

Особенности распространения радиоволн коротковолнового диапазона в ионосфере высоких широт (обзор)

И.А. Насыров¹, Н. Ю. Заалов²

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт физики, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18.

E-mail: Igor.Nasyrov@kpfu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, 198504, Петергоф, ул. Ульяновская, д. 1.

Большие отклонения от дуги большого круга радиосигналов КВ диапазона, распространяющихся через высокоширотную ионосферу в направлении прихода имеют серьезные последствия для планирования и эксплуатации систем связи и радиолокации. Очень большие отклонения особенно распространены в полярных и субавроральных областях, где сигналы часто приходят на приемник с пеленгами, смещенными от дуги большого круга на $\pm 100^\circ$ или более. В статье представлены результаты измерений, выполненных на нескольких субавроральных радиотрассах, и описаны основные причины распространения вне дуги большого круга.

Ключевые слова: высокоширотная и субавроральная ионосфера, дуга большого круга.

Features of shortwave radio wave propagation in the high-latitude ionosphere (review)

I.A. Nasyrov¹, N. Yu. Zaalov²

¹ Kazan Federal University.

² Sankt-Petersburg State University.

Large deviations in the direction of arrival of ionospherically propagating radio signals from the Great Circle Path (GCP) have serious implications for the planning and operation of communications and radiolocation systems operating within the HF-band. Very large deviations are particularly prevalent in the polar and sub-auroral regions where signals often arrive at the receiver with bearings displaced from the great circle direction by up to $\pm 100^\circ$ or more. Measurements made over several paths are presented in this paper, and the principle causes of off-great circle propagation outlined.

Введение

Большие отклонения в направлении прихода радиосигналов, распространяющихся через ионосферу от дуги большого круга (ДБК), имеют важное значение при планировании и эксплуатации систем связи и радиолокации и радиопеленгации, работающих в ВЧ-диапазоне. Наиболее ярким примером является работа систем радиопеленгации, которые измеряют направления прихода сигнала в нескольких приемных пунктах. Затем местоположение передатчика оценивается по пересечению отдельных линий пеленга от каждого приемного пункта, и поэтому отклонения от ДБК будут отрицательно влиять на оценку местоположения передатчика. Важность распространения вне дуги большого круга не ограничивается только системами радиопеленгации, но и практически на все ВЧ-системы, в которых используются направленные антенны. В таких системах существует значительная вероятность ухудшения характеристик в моменты, когда путь распространения радиоволн проходит

в направлениях, значительно удаленных от основного лепестка одной или обеих передающих или приемных антенн.

Отклонения в несколько градусов от ДБК связаны с наклонами, вызванными, например, солнечным терминатором и перемещающимися ионосферными возмущениями (ПВ) [1]. Очень большие отклонения особенно распространены в северных регионах, где сигналы часто приходят с направлений, смещенных относительно ДБК на $\pm 100^\circ$ или более. В пределах главного ионосферного провала (ГИП) большие отклонения от ДБК возникают из-за уменьшения там электронной плотности и последующего уменьшения максимальной применимой частоты (МПЧ) для радиотрассы вдоль ДБК. Распространение может происходить за счет рассеяния на неоднородностях, находящихся на северной стенке ГИП или авроральной зоны (которые могут совпадать), отражения от одной или от обеих наклонных стенок ГИП [2, 3] или за счет рассеяния от границы земля/море [4]. В пределах полярной шапки распространение вне большого круга объясняется наличием конвективных областей и дуг с повышенной электронной плотностью [5]. Важно отметить, что механизмы распространения радиоволн вне ДБК приводят к временным задержкам, которые не учитываются существующими моделями радиоканала, и поэтому необходимы методы учета подобных механизмов распространения.

Ситуация усугубляется тем, что в дополнение к крупномасштабным неоднородностям, которые вызывают сильные отклонения сигнала от ДБК, средне и мелкомасштабные неоднородности в распределении электронной плотности приводят к тому, что сигналы, связанные с каждой модой распространения, приходят на приемник под разными углами по азимуту и высоте. Такое направленное распространение энергии принимаемого сигнала является важным параметром, который необходимо учитывать при проектировании многоэлементных приемных решеток и соответствующих методов обработки сигналов, используемых, например, в системах радиолокации или адаптивного приема. При проектировании таких систем часто предполагается, что принятый радиосигнал состоит из ограниченного числа зеркально отраженных сигналов, поступающих на антенную решетку с четко определенных направлений. Однако для северных трасс это часто не так, в частности, на трассах полярной шапки были измерены азимутальные стандартные отклонения в несколько десятков градусов [6].

Общей особенностью распространения КВ-сигналов в высокоширотной ионосфере является большое уширение доплеровского спектра, а также большая временная дисперсия задержек прихода различных мод сигнала. Это, в свою очередь, сильно ограничивает пропускную способность данных, достижимую в системах ВЧ-связи из-за существующих технологических ограничений в конструкции модемов [7]. Уширение доплеровского спектра сигнала часто связано с направленным распространением различных мод сигнала, в работе [8] показано, что адаптивное управление основным лепестком диаграммы направленности фазированной антенной решётки может быть использовано для создания направленного радиоканала и уменьшения ширины доплеровского спектра на входе модема.

В настоящей статье приведён краткий обзор результатов измерений параметров радиосигналов КВ диапазона, распространяющихся в высокоширотной ионосфере, полученных в Лестерском университете (Великобритания) в период действия программы COST-271, часть из которых была получена при непосредственном участии авторов доклада.

Распространение вдоль главного ионосферного провала

Для исследований особенностей распространения радиосигналов КВ диапазона вдоль главного ионосферного провала (ГИП) была организована радиотрасса Уппсала

(Швеция) – Лестер (Великобритания), протяженностью 1400 км (рис. 1). Передатчик, расположенный в Уппсале, работал трёхминутными циклами, в течении которых последовательно излучались сигналы на шести частотах от 4 до 18 МГц. Многоканальная приёмная система, расположенная в Лестере, была подключена к антенной решётке с разнесённой апертурой и позволяла измерять время распространения сигнала (ВРС), углы прихода, доплеровский сдвиг частоты и уширение доплеровского спектра. Кроме этого, осуществлялся приём ЛЧМ-ионограмм. Измерения проводились круглосуточно на протяжении всего 2001 года. Более подробно особенности эксперимента, а так же полученные результаты рассмотрены в работах [9, 10].

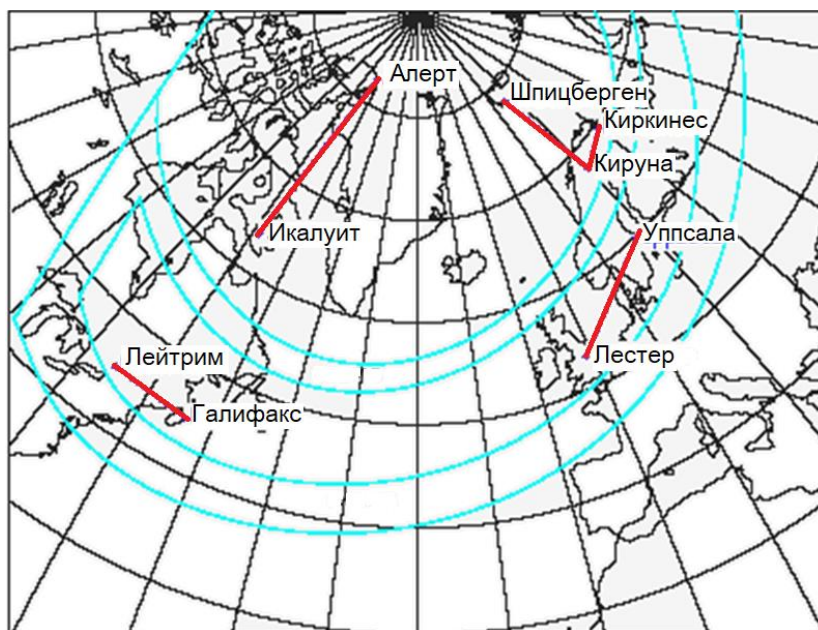


Рис. 1. Схема экспериментальных радиотрасс. Голубыми линиями показано положение северной и южной стенок ГИП, построенные по модели Халькроу и Нижбетта (1977) для 00:00 UT 11 марта 2001года, $K_p = 3$.

На рис. 2 показаны некоторые результаты измерений ВРС и азимутальных углов прихода, полученные в течении трёх дней ноября 2001 г. на частоте 10.4 МГц. Как видно из рис. 2 в дневное время часто наблюдается одно-, двух- и трёх скачковое распространение сигналов вдоль ДБК через F-слой ионосферы. В это время доплеровское уширения спектра сигнала не наблюдается, уровень сигнала достаточно высокий и уменьшается только за счёт поглощения в D-области в полуденное время. В первую ночь (день 324-325) азимутальный угол прихода отклоняется на север на закате, а потом сменяется прерывистым распространением вдоль ДБК через E-область. Сила сигнала примерно на 20 дБ ниже дневного значения, доплеровское уширение спектра невелико. Во вторую ночь (день 325-326), сразу после полуночи, распространение происходит через режим с относительно большими ВРС (8-10 мс), азимутальные углы прихода смещаются к северу на 40° - 60° . Сигнал примерно на 20 дБ слабее дневных значений, кроме этого, наблюдается доплеровский сдвиг частоты до 5 Гц. Наиболее яркое поведение можно наблюдать на третью ночь (день 326-327), когда ВРС достигает 13 мс в 20:30 UT. В течение следующих 6 часов ВРС уменьшается, достигая устойчивого значения около 7 мс к 02:30 UT. Временами около полуночи появляется второй более слабый сигнал с большей задержкой (~11 мс). По мере уменьшения ВРС, отклонение азимутальных углов от ДБК уменьшается с примерно 40° в 20:30 UT до 20° в 02:30 UT, угол места увеличивается с примерно 10° до 15 - 20° , а уровень сигнала достигает уровня

примерно на 10 дБ ниже дневного значения на ДБК. Быстрое уменьшение ВРС сопровождается сильным положительным доплеровским сдвигом (~ 20 Гц). Доплеровское уширение спектра выше дневных значений до тех пор, пока направление прихода не отклонится на север (около 03:00 UT), когда оно становится примерно таким же, как и днем.

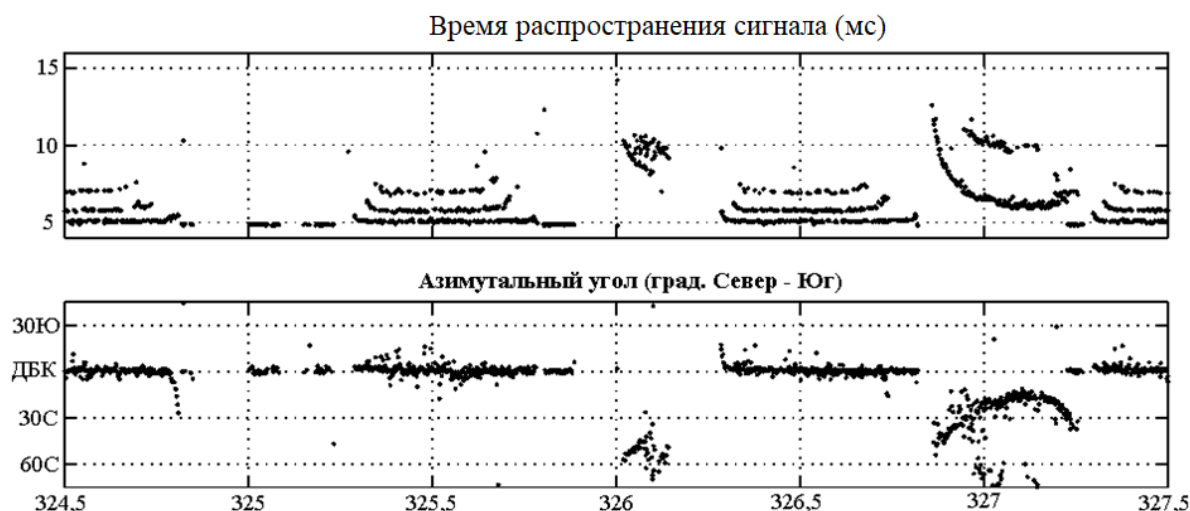


Рис. 2. Результаты измерений на частоте 10.4 МГц, полученные между полднем 20.11.2002 (день 324) и полднем 23.11.2001 (день 327). На верхней панели показано время распространения сигнала (мс), на нижней панели азимутальные углы прихода для наиболее мощной моды сигнала.

Для определения положения ГИП за основу была взята эмпирическая модель Халькроу и Нижбедта [11]. Данная модель даёт гладкие стенки ГИП, что не позволяет воспроизвести результаты, полученные в эксперименте. Поэтому к модельному профилю электронной концентрации на стенках провала были добавлены неоднородности с меньшими масштабами, которые были вытянуты вдоль стенок провала. Таким образом на стенках ГИП были созданы небольшие области с повышенной электронной концентрацией, которые позволяют эффективно отражать пробные радиоволны. Уменьшение электронного содержания в ГИП определяется солнечной активностью. Для высокой солнечной активности электронная плотность в ГИП уменьшается на 20-30%, а для низкой солнечной активности – 60%. Данные средние оценки были сделаны на основе анализа ионограмм, полученных на ионосферной станции, расположенной вблизи южной стенки ГИП. Необходимо сказать, что полученные оценки уменьшения электронной плотности в ГИП отличаются от значений, принятых в оригинальной модели Халькроу и Нижбедта – 75%. Здесь необходимо отметить, что модель Халькроу и Нижбедта создавалась на основе данных, полученных при помощи спутникового ионозонда. Результаты наложения модифицированной модели на набор полученных экспериментальных данных представлены на рис. 3.

Кроме этого, модифицированная модель также включала и авроральный овал. В используемой модели аврорального овала его южная граница совпадает с северной стенкой ГИП. Высыпания энергичных частиц, поток которых варьируется в соответствии с фазой солнечного цикла здесь не учитываются.

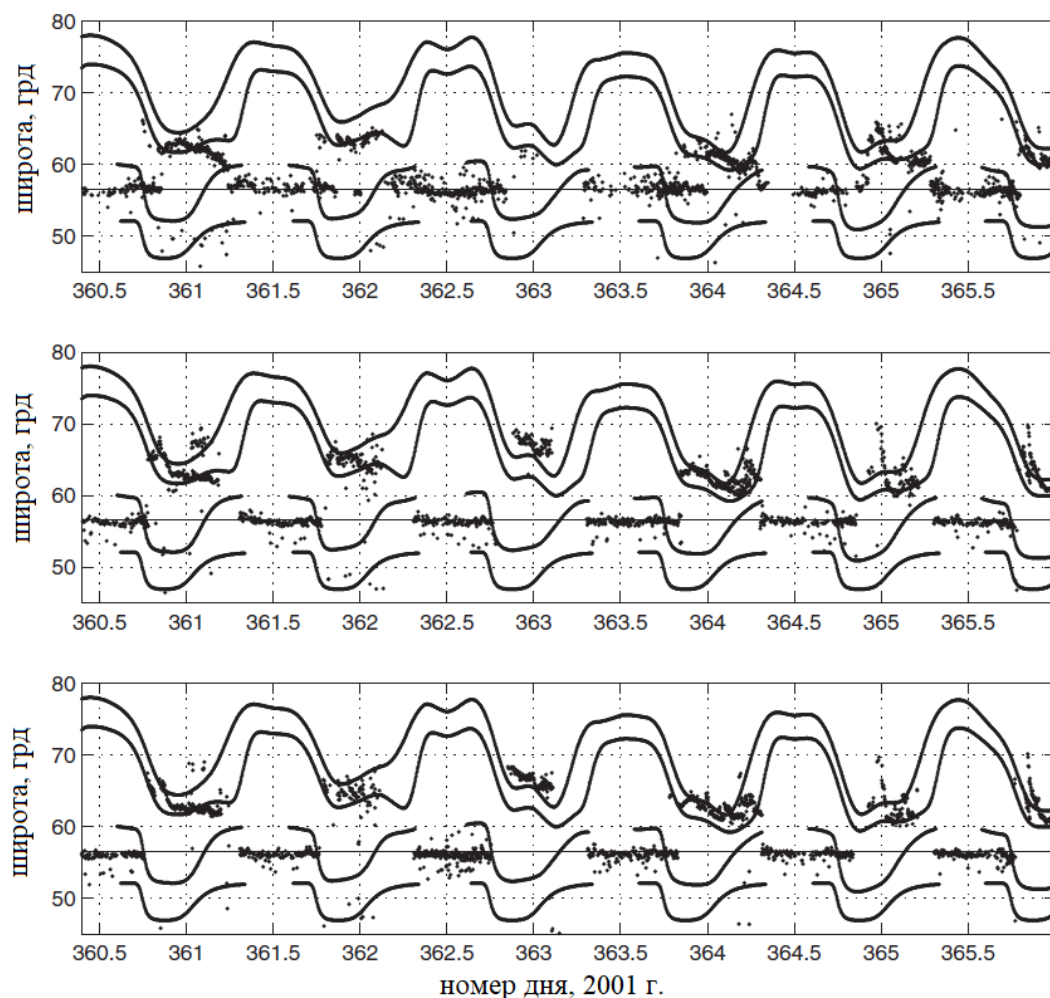


Рис. 3. Широты точек отражения радиосигнала и стенок модели ГИП между полуднем 26 декабря 2001 года (день 360) и концом 31 декабря 2001 года (день 365). Верхняя панель – 7.0 МГц; средняя панель – 10.4 МГц; нижняя панель – 11.1 МГц. Горизонтальной линией на панелях отмечена широта 56.5°N средней точки радиотрассы.

Для радиотрассы Уппсала - Лестер (см. рис. 1) отражения на стенках ГИП оказывали незначительное влияние. Отклонения в азимутальных углах прихода могут быть объяснены только рассеянием от мелкомасштабных неоднородностей в авроральной зоне. Данный результат заметно контрастирует с моделированием измерений, проведенных в Канаде на радиотрассе Галифакс - Лейтрим (см. рис. 1) вблизи минимума солнечной активности. Здесь отражения происходили как от северной, так и от южной стенок ГИП, что объясняется более глубоким уменьшением электронной плотности в ГИП в этой фазе солнечного цикла.

Транс-овальные радиотрассы

В период с 2001 по 2004 годы проводилась экспериментальная кампания с размещением приёмного пункта в Кируне (Швеция). Шестиканальная приёмная система позволяла измерять следующие параметры радиосигналов: время распространения сигнала, доплеровский сдвиг частоты, доплеровское уширение спектра, азимутальные и вертикальные углы прихода. Передающие системы располагались на Шпицбергене (длина радиотрассы 1152 км), недалеко от Киркенеса в Норвегии (длина радиотрассы 430 км), как это показано на рис. 1. В течении короткого промежутка времени (примерно

полтора месяца) измерения также проводились на радиотрассе Уппсала – Кируна (протяжённость трассы 880 км).

Передатчик работал циклами, в течение которых излучались сигналы с импульсно-кодовой модуляцией (ИКМ), кодированные 13-битным кодом Баркера на наборе различных фиксированных частот в коротковолновом диапазоне. Радиосигналы принимались шестиэлементной антенной решеткой, каждый из вибраторов которой был подключен к индивидуальному входу многоканального приемного устройства. Приемный и передающий концы радиотрассы были синхронизированы по времени посредством GPS. Наклонные ионограммы, полученные в результате измерений, использовались для интерпретации экспериментальных данных. Измерения проводились ежедневно, круглосуточно на 8-ми фиксированных частотах в диапазоне от 4 до 20 МГц.

Типичный пример серии измерений, сделанных на частоте 11.2 МГц 30 сентября 2002 года, который показывает уширение доплеровского спектра, представлен на рис. 4.

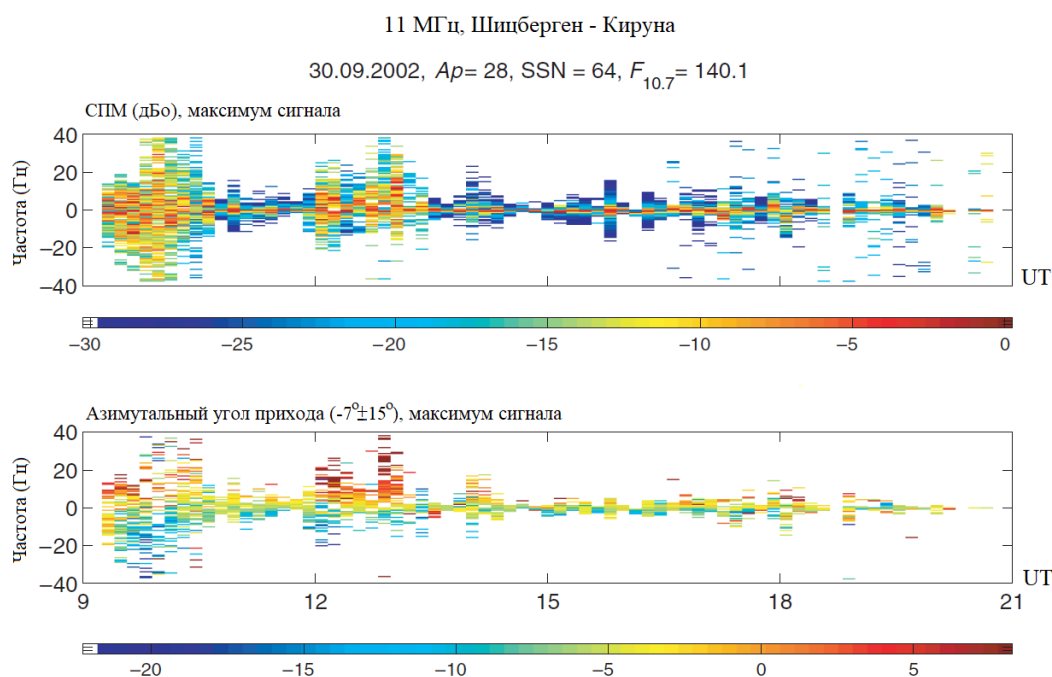


Рис. 4. Вариации параметров радиосигналов на частоте 11.2 МГц для радиотрассы Шпицберген-Кируна 30.09.2002. Азимутальный угол ДБК - -7° . Верхняя панель – спектральная плотность мощности в дБ относительно максимума принятого сигнала (цветная панель – значения мощности в дБ). Нижняя панель – азимутальные углы прихода различных мод сигнала. Углы отображаются при помощи нижней цветной панели (красные цвета – отклонения от ДБК на восток; синие цвета – отклонения от ДБК на запад).

Верхняя панель рис. 4 показывает доплеровское уширение спектра наиболее мощной составляющей сигнала в период с 09:00UT до 21:00UT, нижняя панель показывает направление азимутальных углов прихода для каждой компоненты в доплеровском спектре наиболее мощной составляющей сигнала. Из рисунка хорошо видна зависимость между доплеровской частотой и измеренным направлением прихода каждой компоненты сигнала (нижняя панель). Начиная с местного полдня (09:00UT) до 11:00UT компоненты сигнала приходящие с востока от направления ДБК имеют положительные доплеровские частоты, а компоненты сигнала, приходящие с запада от ДБК, имеют

отрицательные доплеровские частоты, что свидетельствует о движении ионосферных неоднородностей в области отражения радиоволн с востока на запад.

Одной из задач данной экспериментальной кампании было нахождение соответствий между вариациями параметров радиосигналов, полученными на наклонных радиотрассах с параметрами ионосферной плазмы, полученными при помощи геофизической высокоширотной сети радаров возвратно-наклонно зондирования SuperDARN. Выявление четко определенных взаимосвязей может позволить оценить характеристики наклонного радиосигнала для длительных периодов (т.е. периодов, не охваченных данными экспериментами, но охваченных другими приборами) на других радиотрассах путем изучения данных, полученных при помощи постоянно работающих геофизических КВ-радаров. Таким образом, результаты, полученные в ходе данной экспериментальной кампании, могут быть использованы для прогнозирования и интерпретации результатов транс-овального распространения дециметровых радиоволн для обширной географической области, покрываемой радарной сетью SuperDARN. Таким образом, полученные экспериментальные данные сравнивались с данными высокоширотной сети КВ радаров (SuperDARN) [12].

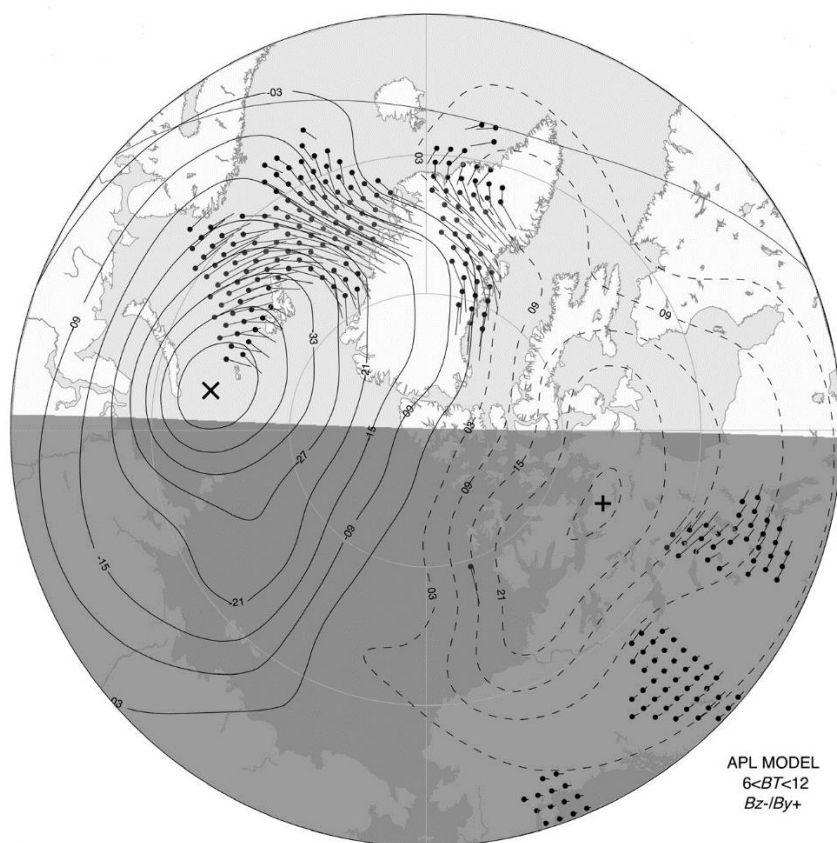


Рис. 5. Оценка ионосферных конвективных потоков с помощью сети высокоширотных геофизических КВ радаров SuperDARN. 30 сентября 2003 года, 12:10 UT.

Из рис. 5. Видно, что в течение рассматриваемого периода SuperDARN показывает наличие движения ионосферных неоднородностей вдоль конвекционных потоков со скоростями порядка нескольких сотен метров секунду в направлении с востока на запад и на широтах, соответствующих широте средней точки трассы. Таким образом, экспериментальные результаты, полученные на двух независимых системах, показывают хорошее соответствие между собой.

Распространение внутри полярной шапки

Измерения вариаций параметров радиосигналов, распространяющихся в полярной шапке, проводились на радиотрассе Икалуит - Алерт протяжённостью 2100 км (см. рис. 1) в течение примерно 2.5 лет с декабря 1993 по май 1996 года [4]. В зимние и равноденственные месяцы наблюдаются западные отклонения азимутальных углов прихода от ДБК в вечерние часы (локальная полночь в средней точке трассы - 04:30 UT), в утренние часы азимутальные углы прихода смещаются к востоку от ДБК. По всей видимости, это связано с наличием крупномасштабных ионосферных неоднородностей в полярной шапке, генерируемых в области солнечного терминатора. Особо следует отметить возникновение быстрых колебаний углов прихода с периодами около 30 минут, которые объясняются конвекцией электронной плотности в полярной ионосфере, а также появлением крупномасштабных ионосферных неоднородностей с повышенной электронной плотностью, вытянутых в направлении Солнца.

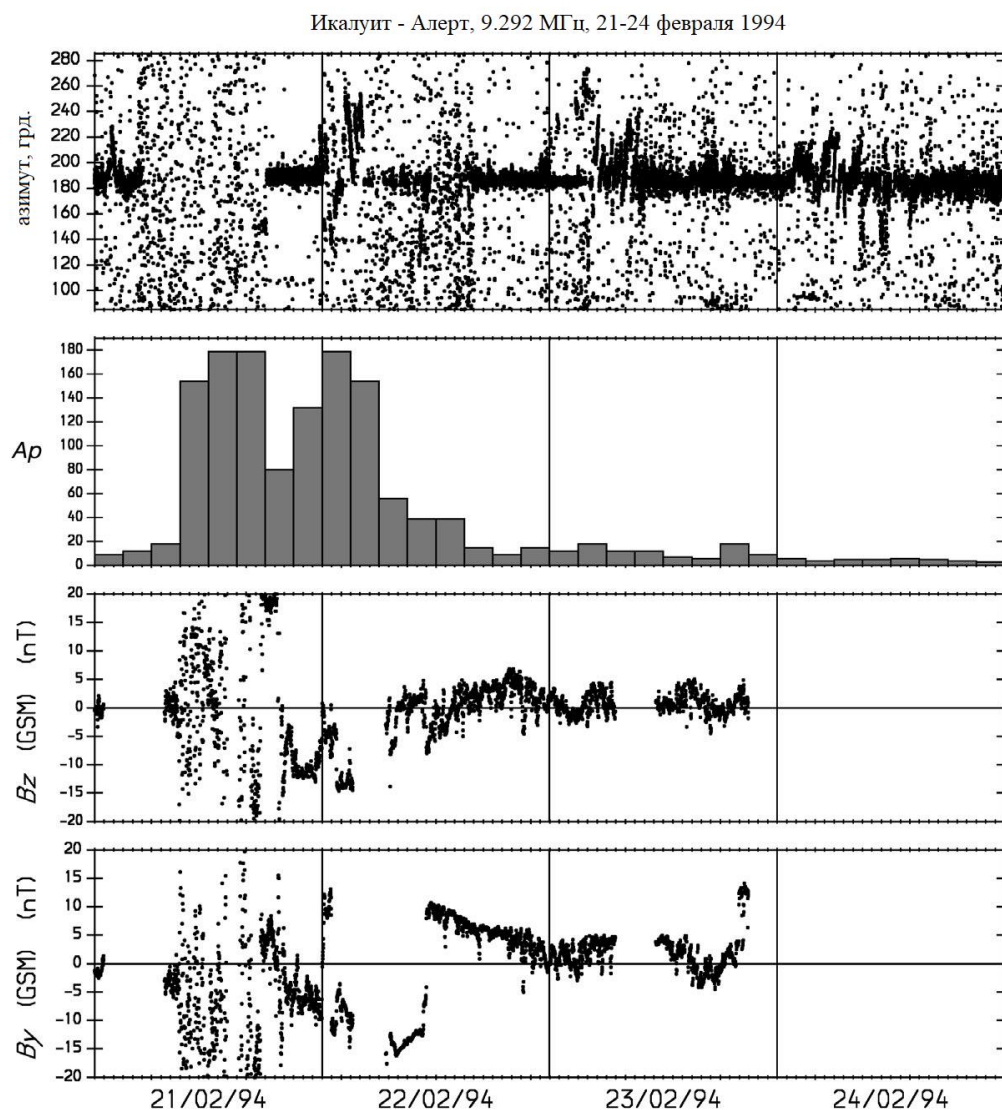


Рис. 6. Измерения азимутальных углов прихода для радиотрассы Икалуит – Алерт (частота 9.292 МГц) за период 21-24 февраля 1994 года. На нижних панелях даны трёхчасовой индекс A_p , B_y и B_z компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). Углы прихода измерены в градусах по часовой стрелке от севера, а время/дата указаны в UT.

Пример быстрых колебания азимутальных углов прихода, наблюдаемых на частоте 9.292 МГц за период 21-24 февраля 1994 года представлен на рис. 6 вместе со значениями

трёхчасового индекса A_p и параметров B_u и B_z ММП. Как видно из рис. 6, 21-22 февраля наблюдается геомагнитная буря. Наиболее сильные вариации азимутальных углов прихода наблюдаются в ночь с 21 на 22 февраля, когда имеют место наиболее высокие индексы A_p и южное направление ММП. Вариации углов прихода уменьшаются в ночное время за шестичасовой период до местной полуночи (04:30 UT). В ночь с 22 на 23 февраля также наблюдаются достаточно большие вариации азимутальных углов прихода в период северного направления ММП при достаточно низких значениях индекса A_p , которые увеличиваются в часы после местной полуночи.

В работе Локвуда [13] описана модель конвективных потоков в полярной шапке. Опираясь на данную модель можно предположить, что, когда ММП направлено на юг ($B_z < 0$), области ионизации, дрейфующие против солнца, приведут к уменьшению вариаций азимутальных углов прихода в предполуночные часы и увеличению вариаций углов прихода в часы до полуночи и полуночи. Из рис. 6 видно, что это так, если $B_u < 0$, однако при $B_u > 0$ наблюдается явное отсутствие уменьшающихся вариаций в секторе до полуночи. Важно отметить, что конвективные потоки, приведенные Локвудом, представляют собой некоторую общую, усреднённую картину того, что можно ожидать. В каждом конкретном случае фактическая картина потоков может значительно отличаться от представленных на рисунке. Когда ММП направлено на север ($B_z > 0$), основные крупномасштабные структуры электронной плотности в ионосфере полярной шапки представляют собой выровненные по солнцу дуги (плазменные полосы, простирающиеся на тысячи километров в транс-полярном направлении полдень-полночь, и более узкие неоднородности с масштабами около 100 км в направлении рассвет-сумерки) [14]. Серия дуг, устойчиво дрейфующих через полярную шапку от рассвета до заката, приводит к увеличению вариаций азимутальных углов прихода в период с 18:00 до 06:00 LT, при этом наибольшие вариации углов прихода наблюдаются в полуночный период. Уменьшающиеся вариации азимутальных углов прихода наблюдаются в период с 06:00 до 18:00 LT с наибольшими вариациями в полуденном секторе.

Заключение

Представленные в статье результаты показывают важность учета эффектов распространения радиоволн вне дуги большого круга при планировании работы и построении радиосредств КВ диапазона в области высоких широт. Часто, осмысление этих эффектов необходимо при построении радиолокационных систем, так как отклонения принятых радиосигналов от дуги большого круга может приводить к серьезным ошибкам в триангуляции целей. Также заслуживает внимания тот факт, что в системах, использующих антенные поля, направленные вдоль дуги большого круга качество принимаемых сигналов, может быть ухудшено в то время, когда распространение радиоволн осуществляется через моды, проходящие вне дуги большого круга. Поднятые проблемы заслуживают самого пристального внимания со стороны научной общественности, и могут быть выполнены только в широкой кооперации научных учреждений различной ведомственной принадлежности.

Литература

1. Jones T.B., Reynolds J.S.B. Ionospheric perturbations and their effect on the accuracy of HF direction finders // *Radio Electron. Eng.*, 1975, **45**, 63-73.
2. Rogers N.C., Warrington E.M., Jones T.B. Large HF bearing errors for propagation paths tangential to the auroral oval // *IEE Proc. Microwaves Ant. Prop.*, 1997, **144** (2), 91-96.
3. Stocker A.J., Warrington E.M., Zaalov N.Y. The effect of the mid-latitude trough on the direction of arrival and time-of-flight of HF radio signals // *Acta Geod. Geophys. Hung.*, 2002, **37** (2/3).

4. Stocker A.J., Warrington E.M., Jones T.B. A comparison of observed and modelled deviations from the great circle direction for a 4490 km HF propagation path along the mid-latitude ionospheric trough // *Radio Sci.*, 2003, **38** (3), 1045, doi:10.1029/2002RS002781.
5. Warrington E.M., Rogers N.C., Jones T.B. Large HF bearing errors for propagation paths contained within the polar cap // *IEE Proc. Microwaves Ant. Prop.*, 1997, **144** (4), 241-249.
6. Warrington E.M. Observations of the directional characteristics of ionospherically propagated HF radio channel sounding signals over two high latitude paths // *IEE Proc. Microwaves Ant. Prop.*, 1998, **145** (5), 379-385.
7. Angling M.J., Cannon P.S., Davies N.C., Willink T.J., Jodalen V., Lundborg B. Measurements of Doppler and multipath spread on oblique high latitude HF paths and their use in characterising data modem performance // *Radio Sci.*, 1998, **33** (1), 97-107.
8. Warrington E.M., Jacson C.A., Lundborg B. Directional diversity of HF signals received over high latitude paths and the possibility of improved data throughput by means of spatial filtering // *IEE Proc. Microwaves Ant. Prop.*, 2000, **147** (6), 487-494.
9. Siddle D.R., Stocker A.J., Warrington E.M. The time-of-flight and direction of arrival of HF radio signals received over a path along the mid-latitude trough: observations // *Radio Sci.*, 2004, **39**, RS4008, doi: 10.1029/2004RS003049.
10. Siddle D.R., Zaalov N.Y., Stocker A.J., Warrington E.M. The time-of-flight and direction of arrival of HF radio signals received over a path along the mid-latitude trough: theoretical considerations // *Radio Sci.*, 2004, **39**, RS4009, doi: 10.1029/2004RS003052.
11. Halckrow B.W., Nisbet J.S. A model of the F2 peak electron densities in the main trough region of the ionosphere // *Radio Sci.*, 1977, **12**, 815-820.
12. Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN). An International Radar Network for Studying the Earth's Upper Atmosphere, Ionosphere, and Connection into Space. <http://superdarn.org/tiki-index.php> (Дата посещения: 05.06.2023)
13. Lockwood M. Modelling the high latitude ionosphere for time varying plasma convection // *Proc. Inst. Electr. Eng., Part H*, 1993, **140** (2), 91-100.
14. Buchau J., Reinisch B.W., Weber E.J., Moore J.G. Structure and dynamics of the winter polar cap F-region // *Radio Sci.*, 1983, **18**, 995-1010.