

Анализ доплеровской регистрации волнового поля на сверхдлинной радиотрассе Москва(РВМ) – УАС «Академик Вернадский»

И.В.Крашенинников, А.В.Попов, И.Г.Стаханова

Аннотация

Представлены результаты анализа регистрации доплеровского спектра для частоты 5 МГц на сверхдлинной радиотрассе Москва(РВМ) – УАС «Академик Вернадский» в ноябре 2002 г., имеющего две ярко выраженные спектральные группы. Показано, что обе являются результатом прохождения радиоволны по короткому плечу радиотрассы, первая – строго по дуге большого круга, а вторая обусловлена дополнительным горизонтальным рефракционным воздействием утреннего терминатора. Приводятся оценки напряженности поля, соотношения сигнал/шум и доплеровского смещения частоты, полученные в рамках расширенной глобальной модели ионосферы IRI-2001.

Ключевые слова: распространение радиоволн в ионосфере, доплеровский спектр радиосигнала, ионосферная модель, перенос излучения, отношение сигнал/шум.

1. Введение

В задаче прогнозирования прохождения декаметровых радиоволн в ионосфере Земли можно выделить два принципиальных аспекта в расчете радиотрассы:

а) оценка чисто геометрических параметров, определяемых только распределением электронной концентрации (МПЧ – максимальной применимой частоты, группового пути, углов прихода), и

б) характеристик, зависящих от напряженности волнового поля (НПЧ – наименьшая применимая частота, ОРЧ – оптимальная рабочая частота, частотные интервалы наличия радиосвязи). Последние вычисляются на основе ключевого параметра, определяющего работу систем радиосвязи – соотношения сигнал/шум на антенне приемного устройства. В свою очередь, данный параметр включает в себя учет расходимости и поглощения в оценке напряженности поля, которые могут быть рассчитаны в глобальной ионосферной модели, содержащей как необходимый элемент эффективную частоту соударений электронов с ионами и нейтралами, а также потери при отражении от земной поверхности. Эти факторы, наряду с энергетическими потерями меньшего масштаба, связанными с работой антенных систем, дают основной вклад в формирование волнового поля в точке приема. Известно, что неопределенность в измерении и расчете напряженности поля гораздо выше, чем для геометрических параметров, что обусловлено существенной приблизительностью знаний о работе антенных систем (коэффициентов усиления) и, в особенности,

Крашенинников Игорь Васильевич, зав. лабораторией, 8(495)8510279, e-mail: krash@izmiran.ru

Попов Алексей Владимирович, зав. отделом, 8(495)8510278, e-mail: popov@izmiran.ru

Стаханова Инесса Георгиевна, с.н.с., 8(495)8510279

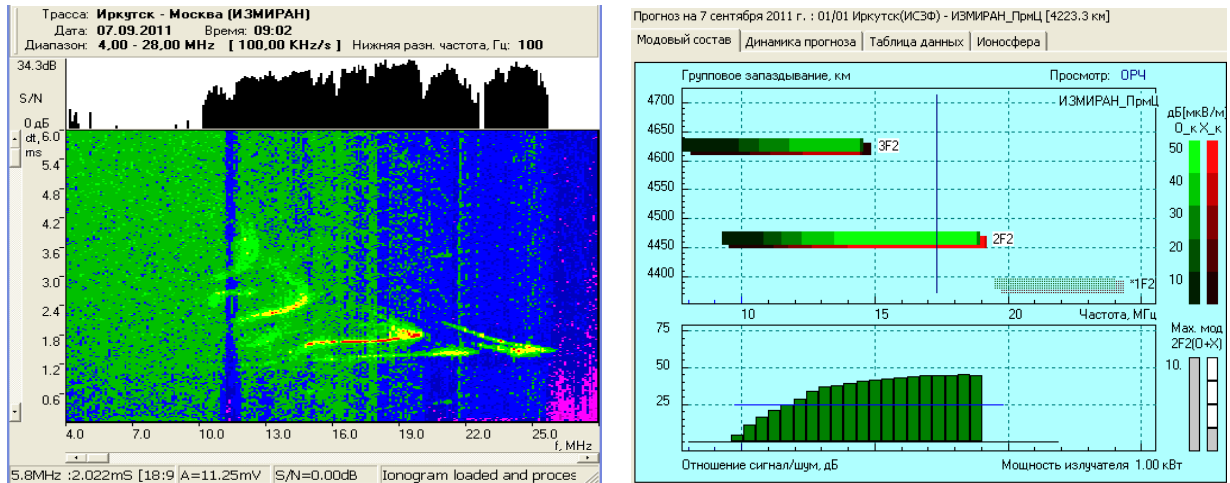


Рис.1. Ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы с отображением соотношения сигнал/шум для радиотрассы Иркутск (ИСЗФ) - ИЗМИРАН 07.09.2011 09:00 UT: экспериментальная (левая панель) и синтезированная прогнозная в модели IRI-2001 (правая панель). Вертикальной линией отмечена ОРЧ, а горизонтальной линией – требуемое для функционирования системы радиосвязи значение отношения сигнал/шум.

погрешностью описания эффективной частоты соударений электронов в ионосфере для декаметрового диапазона радиоволн. Поэтому анализ экспериментальных данных, связанных с измерениями энергетических характеристик волнового поля с точки зрения соответствия модельным представлениям имеет большое значение в обоснованности прогнозных расчетов. Радиоволны с большей длиной волны в наибольшей степени подвержены как влиянию пространственных вариаций электронной плотности, так и столкновительному затуханию и систематические погрешности в учете основных факторов энергетических потерь максимальным образом будут проявляться на протяженных радиотрассах. На примере сопоставления данных наклонного радиозондирования ионосферы и расчета модовой структуры поля [1] для пунктов Иркутск (ИСЗФ) и ИЗМИРАН (~4200 км), представленном на рис. 1 для дневных условий, хорошо видно, что имеет место их неплохое физическое соответствие. Следствием столкновительного затухания является резкий спад соотношения сигнал/шум для частот в окрестности 10 МГц и, в частности, отметим, что сигнал на частоте 5 МГц не выделяется на фоне шумов. Поэтому факт устойчивого прохождения частоты 5 МГц на дальности ~16000 км, наблюдавшийся на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» [2], может служить хорошим тестовым примером для оценки корректности базовых положений техники расчета распространения радиоволн в современном модельном представлении ионосферы.

В данной работе представлены результаты анализа параметров волнового поля (структуры доплеровского спектра, величин доплеровского смещения и соотношения сигнал/шум отдельных мод) частоты 5 МГц при сверхдальнем прохождении на основе:

- а) ионосферной модели IRI-2001, дополненной описанием эффективной частоты соударений электронов с ионами и нейтралами, и геометрооптического механизма распространения радиоволн в квази-трехмерном приближении [1];
- б) модели с аналитическим представлением перехода электронной плотности в области утреннего терминатора в трехмерной задаче в приближении адиабатического инварианта геометрической оптики в плавно-неоднородных средах.

1. Экспериментальные данные

Примером, на котором исследуется достоверность оценки параметров волнового поля, являются данные по спектральному анализу принимаемых сигналов стандартного источника – Москва (РВМ) 5, 10 и 15 МГц в Антарктиде, на украинской антарктической станции «Академик Вернадский» ($65^{\circ}15' S$, $64^{\circ}16' W$) в 2002-2005 гг., приведенные в [2]. Расстояние между конечными пунктами составляет ~ 16000 км и она относится к классу сверхдальних радиотрасс. Наибольший интерес, с точки зрения необычности результатов, представляет случай устойчивой регистрации прохождения и измерения спектра доплеровского сдвига частот для номинала 4996 кГц в ноябре 2002 г (рис. 2). Частота 5 МГц – это достаточно низкая частота и волна должна испытывать сильное ослабление, вследствие большого поглощения в слоях D и E, которые, хотя и в сильно истощенном виде, присутствуют и в ночное время, а также она очень чувствительна к наличию продольной неоднородности ионосферы.

Приемная антенна на УАС «Академик Вернадский» представляла собой горизонтальный симметричный диполь, типа ВГД (вибратор горизонтальный диапазонный), имеющий выделенное азимутальное направление на Москву. В силу симметрии диаграммы направленности горизонтального диполя в азимутальной плоскости осуществлялся также прием и с противоположного направления. Приемная часть специально разработанного комплекса когерентного приема и спектральной обработки имела необходимую частотно-фазовую стабильность. Временной интервал спектрального анализа фазоквадратурных компонент волнового поля варьировался в пределах 6-60 сек в зависимости от требуемой степени спектрального разрешения. Для увеличения соотношения сигнал/шум прием осуществлялся в полосе 300 Гц. Измерения проводились недельными циклами в зимних (июнь-июль) и летних (ноябрь-январь) антарктических условиях в течение 2002-2005 гг. Для этих условий линия солнечного терминатора проходит наиболее близко к дуге большого круга, соединяющей конечные пункты радиотрассы. Для типичной оценки спектра мощности (рис. 2) (в рассматриваемый интервал времени 21:00-05:00 UT 16-17.11.2002 использовалось временное окно в 6 сек и, соответственно, спектральное разрешение составляло 0,17 Гц.), когда конечные пункты радиотрассы находятся в близкой окрестности зоны солнечного терминатора (рис. 2,а), можно уверенно выделить два характерных максимума в спектре (рис. 2). В [2] характерные спектральные группы интерпретируются как проявление прохождения радиоволн по кратчайшему (прямой сигнал) и дополнительному (обратный сигнал) расстояниям большого круга.

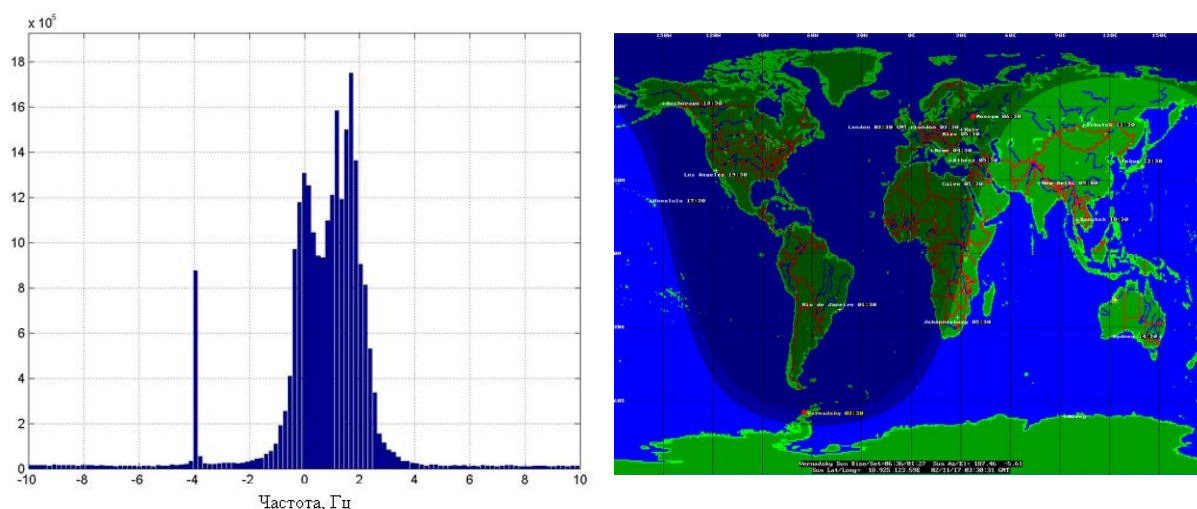


Рис. 2. Спектр мощности сигнала радиостанции РВМ (4,996 МГц), принятого на УАС «Академик Вернадский» 17.11.2002 в 3:30-3:38 UT. Отметка на частотной составляющей -4 Гц является технологической и соответствует калибровочному сигналу постоянной амплитуды.

2. Математическое моделирование

Соотношение сигнал/шум. В [1] представлен метод прогнозирования прохождения радиоволн через ионосферу на основе синтеза ионограмм наклонного радиозондирования в глобальной ионосферной модели IRI-2001. Для расчета фактора столкновительного поглощения в напряженности волнового поля в модель было добавлено формирование эффективной частоты соударений электронов из модели СМИ-88 [3]. Таким образом, доработанная модель ионосферы IRI-2001 содержит все необходимые элементы для расчета распространения радиоволн – пространственное распределение электронной концентрации и эффективной частоты соударений электронов всех ионосферных слоев, включая слой D. Математической основой описания распространения радиоволн в магнитоактивной ионосферной плазме являлись базовые уравнения геометрической оптики: уравнения эйконала и переноса [4] в численной реализации методом характеристик [5]. Построение решения в полной трехмерной постановке является крайне затруднительной задачей, поэтому в [1] использовался локально трехмерный подход, основанный на применении метода возмущений для оценки приращений углов выхода и прихода в двухточечной (краевой) задаче из-за наличия поперечных градиентов электронной концентрации (метод возмущений для эйконала [5])

$$\alpha \square \frac{p_\zeta}{\cos \beta_0} = \frac{1}{2r_e} \int_0^\sigma \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0(r, \theta)}} \frac{\partial \varepsilon_1(r, \theta, \zeta)}{\partial \zeta} \Big|_{\zeta=0} d\sigma$$

где α – азимутальное отклонение, β_0 – вертикальный угол прихода, p_ζ – проекция волнового «импульса» на поперечную координату, $\varepsilon_0(r, \theta) = n^2(r, \theta)$ – диэлектрическая проницаемость в плоскости дуги большого круга, а $\partial \varepsilon_1(r, \theta, \zeta) / \partial \zeta \Big|_{\zeta=0}$ – ее поперечный градиент (возмущение), $d\sigma$ – элемент невозмущенной лучевой траектории в двумерно-неоднородной среде. В терминах плазменной частоты и линейного отклонения от плоскости трассы в изотропном приближении формула принимает вид

$$\alpha = - \frac{1}{f^2 \cos(\beta_0)} \int_0^{\sigma_0} \frac{f_{n_0}(r, \theta)}{\mu_0(r, \theta)} \frac{\partial f_{n_1}(r, \theta, x)}{\partial x} \Big|_{x=0} d\sigma \quad (1)$$

$\partial f_{n_1}(r, \theta, x) / \partial x \Big|_{x=0}$ – функция, описывающая высотное распределение поперечных градиентов плазменной частоты, f – рабочая частота, $x = r_e \zeta$ – линейное расстояние по поверхности Земли, перпендикулярно дуге большого круга трассы, $\mu_0(r, \theta)$ – вещественная часть комплексного показателя преломления $n(r, \theta)$. Из (1) видно, что азимутальное отклонение уменьшается как с увеличением дальности скачка, так и с ростом частоты.

При построении прогнозного решения рассматривались три основных вида потерь: геометрикооптическая расходимость, столкновительное поглощение и потери при отражении от земной поверхности. Первые два вида реализуются в процедуре построения двухточечного решения при условии малости мнимой части показателя преломления $n(r, \theta)$. Потери при отражении от земной поверхности определяются коэффициентом отражения, который сложным образом зависит от комплексной диэлектрической проницаемости поверхности, поляризации и углов падения радиоволны (коэффициенты Френеля [6]). Так, в частности, для морской воды коэффициент отражения близок к единице и слабо зависит от поляризации и вертикальных углов падения. Однако, в общем виде, применить данную процедуру также довольно сложно, поскольку нужно знать векторное волновое поле и локальные параметры земной поверхности. Другой способ – это эмпирические медианные результаты для коэффициента ослабления, обусловленные влиянием подстилающей поверхности, в частности, введенные Казанцевым [7]

$$F_{мед} = \left(\frac{1+R}{2} \right) R^{N-1}, \quad (2)$$

где первый множитель – для приемной антенны и второй $K_r = R^{N-1}$ – для учета промежуточных отражений, R – усредненный коэффициент отражения от земной поверхности (рекомендуемое эмпирическое значение ~ 0.8), N – число скачков. Однако, как показывает практика дальнего и сверхдальнего распространения радиоволн, коэффициент отражения в виде (2) несколько занижает принимаемое волновое поле. И этому есть некоторые физические предпосылки. Во-первых, на трассах дальнего и особенно сверхдальнего распространения часть областей отражения скачковых мод приходится на поверхность мирового океана с высоким коэффициентом отражения, практически не зависящим от поляризации падающих волн. Во-вторых, при увеличении количества отражений поляризация будет становиться преимущественно горизонтальной вследствие более высокого для нее коэффициента отражения, хотя следует отметить, что под влиянием магнитного поля Земли при вхождении в ионосферу будет генерироваться в какой-то степени и другая поляризация. Наконец, как показывает численное моделирование [2], в ночной области ионосферы траектория волны может рикошетировать от вогнутой границы ионосферного слоя без контакта с земной поверхностью. Поэтому вместо (2) использовалось несколько иное представление обобщенного коэффициента отражения

$$K_r = \prod_{k=2}^N R_k, \quad R_k = 0.8 \cdot \left((1 + 0.1 \cdot (1 - \exp(-(k-2)/2))) \right), \quad (3)$$

где R_k – локальный коэффициент отражения на k -том скачке, N – общее число скачков. Здесь первоначальная величина R_2 определяется рекомендуемым эмпирическим значением, а на последующих скачках коэффициент отражения будет несколько увеличиваться. Пример построения решения в упрощенной форме представления ионограммы НЗ (модовой структуры), адаптированной для более наглядного отображения частотных интервалов существования парциальных мод, приведен на рис. 1 (правая панель).

Для ноября 2002 г. среднее число солнечных пятен составляло 95, а среднее значение потока радиоизлучения F_{107} – 141. Согласованное значение $R_m^g \approx 93$ и отличается от среднемесячного числа солнечных пятен незначительно. Для передающего пункта использовались следующие параметры: мощность излучения 5 кВт, антенна ненаправленная в азимутальной плоскости – вертикальный вибратор длиной 10 м.

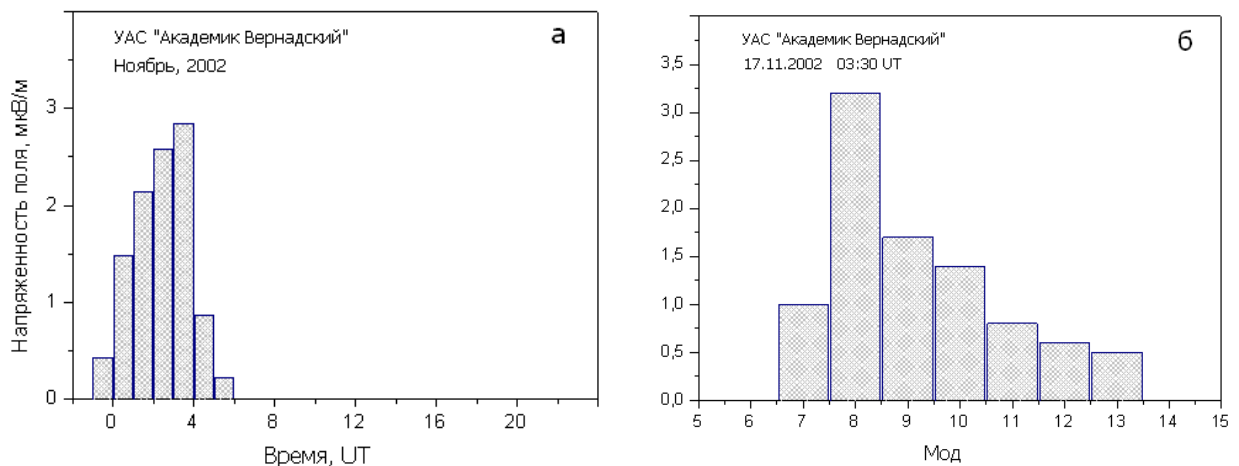


Рис. 3. Зависимость усредненной напряженности поля сигнала радиостанции РВМ (4,996 МГц) по времени суток (а) для ноября 2002 г. и распределение напряженности поля по модам (б) для момента времени 03:30 UT 17.11.2002.

Усредненное в часовом интервале распределение напряженности поля в ноябре 2002 г. для прямой трассы представлено на рис. 3,а, а распределение поля по модам для конкретного времени 03:30 UT – на рис. 3,б в модельном представлении ионосферы. Как следует из рис. 3,а прохождение радиоволн на данной частоте реализуется только в достаточно узком интервале времени – 23:00-05:00 UT. Физической причиной ограничения временной области прохождения является рост поглощения при освещении р/трассы – слева имеет место локальное освещение в окрестности точки приема, а справа – практически глобальное освещение всего пути (рис. 4). Поэтому и спадание напряженности поля имеет различную скорость на границах временного интервала прохождения. В целом, качественно такой характер временной зависимости напряженности поля соответствует экспериментально измеренному временному ходу уровня радиосигнала (рис. 5,а). Как и следовало ожидать, величина напряженности поля, даже для наиболее благоприятного часового интервала 03:00-04:00 UT, составляет ~ 3 , а для конкретного времени 03:30 UT ~ 5 мкВ/м. Напряженность поля для времени 03:30 UT неравномерно распределяется по модам – наиболее энергетически выгодным является перенос поля по лучевой траектории моды 8F2, хотя проходит и мода более низкого порядка – 7F2 (рис. 3,б). Для моды 7F2 сказывается, по-видимому, влияние приемной антенны (горизонтальный диполь), для которой характерно спадание коэффициента усиления на малых углах возвышения, а с ростом порядка моды растет путь в ионосфере и, следовательно, интегральное поглощение.

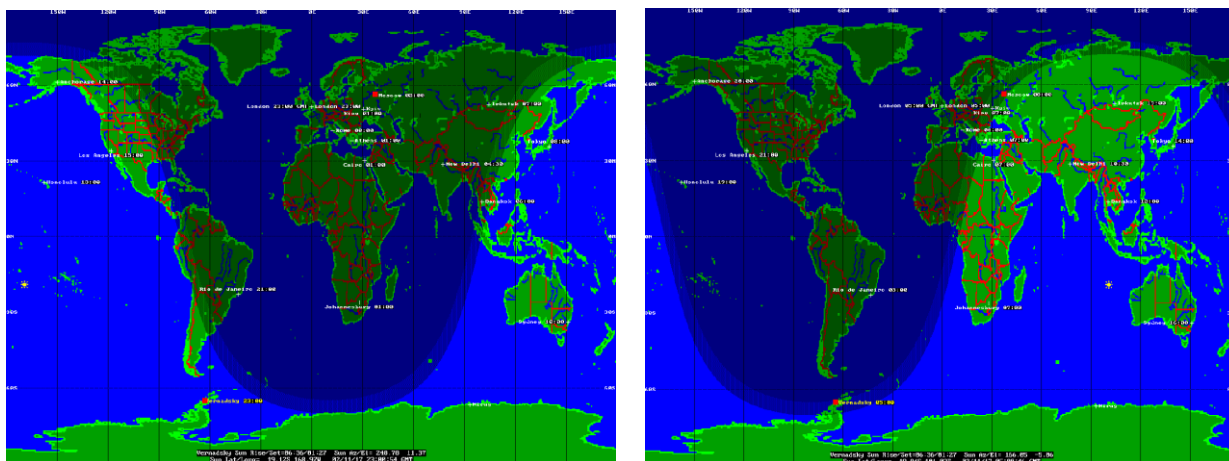


Рис. 4. Положение солнечного терминатора для времен: 23:00 16.11.2002 г. и 05:00 UT 17.11.2002. Конечные пункты радиотрассы отмечены красными квадратами.

Для работы, как систем радиосвязи, так и в данном случае комплекса доплеровской диагностики ионосферы важен не сам фактор напряженности волнового поля, а соотношение сигнал/шум на антенне. Как видно из рис. 3 напряженность поля невелика и для стандартных условий Европейской части сигнал был бы слабо виден над уровнем шумов. Расположение приемного пункта в Антарктиде позволяло использовать более низкий уровень шумов. Как известно, электромагнитный шум, существенный для радиосистем в дециметровом диапазоне, состоит из трех компонентов: атмосферного шума, обусловленного грозовой деятельностью в атмосфере, галактического шума, имеющего космическое происхождение, и антропогенного шума, порождаемого деятельностью человека. В данном случае, пренебрежем влиянием антропогенного шума. Две другие составляющие представлены в табл. 1, где P_N^A – атмосферный шум, а P_N^G – шум космического происхождения, а P_N^e – эффективный (суммарный) шум, приведенные к полосе в 1 Гц по отношению к тепловому шуму

Таблица 1. – Оценки электромагнитного шума на УАС «Академик Вернадский» (5 МГц)

Сезон	Время, LT	$P_N^A, \text{дБ} / \text{Гц}$	$P_N^G, \text{дБ} / \text{Гц}$	$P_N^e, \text{дБ} / \text{Гц}$	$E_N, \mu\text{В} / \text{м}$
Весна	20:00-24:00	45.1	35.9	45.1	0.28
	00:00-04:00	41.4	35.9	41.4	0.18

электронов. В интервале времени 23:00 – 05:00 UT критическая частота на ст. «Академик Вернадский», в соответствии с моделью IRI-2001, не опускается ниже значения 7 МГц и, следовательно, галактический шум на номинале 5 МГц не проходит до поверхности Земли. Количественно суммарную среднеквадратичную величину шума (дБВт) в частотной полосе Δf можно оценить по методике, принятой МККР (CCIR – International Radio Consultative Committee) [8] в виде [9]

$$P_N = P_N^e + B - 204,$$

где $P_N^e(f)$ – эффективное среднеквадратичное значение шума (дБ), суммированное по всем компонентам [Spaulding and Stewart, 1987] в полосе 1 Гц в дБВт, $B = 10 \log(\Delta f)$ и последнее слагаемое – тепловой шум электронов $10 \log_{10} kT_0 = -204$ дБВт, $T_0 = 290^\circ\text{К}$, k – постоянная Больцмана. Тогда среднеквадратичная напряженность поля электромагнитного шума (дБ к 1 $\mu\text{кВ} / \text{м}$) определяется следующим соотношением [9]

$$E_N = P_N^e + 20 \log_{10} f + B - 95$$

где f – частота в МГц, приведена в табл. 1 в $\mu\text{кВ} / \text{м}$ для частотной полосы 300 Гц и при условии, что источником шума является только атмосферная компонента. Таким образом, среднее значение напряженности поля шумов составляет $\sim 0,2 \mu\text{кВ} / \text{м}$, откуда легко определить и соотношение сигнал/шум, как

$$SNR = 20 \cdot \log_{10} (E_s / E_N)$$

Для конкретного момента времени 03:30 UT 17.11.2002 это соотношение с учетом поляризационного фактора [7] имеет величину ~ 25 дБ. Это довольно высокое соотношение и поэтому спектр мощности и выглядит достаточно качественным (рис. 1). Оно также и близко к неким условным единицам измерения уровня сигнала в [2] (рис. 5), которые по своему характеру отражают уровень сигнала над шумами.

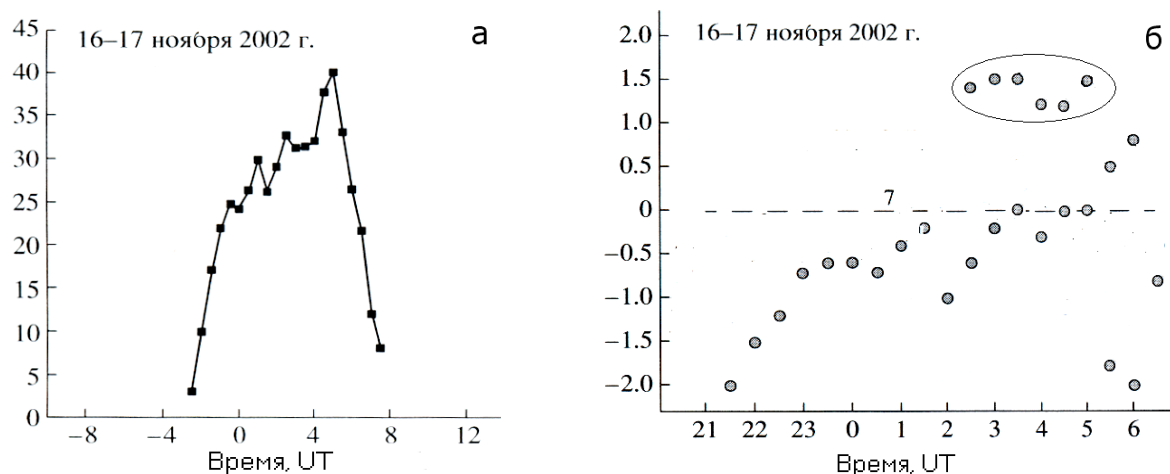


Рис. 5. Временной ход уровня радиосигнала 4996 кГц Москва (РВМ) в дБ (а) и вариации доплеровского смещения частоты (Гц) на ст. «Академик Вернадский» 16-17 ноября 2002 г. Выделена область существования доплеровских смещений частоты «терминаторных» мод.

Доплеровское смещение частоты. Для времени 03:30 UT оценим доплеровские смещения частоты для проходящих по короткому плечу мод через фазовый путь

$$f_D = -\frac{1}{\lambda} \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

где P – фазовый путь, а λ – длина волны. Для этого нужно вычислить приращение фазового пути за некоторый интервал времени, например, 3 мин. Для корректной оценки производной фазового пути необходимо его рассчитывать в краевой задаче с высокой степенью точности по дальности, т.е. погрешность попадания в заданную точку должна быть значительно меньше длины волны. Здесь точность пристрелки составляла ~ 1 м при длине волны 60 м. Доплеровские смещения частоты для мод волнового поля прямого сигнала (рис. 3,б) различаются незначительно и лежат в диапазоне 0,1-0,15 Гц. Величина смещения растет по порядку моды. Физически, как представляется, положительное смещение частоты связано с предутренним ростом электронной концентрации. Таким образом, волновое поле сигнала прямого прохождения формирует первый пик спектра мощности – рис. 2,а, что совпадает с результатами интерпретации в [1] методом адиабатического инварианта. Малость модовой девиации доплеровского смещения частоты отражается и в структуре спектра – при имеющемся разрешении она выглядит как единая уширенная линия.

В работе [2] второй пик в спектре мощности (рис. 2) интерпретируется как прохождение сигнала по обратному (длинному) пути дуги большого круга. Однако при более тщательном анализе возникают определенные сомнения в адекватности такой интерпретации. Прежде всего, вызывает настороженность то обстоятельство, что интенсивность обратного сигнала больше, чем прямого, хотя разница в расстояниях составляет ~ 8000 км и прохождение осуществляется по освещенной зоне, т.е. со слоем E (рис. б). Как можно видеть из приведенного выше примера (рис.1), в условиях освещенности и существенной неоднородности электронной плотности вдоль радиотрассы не удается регистрировать данную частоту даже расстояниях ~ 4000 км. Можно предположить, что имеет место захват в ионосферный E-F2 канал на восходящем участке критической частоты слоя E (рис. б) и, таким образом, волна на большей части пути не попадает в поглощающие слои ионосферы. Однако имеется еще одно обстоятельство – при распространении в фазе снижения

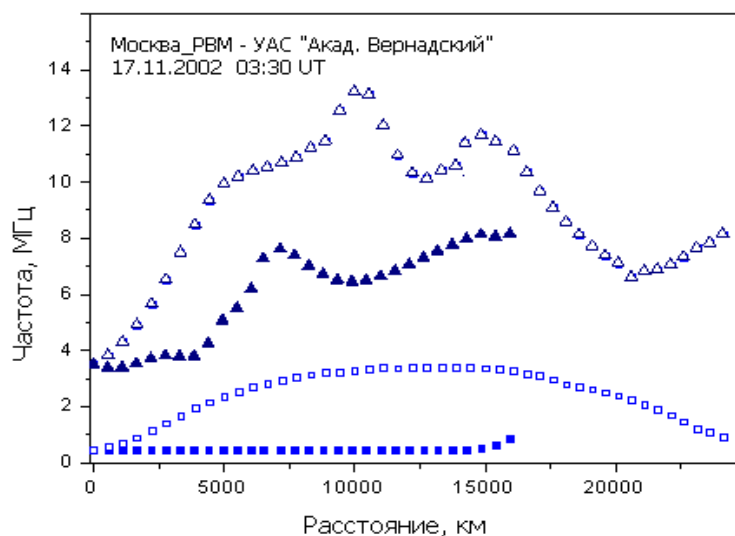


Рис. б. Зависимость плазменных частот в максимумах слоев E и F2 по короткой (сплошные квадратики – E и треугольники – F2) и длинной дугам большого круга для момента времени 03:30 UT 17.11.2002.

электронной концентрации в вечернем секторе времени доплеровский сдвиг частоты должен бы быть отрицательным вследствие увеличения фазового пути. Подобная ситуация наблюдается в интервале 22:00-24:00 UT (рис. 5,б), когда быстрое уменьшение освещения терминальной части радиотрассы в Антарктиде (рис. 4) приводит к большим отрицательным смещениям частоты. А поскольку дополнительный механизм распространения, реализующийся в интервале 03:00-05:00 UT, характеризуется заметным положительным смещением частоты (отмечен овалом на рис. 5,б), эта гипотеза себя не оправдывает. Другим, более вероятным, с нашей точки зрения, способом переноса энергии, способным сформировать второй пик в спектре, могут быть моды, проходящие в прямом направлении под небольшим углом к фронту набегающего утреннего терминатора и испытывающие горизонтальную рефракцию на перепаде электронной плотности. В этом случае смещение частоты должно быть положительным и довольно высоким, а также возможен эффект фокусировки поля за счет различного действия поперечного градиента электронной концентрации в области терминатора на моды разных порядков. Расчет таких мод, в общем случае, требует решения полной трехмерной задачи прохождения радиоволн в глобальной модели ионосферы (используемый здесь метод возмущений дает возможность только уточнить базовое двумерно-неоднородное приближение).

На основе физических представлений можно предположить, что доплеровский сдвиг частоты «терминаторных» мод в основном будет определяться движением терминатора. Поэтому попытаемся оценить смещение частоты на основе тех же принципов, что и использованы в [2]: трехмерное приближение адиабатического инварианта, упрощенная аналитическая модель только слоя F2 ионосферы и аналитическое представление переходной области терминатора. Характерный поперечный размер переходной области – 10° . Результаты расчета смещения частоты, как функции дальности, представлены на рис. 7, где синим цветом отображается случай прямого прохождения (кривая 1), а красным (кривая 2) – для моды с учетом горизонтальной рефракции на скачке электронной плотности, порождаемой терминатором. Видно, что смещение частоты в точке приема очень близко к экспериментально наблюдаемой величине (рис. 2) для второго максимума, хотя результаты для прямого прохождения несколько расходятся как с рассчитанными доплеровскими смещениями в модели IRI-2001, так и с экспериментальными (первый пик в спектре).

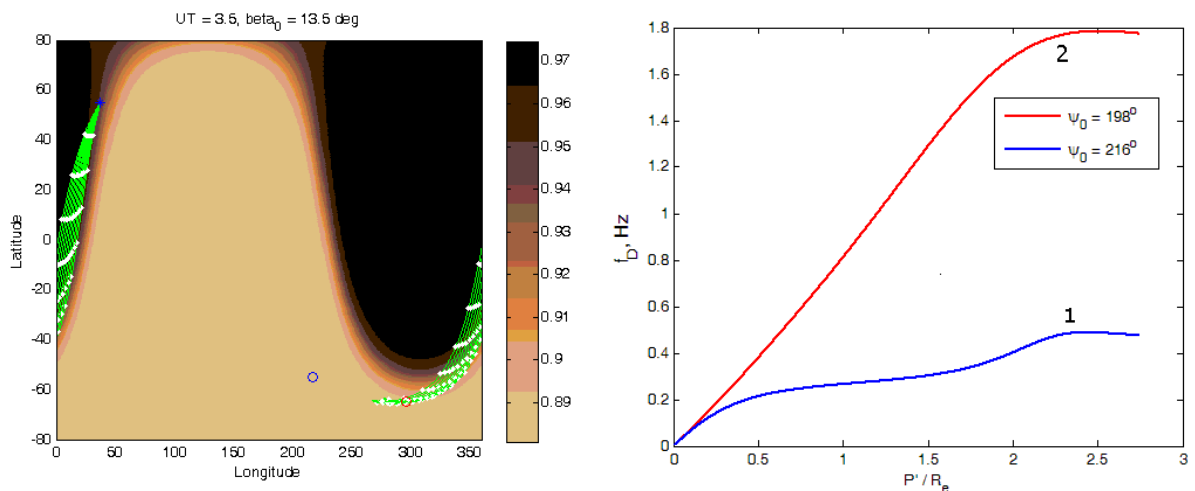


Рис. 7. Проекция лучевых траекторий на поверхность Земли и доплеровские смещения частоты (функции группового пути) для двух способов переноса волнового поля по короткой дуге большого круга для частоты 4,996 МГц 17.11.2002 03:30 UT: прямое прохождение (кривая 1) и с горизонтальной рефракцией на терминаторе (кривая 2).

3. Обсуждение результатов

Результаты доплеровских измерений на антарктической станции «Академик Вернадский» являются уникальными и их интерпретация на основе современных методов ионосферного моделирования и описания распространения радиоволн дает возможность оценить степень их общей обоснованности и достоверности. Особенно это проявляется в регистрации радиоволны низкой частоты 5 МГц, подверженной сильному влиянию как пространственно-временных изменений в электронной концентрации, так наличию вариаций столкновительного поглощения. Существенным обстоятельством также является вопрос выделения сигнала данной частоты из шумов, поскольку, как известно, уровень электромагнитных шумов уменьшается с ростом частоты [9]. В данной работе мы попытались учесть основные факторы, существенные для оценки соотношения сигнал/шум: мощность излучения, усиление передающей и приемной антенн, расходимость, столкновительное поглощение и модельное представление основных компонент электромагнитного шума. Для ионосферы и декаметрового диапазона радиоволн все эти слагаемые имеют существенную неопределенность, которая и приводит, в общем случае, к неопределенности в оценке напряженности поля и параметра сигнал/шум доходящей до ~10 дБ. С учетом данного обстоятельства результаты проведенного анализа качественно и количественно неплохо соответствуют экспериментальным данным. Так, в частности, описывается факт существования временного интервала прохождения – рис. 3,а (эксперимент – рис. 5,а), обусловленный фактором поглощения. Хотя следует отметить, что экспериментальный интервал регистрации сигнала несколько шире, чем полученный в модели. Рассчитанное соотношение SNR для прохождения по короткой дуге (25-28 дБ) близко к измеренному в данное время уровню сигнала (~30-35 дБ, рис. 5,а), хотя и несколько меньше. Понятна физическая причина диффузности второго максимума в спектре (рис. 2) – неоднородность электронной плотности вдоль линии терминатора обуславливает продольную неоднородность поперечного градиента и, следовательно, возможно формирование многолучевости, т. е. в зависимости от начальных условий (углов выхода) «терминаторные» моды по-разному рефрагируют на скачке плотности вблизи линии терминатора. Поскольку смещение частоты «терминаторных» мод, в основном, определяется проекцией горизонтальной скорости перемещения терминатора на плоскость радиотрассы, то имеет место устойчивое значение величины смещения в достаточно продолжительном временном интервале на фоне выраженной динамики основного сигнала (рис. 5). Характерно, что само появление второго пика происходит скачком, т.е. когда «оптическая сила» динамической неоднородности становится достаточной для отражения лучевой траектории и попадания в точку приема. И как видно из проекций лучевых траекторий (рис. 7) имеет место также фокусировка волнового поля «терминаторных» мод, которая по мере приближения терминатора к плоскости радиотрассы становится все более значительной (рис. 5,а) и образует пик практически на терминаторе (рис. 4, правая панель).

4. Заключение

Таким образом, на основе гипотезы о рефракции волны частоты 5 МГц на «ступеньке» электронной плотности, формирующейся в области терминатора, дано физическое объяснение эффекту формирования диффузной спектральной группы в доплеровском спектре сигнала станции РВМ, зарегистрированного в ноябре 2002 г. на антарктической станции «Академик Вернадский». В рамках расширенной глобальной модели ионосферы IRI-2001 и геометрооптического механизма распространения радиоволн исследовано качественное и количественное соответствие как доплеровского смещения частоты мод прямого прохождения (по короткому плечу дуги большого круга), так и, с учетом некоторой неопределенности в оценке напряженности поля, соотношение сигнал/шум. Показано, что измеренное смещение частоты, характер спектра и соотношение сигнал/шум мод пря-

мого прохождения соответствуют расчетным параметрам. Результаты анализа экспериментальных измерений на сверхдальней радиотрассе показывают обоснованность базовых положений прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе доработанной глобальной модели IRI-2001 и расчета поглощения энергии волны через эффективную частоту соударений электронов, что, в свою очередь, повышает достоверность прогноза работы радиолиний ионосферной радиосвязи в декаметровом диапазоне радиоволн.

Признательность. Авторы признательны коллегам из Радиоастрономического института Национальной академии наук Украины, которые провели уникальные экспериментальные исследования на антарктической станции «Академик Вернадский», за дополнительные пояснения и обсуждение полученных результатов.

Литература

1. Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // Геомагнетизм и аэрномия, 2008. Т.48. № 4. С. 526-533.
2. Зализовский А.В., Галушко В.Г., Кашеев А.С., Колосков А.В., Ямпольский Ю.М., Егоров И.Б., Попов А.В. Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах // Геомагнетизм и аэрномия, 2007. Т.47. №5. С. 674-684.
3. Часовитин Ю.К., Широчков А.В. и др. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования. № 44 М.: МГК, 6-13, 1988.
4. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.
5. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для решения на ЭВМ задач распространения электромагнитных волн в неоднородных анизотропных средах // В кн.: Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. М.: Наука, 1971. С.265-279.
6. Айзенберг. Г.З. Коротковолновые антенны. М.: "Радио и связь", 1962. 815 с.
7. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М.: Связь. 1972. 336 с.
8. Spaulding A.D., Stewart F.G. An Updated Noise Model for Use in IONCAP. NTIA Report TR-87-21, 1987. 72 p.
9. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 1987. 240 p.