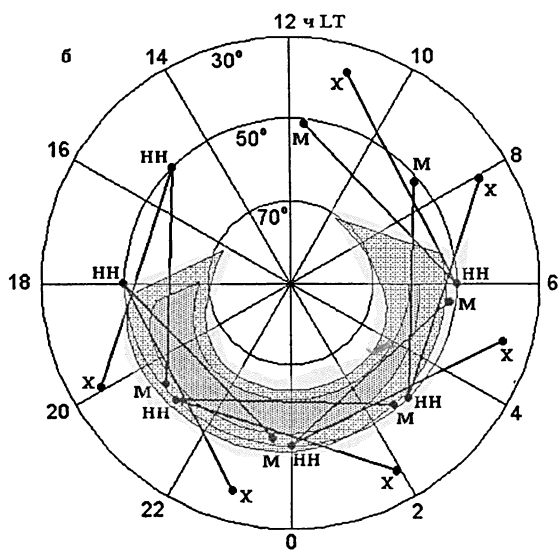
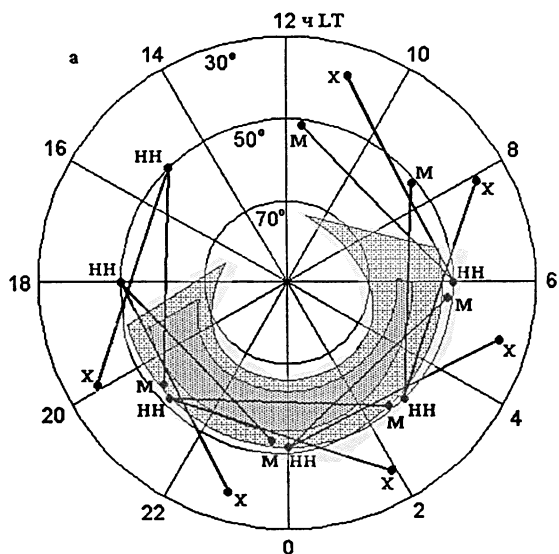


Рис.2 Геометрия трасс Хабаровск – Н.Новгород и Магадан – Н.Новгород относительно среднеширотного провала, представленного в геомагнитных координатах (а – $K_p = 1$, б – $K_p = 3$)

Важную информацию о динамике ионосферных процессов

дают измерения пространственно-временных корреляционных связей характеристик КВ сигналов в различных геофизических условиях. Согласно полученным данным в дневные часы 07 – 14^h мск поведение МНЧ на двух трассах хорошо коррелирует. В спокойные дни с $K_p \leq 2$ для всех сезонов пространственный коэффициент корреляции МНЧ достаточно высокий и составляет величину порядка 0.75–0.95. С ростом магнитной возмущенности наблюдается тенденция уменьшения корреляции до значений 0.65–0.82. В переходное время суток 15–19^h мск, а также в вечерние и ночные 20–02^h мск корреляция МНЧ заметно падает, а в некоторых случаях даже меняет знак. В это время субполярная трасса Магадан - Н.Новгород пересекает провал и на характеристики сигнала существенное влияние оказывают градиенты ионизации и турбулентность на стенках провала. Поэтому уменьшение корреляции и смена ее знака может указывать на различные механизмы формирования поля сигнала на субполярной и среднеширотной трассах.

Подтверждением такого предположения могут служить результаты наблюдений модовой структуры сигналов. На трассе Магадан – Н.Новгород структура сигнала заметно изменяется при прохождении области провала. В дневные часы 07–14^h мск, когда трасса Магадан – Н.Новгород лежит вне провала (см рис.2), распространение КВ осуществлялось стандартным скачковым способом. С попаданием трассы в зону провала (примерно с 14–15^h мск) происходило резкое уменьшение МНЧ (за счет уменьшения электронной плотности в области провала). В то же время на среднеширотной трассе Хабаровск – Н.Новгород такого резкого перепада нет, хотя также имело место уменьшение МНЧ, связанное с общим суточным ходом критических частот. С переходом к вечерним часам, начиная с 19–20^h мск и до ~ 02 мск характер сигнала на трассе Магадан – Н.Новгород заметно изменялся. При этом возрастала роль педерсеновского механизма распространения, сигнал становился диффузным. В это время трасса проходила вблизи северной стенки провала, для которого характерен резкий градиент

критической частоты foF2 типа "утеса" [2]. Характерные примеры ионограмм на трассе Магадан – Н.Новгород в вечерние

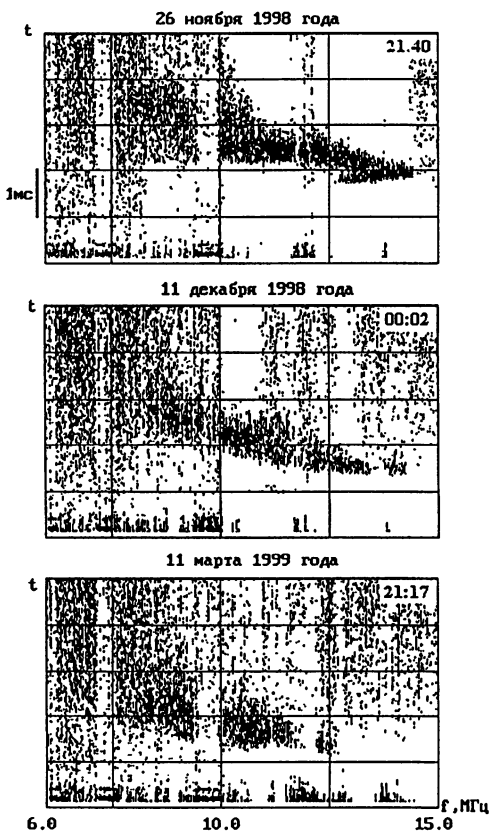


Рис.3 Типичные примеры ионограмм наклонного зондирования, зарегистрированные в вечерние и ночные часы на трассе Магадан – Н.Новгород в различные сезоны наблюдений

часы для различных сезонов показаны на рис.3. Из рисунков видно, что распространение радиоволн осуществлялось на данной трассе посредством верхнего (педерсеновского) луча с сильно выраженной диффузностью.

Известно, что диффузность сигнала определяется многолучевостью, вызванной рассеянием радиоволн на среднemasштабных неоднородностях и рефракционным

рассеянием на крупномасштабных неоднородностях. Диффузность сигнала может служить индикатором интенсивности неоднородностей, и этот фактор можно использовать для прогнозирования неоднородной структуры на трассе распространения. Мы провели анализ степени диффузности принимаемого сигнала (уширения времени групповой задержки) для мода с наименьшей кратностью. Суточный ход данных по диффузности сигнала для обеих трасс показан на рис.4. Здесь объединены данные, полученные в сезоны 98–99 гг. Из рисунка видно, что диффузность сигналов минимальна в предполуденные и полуденные часы 07–14^h мск и составляет в среднем величину порядка 0.18 мс. В вечерние, ночные и утренние часы диффузность возрастает на обеих трассах. Эффект более сильно выражен на трассе Магадан – Н.Новгород, где уширение групповой задержки достигает

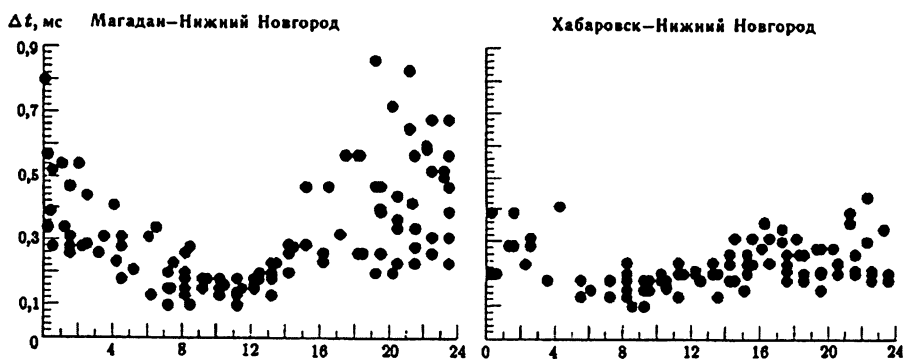


Рис.4 Суточный ход диффузности сигналов на субавроральной (Магадан – Н.Новгород) и среднеширотной (Хабаровск – Н.Новгород) трассах. По горизонтальной оси отложено местное время в точке приема (мск) в часах величины порядка 0.5-0.7 мс. Чтобы оценить влияние геомагнитной возмущенности на величину диффузности сигнала, данные были разделены на две группы, полученные в спокойных условиях ($K_p \leq 2$) и во время магнитных возмущений ($K_p \geq 3$). Эти данные для интервалов времени 07–14^h мск и 14–

07^h мск приведены в виде гистограмм на рис.5. Как можно видеть из рисунка, в дневные часы зависимость диффузности сигнала от K_p индекса выражена слабо как на среднеширотной, так и на субавроральной трассах. В вечерние и ночные часы имеется довольно четкая зависимость: с ростом K_p диффузность увеличивается. На среднеширотной трассе Хабаровск – Н.Новгород диффузность сигнала возрастает от значений ~ 0.15 – 0.25 мс в спокойных условиях до значений \sim

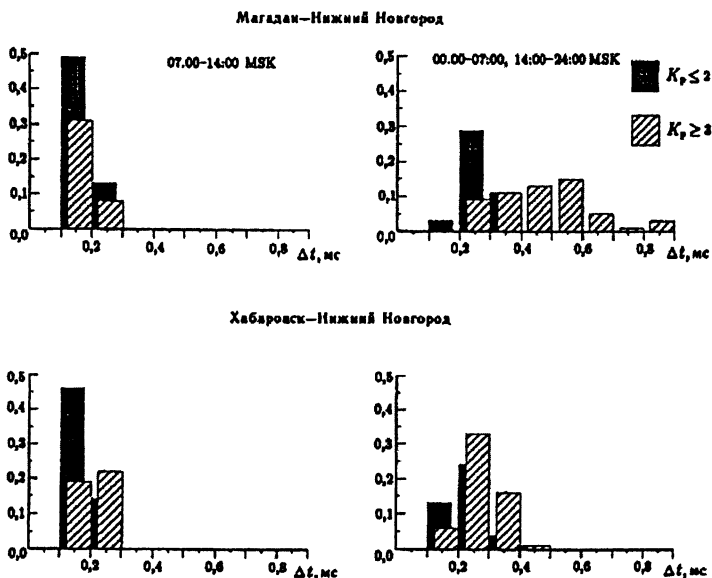


Рис.5 Гистограммы распределения диффузности сигналов для спокойных ($K_p \leq 2$) и возмущенных ($K_p \geq 3$) условий на среднеширотной и субавроральной трассах наклонного зондирования ионосферы

0.25–0.35 мс во время возмущений. На субавроральной трассе Магадан – Н.Новгород эффект более сильный: диффузность сигнала возрастает от значений ~ 0.25 – 0.3 мс в спокойных условиях до значений ~ 0.45 – 0.55 мс во время возмущений, что свидетельствует о более развитой турбулентности в окрестности

северной границы провала.

Согласно современным представлениям [11], вблизи экваториального края аврорального овала на границе с северной стенкой ионосферного провала существуют структурированные области с размерами около 100 км с резким горизонтальным градиентом электронной концентрации (так называемые пэтчи), являющиеся источником широкого спектра неоднородностей, ответственных за мерцания и обратное рассеяние сигналов высокоширотных КВ радаров. Мы полагаем, что диффузность сигнала обусловлена рассеянием радиоволн на интенсивных неоднородностях, существующих внутри таких структур. В пользу этого предположения свидетельствует уменьшение диффузности сигнала в дневные часы, что согласуется с ослаблением эффекта рассеяния КВ сигналов на таких неоднородностях в дневные часы в высокоширотной ионосфере, когда распределение плотности плазмы обусловлено преимущественно фотоионизацией, которая подавляет процесс формирования неоднородностей, уменьшая градиенты электронной концентрации [17].

Мы провели численное моделирование влияния рассеяния радиоволн на ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях на диффузность сигнала на трассе Магадан – Н.Новгород. Моделировалось распространение радиоволн на участке трассы, протяженностью 2000 км, прилегающей к северной границе провала (второй скачок моды 3F2, наиболее типичной для данной трассы). Область с неоднородностями задавалась на южной границе аврорального овала в виде диска радиуса 75 км на высотах F-слоя ионосферы, заполненного ориентированными вдоль магнитного поля неоднородностями с поперечными размерами l_{\perp} , определяемыми из брэгговского условия $l_{\perp} = \lambda/2\sin\theta/2$, где λ – длина волны, θ – угол рассеяния. Проекция центра диска на поверхность Земли имела следующие координаты: долгота $\Lambda = 110^{\circ}$, широта $\varphi = 70^{\circ}$ ($\varphi_{\text{магн}} = 65^{\circ}$). Для условий эксперимента ($f = 8\text{--}10$ МГц, $\theta \sim 10\text{--}15^{\circ}$) получаем $l_{\perp} \sim 100\text{--}150$ м. Результаты моделирования для ночных условий (04^h мск) представлены на рис.6. Здесь показаны синтезированная

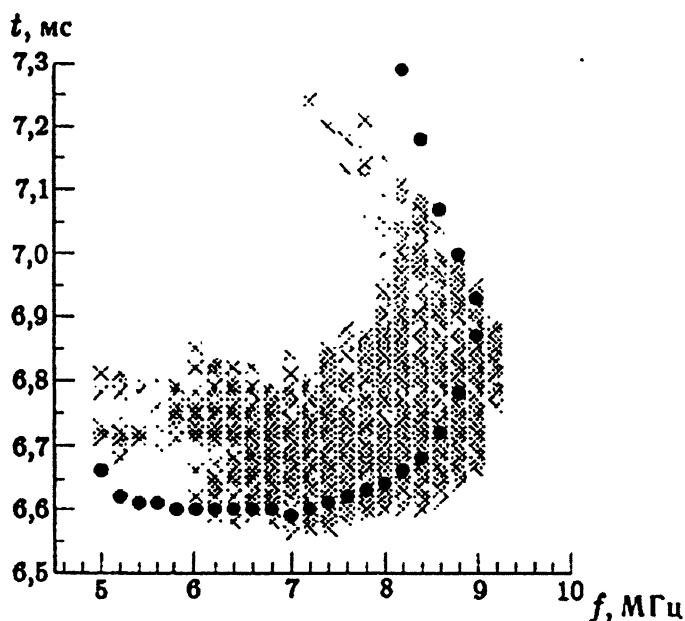


Рис.6. Синтезированные ионограммы для участка субавроральной трассы Магадан – Н.Новгород, прилегающей к северной границе провала, в спокойной ионосфере (точки) и с учетом рассеяния на ориентированных вдоль магнитного поля мелкомасштабных неоднородностях авроральной зоны (крестики)

ионограмма для спокойной ионосферы (точки) и ионограмма, рассчитанная с учетом рассеяния радиоволн на ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях аврорального овала (крестики). Видно, что рассеяние приводит к уширению следа во всей полосе частот, что в большинстве случаев наблюдается и в эксперименте. При этом рассчитанная диффузность сигнала (примерно 0.35–0.5 мс) хорошо согласуется с экспериментальными данными (см. рис.4,5). Таким образом, рассеяние радиоволн на ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях авроральной зоны, по всей вероятности, является одним из основных факторов, ответственных за диффузность КВ сигналов на трансполярных трассах.

Заключение

Одновременные наблюдения характеристик КВ сигналов в широкой полосе частот зондирования на субавроральной и среднеширотной трассах, проходящих вблизи северной и южной границ ионосферного провала, позволяют исследовать динамику границ провала, оценить степень его турбулизации в различных геофизических условиях. Кроме того, такие наблюдения дают возможность измерять пространственную корреляцию основных параметров ионосферного КВ канала, являющуюся критерием устойчивости ионосферы. Результаты измерений пространственной корреляции, например МНЧ, как наиболее важного параметра канала, могут быть использованы для экстраполяции МНЧ с контрольной трассы на соседние радиополосы, не оснащенные средствами диагностики.

Согласно полученным данным о характеристиках КВ сигнала на субавроральной трассе, ионосфера на северной стенке провала заметно более турбулизована по сравнению с ионосферной плазмой в окрестности южной границы провала. Эти результаты согласуются с радарными измерениями в высокоширотной ионосфере [5]. Наблюдаемая величина диффузности сигнала хорошо объясняется, если учесть рассеяние радиоволн на ориентированных вдоль магнитного поля неоднородностях, расположенных на южной границе аврорального овала, где существуют пэтки с резкими границами, содержащие неоднородности широкого спектра масштабов от долей метра до десятков километров [10]. Кроме того, следует иметь в виду, что наличие в авроральной области пэчек с размерами больше зоны Френеля с сильными горизонтальными градиентами электронной концентрации может приводить к многолучевости и уширению сигнала за счет бокового отражения на таких крупномасштабных структурах.

Таким образом, экспериментально и теоретически показано, что диффузность сигналов наклонного зондирования связана с рассеянием радиоволн и различным образом проявляется на характеристиках КВ сигналов на субавроральной и

среднеширотной трассах. Полученные результаты позволяют прогнозировать неоднородную структуру главного ионосферного провала в различных геофизических условиях и могут быть использованы для прогнозирования условий КВ радиосвязи в высокоширотных районах.

Работа выполнялась при поддержке РФФИ, грант № 02-05-64383.

ЛИТЕРАТУРА

1. Moffet R.J., Quegan S. The mid-latitude trough in the electron concentration of the ionosphere F-layer: a review of observations and modelling // *J.Atm.Terr.Phys.* 1983, v.45, p.315.
2. Hunsucker R.D., Bates H.F. Survey of polar and auroral region effects on HF propagation // *Radio Sci.* 1969, v.4, No.4, p.347-365.
3. Урядов В.П., Понятов А.А. Влияние ионосферного провала на характеристики КВ сигналов // *LVI Научная сессия, посвященная дню Радио: Труды*, т.2. М. 2001, с.260–262.
4. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. – 272с.
5. Moller H.G., Tauriainen A. Observations of intense irregularities in the polar F-region by HF backscatter and satellite scintillation measurements // *J.Atm.Terr.Phys.* 1975, v.37, p.161.
6. Kohnlein W. Raitt W.J. Position of the mid-latitude trough in the topside ionosphere as deduced from ESRO 4 observations // *Planet Space Sci.* 1977, v.25, p.600–602.
7. Rodger A.S., Pinnock M. Movements of the mid-latitude ionospheric trough // *J.Atm. Terr. Phys.* 1982, v.44, No. 11, p.985–992.
8. Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A., Villain J.P. et al. Coherent HF radar backscatter from small-scale irregularities

- in the dusk sector of the subauroral ionosphere // *J.Geoph.Res.* 1988, v.93, No A11, p.12871–12882
9. Keskinen M.J., Ossakow S.L. Theories of high-latitude ionospheric irregularities: a review // *Radio Sci.* 1983, v.18, p. 1077–1091.
 10. Villain J.-P., Beghin C., Hanuise C. ARCAD3-SAFARI coordinated study of auroral and polar F region ionospheric irregularities // *Ann. Geophys.* 1986, v.4, p.61–73.
 11. Tsunoda R.T. High-latitude F region irregularities: a review and synthesis // *Rev. Geophys.* 1988.v.26, No4, p.719–760.
 12. Slater D.W., Smith L.L., Kleckner E.W. Correlated observations of the equatorward diffuse auroral boundary // *J.Geophys.Res.* 1980, v. 85, p.531.
 13. Weber E.J., Tsunoda R.T., Buchau J. et al. Coordinated measurements of auroral zone plasma enhancements // *J.Geophys.Res.* 1985, v. 90, p.6497.
 14. Понятов А.А., Урядов В.П., Батухтин В.И. Первые результаты сверхдального зондирования ионосферных неоднородностей с использованием волноводной моды // *Изв. Вузов Радиофизика.* 1999, т.42, №12, с.1136–1144.
 15. Erukhimov L.M., Uryadov V.P., Cherkashin Yu.N. et al. Pedersen mode ducting in a randomly stratified ionosphere // *Waves in Random Media.* 1997, v.7, No.4, p.531–544.
 16. Halcrow B.W., Nisbet J.S. A model of F2 peak electron densities in the main trough region of the ionosphere // *Radio Sci.* 1977, v.12, No.5, p.815–820.
 17. Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A. Rates of scattering occurrence in routine HF radar observations during solar cycle maximum // *Radio Sci.* 1997, v.32, p.1051–1070.