



ОСОБЕННОСТИ ЧАСТОТНОЙ ЗАВИСИМОСТИ В ЗАДАЧЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РАДИОТРАСС С ПРЕДЕЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТЬЮ ОДНОСКАЧКОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

И. В. Крашенинников

Рассмотрена особенность, в форме глубокого провала, в интегральной частотной зависимости амплитуды волнового поля на классической предельной дальности в 3000 км односкачкового ионосферного распространения радиоволн в условиях низкой солнечной активности. Приведены модельные расчеты в рамках расширенной глобальной ионосферной модели IRI, показывающие высокую степень вероятности формирования данной ситуации в локально дневное время с развитым регулярным E -слоем ионосферы. Анализируются экспериментальные результаты исследований переноса излучения в многочастотном радиозондировании ионосферы с регистрацией провала в частотной зависимости соотношения сигнал/шум — SNR. Показано, что модель ионосферы IRI, в принципе, позволяет воспроизвести провал в интегральной частотной зависимости энергетических параметров волнового поля, но в некоторых условиях приведенных экспериментальных данных дает, в значительной степени, лишь качественное описание данного эффекта. Обсуждаются возможные причины количественного расхождения экспериментальных и модельных результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, МОДОВАЯ СТРУКТУРА, ВОЛНОВОЕ ПОЛЕ, ИОНОСФЕРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ РАДИОВОЛН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Модовая структура волнового поля в краевой задаче односкачкового ионосферного распространения радиоволн определяется следующими базовыми факторами: положением терминальных точек, уровнем солнечной активности и локальным временем в области средней точки радиотрассы. Уже на расстояниях в ~ 500 км сказывается кривизна земной поверхности и она же определяет верхний предел существования максимальных применимых частот отражения от ионосферных слоев — так для мод слоя E ионосферы с характерным высотным максимумом 110 км дальность прохождения не превышает ~ 2300 км. Для $F2$ -слоя ионосферы определен специальный ионосферный параметр — $M3000F2$, который представляет собой отношение $MПЧ(3000)F2/foF2$, где $MПЧ(3000) 1F2$ — максимальная применимая частота односкачкового распространения на дальности 3000 км, $foF2$ — критическая частота [1]. Хотя односкачковая мода $1F2$ может существовать и на расстояниях значительно превышающих 3000 км (при благоприятных условиях до ~ 4500 км), дальность в 3000 км является исторически обоснованным верхним пределом, характеризующим определенную однородность параметров распространения радиоволн, в частности, принципиальное существование нижнего луча и, следовательно, наличие точки смыкания верхних и нижних лучей — $MПЧ 1F2$. Другим важным параметром частотного диапазона прохождения радиоволн на заданное расстояние, характеризующим перенос излучения, является наименьшая наблюдаемая (наименьшая применимая) частота — $ННЧ(НПЧ)$, т.е. частота, на которой физически регистрируется волновое поле

от излучателя (выделяется из фоновых электромагнитных шумов). ННЧ, в отличие от МПЧ, зависит не только от распределения электронной плотности в сечении, определяемом дугой большого круга - радиотрассой, но также от технических средств излучения-приема электромагнитных волн и от поглощения (затухания) энергии волны в ионосферной плазме. По умолчанию предполагается, что в частотном интервале [ННЧ, МПЧ] при условии изотропного излучения и приема суммарное волновое поле существует на любой частоте и, как правило, имеет явно выраженный тренд к монотонному возрастанию его амплитуды вследствие уменьшения поглощения энергии волны с ростом частоты [2, 3]. Также будет возрастание с частотой и соотношения сигнал/шум — SNR (signal to noise ratio), поскольку основная компонента фонового электромагнитного шума — атмосферная уменьшается с ростом частоты [3]. Однако в условиях низкой солнечной активности в локально дневное время суток может реализоваться ситуация, когда как интегральная амплитуда волнового поля, так и SNR могут иметь провал внутри общего частотного интервала прохождения [ННЧ, МПЧ]. На рисунке 1 представлен пример регистрации ионограмм НЗ для одной и того же времени — 16:52 UT и дня года — 14 марта, но в разные годы: с максимумом (2003 г.) и минимумом (2006 г.) солнечной активности. Для марта 2006 г. наблюдается глубокий провал в интегральной частотной зависимости SNR. Это может приводить, в частности, к понижению надежности работы ионосферных радиокommunikационных систем, вследствие попадания рабочих частот в область с неблагоприятными условиями прохождения радиоволн и, как следствие, выходом параметров систем радиосвязи из рабочих характеристик, например, по пороговому соотношению SNR.

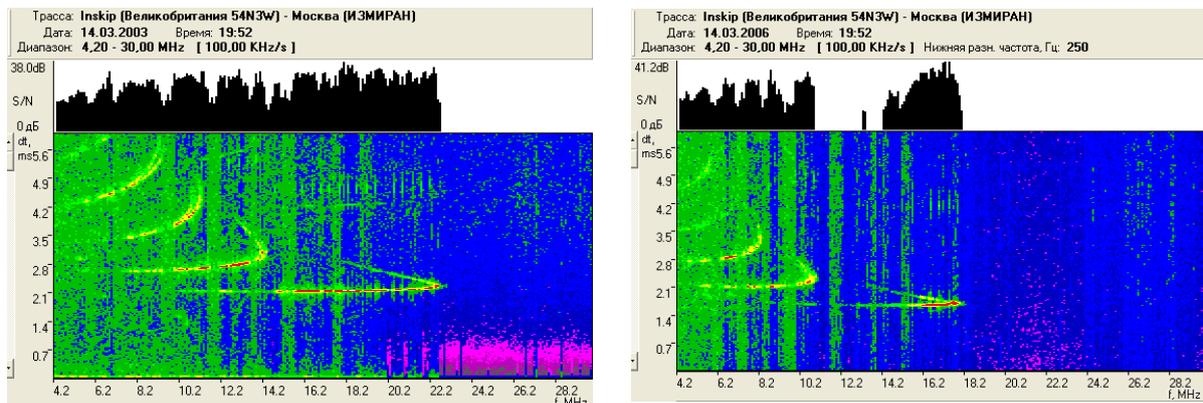


Рис. 1. Модовая структура волнового поля с интегральной зависимостью SNR на р/трассе наклонного радиозондирования ионосферы Инскип(Англия) – Москва(ИЗМИРАН) с дальностью ~ 2500 км при высоком (левая панель) и низком (правая панель) уровнях солнечной активности.

В данной работе на основе расширенной модели IRI анализируются физические аспекты в задаче переноса излучения для дальностей радиотрасс, близких к классической предельной дальности односкачкового распространения радиоволн, при низкой солнечной активности и оценивается способность модели описать такого рода особенность в экспериментальных реализациях частотной зависимости энергетических параметров волнового поля.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Технология моделирования основана на приближении геометрической оптики [4] в двухточечной задаче ионосферного распространения радиоволн и представлении комплексного показателя преломления $n = \mu - i\chi$ [2,5] в виде вещественной и мнимой составляющих. Вещественная часть определяет пространственную расходимость волнового поля, а мнимая, существенно меньшая, поглощение энергии волны в плазме. Для амплитуды поля одной моды решение уравнения переноса имеет вид [4]

$$A(\vec{r}) = \frac{A_0^0}{\sqrt{J}} \sqrt{G_t G_r} \exp \left\{ -k_0 \int_L \chi ds \right\} \quad (1)$$

где A_0^0 — первоначальное значение амплитуды на некоторой поверхности, практически определяемое в милливольтгах на метр на расстоянии в 1 км, мощностью излучения в кВт $A_0^0 = 245\sqrt{P_t}$ [3], $J = \frac{\mu da}{\mu_0 da_0}$ — расходимость лучевой трубки, G_t, G_r — коэффициенты усиления антенн, k_0 — волновое число и $\chi = -\left. \frac{Z}{2\mu} \frac{\partial n^2}{\partial(Z)} \right|_{Z=0}$ — коэффициент поглощения, $X = \omega_N^2 / \omega^2$, $Y = \omega_H / \omega$, $Z = v_e / \omega$, ω_N — плазменная частота, ω_H — гирочастота электронов, v_e — эффективная частота соударений электронов с нейтральными молекулами газов и ионами ионосферной плазмы, L — лучевая траектория, связывающая терминальные точки. Для изотропного случая ($Y=0$) и показателя преломления в форме Эплтона-Хартри коэффициент затухания имеет простой вид, удобный для понимания физических принципов в задаче переноса излучения [2] — $\mu^2 = 1 - X$, $\chi = XZ/2\mu$. Так, погонный коэффициент затухания $\chi \sim 1/\omega^3$ и из (1) следует общий тренд — без учета направленных свойств антенн амплитуда волнового поля растет с частотой.

Общая амплитудно-частотная зависимость поля формируется когерентным или некогерентным суммированием парциальных волновых полей — мод в условиях многомодового прохождения радиоволн. Пример достаточно типичной частотной зависимости энергетических параметров волнового поля при высокой солнечной активности для широтной радиотрассы Инскип (Англия) – Москва (ИЗМИРАН) с дальностью ~ 2500 км [6] приведен на рис. 2 и хорошо видна общая частотная однородность с возрастающим трендом напряженности поля. Для синтезированной ионограммы НЗ выделяются эффекты геометрооптической фокусировки поля на каустиках, соответствующих МПЧ базовых мод. Сложение парциальных полей с учетом фаз приводит к пространственно-временным осцилляциям поля [7] и, как следствие, является причиной осцилляций и в частотной области на фиксированной дальности, что и проявляется в экспериментальной регистрации — энергетике следов на ионограмме НЗ (рис. 1, 2).

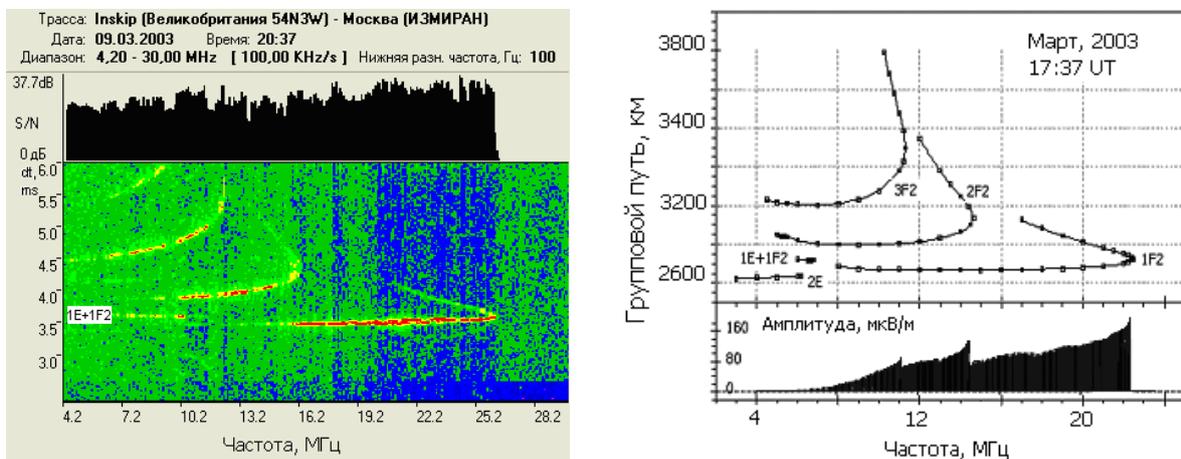


Рис. 2. Энергетические характеристики волнового поля: экспериментальная ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы (левая панель, SNR) и синтезированная в модели СМН-88 [8] (правая панель, амплитуда поля).

В настоящее время наиболее апробированным и используемым источником данных по электронной плотности ионосферной плазмы является глобальная ионосферная модель IRI [8], базовым входным параметром которой является уровень солнечной активности в виде сглаженного числа солнечных пятен. С учетом реформы 2015 г. определения чисел Вольфа в последующем будет использоваться механизм формирования индикатора среднемесячных солнечных данных в виде оптимизированных индексов R_m^s и F_m^s [10], которые для марта месяца максимумов и минимумов двух последних циклов солнечной активности представлены в табл.1 (модельные расчеты, в основном,

проводились для марта месяца — весеннего равноденствия, поскольку в этот период проводились специальные кампании по наклонному радиозондированию ионосферы). Для задачи численного моделирования переноса излучения данная модель была дополнена расчетом эффективной частоты соударений из модели СМИ-88 [9], построенной на основе результатов моделирования эффективной частоты соударений электронов [13] и экспериментальных исследований [14] по поглощению в нижней ионосфере. Такая методика использовалась в [11] в анализе измерений напряженности волнового поля на протяженной радиотрассе Москва (РВМ) — ГК “Леонид Соболев” (Индийский океан) в ~ 8000 км в условиях высокой солнечной активности и показала достаточно уверенное качественное и количественное совпадение экспериментальных и модельных результатов. Параметры главного ионосферного максимума — слоя F_2 задавались базовыми коэффициентами CCIR. Для среднемесячных расчетов в медианной модели IRI управляющий параметр солнечной активности определялся R_m^g — табл. 1.

Таблица 1. Индексы солнечной активности.

Год	Месяц	Rms	Fms	R_m^g	F_m^g
2003	март	118.7	138.3	95.2	143.0
2006	март	27.4	81.2	24.2	82.0
2014	март	114.3	140.8	96.4	145.0
2018	март	9.9	71.9	10.5	72.0

Рассматривались радиотрассы меридионального и широтного направления с дальностями 1500, 2000, 2500 и 3000 км с общим конечным приемным пунктом Москва (ИЗМИРАН) для данных солнечной активности: максимум — 2014 г. и минимум — 2018 г. со среднемесячными параметрами солнечной активности. Синтезированные данные НЗ будут анализироваться далее в адаптированной, для задачи практического прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн, форме представления модовой структуры волнового поля. Базовые лучевые расчеты выполнялись методом характеристик [12] в изотропном приближении показателя преломления. Далее, основываясь на высокой степени подобия магнитоионных ветвей ионограмм НЗ, при выполнении условия $X < 1$ для фиксированного значения группового пути использовалось соотношение для частот: изотропной — f , обыкновенной и необыкновенной — $f_{o,x}$ [15]

$$f^2 = f_{o,x}^2 - \frac{f_T^2}{2} \pm \left(\frac{f_T^4}{4} + f_{o,x}^2 f_L^2 \right)^{1/2}, \tag{2}$$

где f_L и f_T — продольная и поперечная составляющие гирочастоты электронов $f_H = \omega_H / 2\pi$ на направление волнового вектора в средней точке радиотрассы с учетом высоты слоя и углов прихода в приближении тонкого отражающего слоя [2]. Предполагается, что энергия волны для частот $f_{o,x}$ распределяется поровну. Интегральная амплитуда волнового поля на заданной частоте находится некогерентным суммированием амплитуд парциальных полей, а соотношение SNR вычисляется по технологии [15], на основе медианной модели среднеквадратичной напряженности поля фоновых электромагнитных шумов.

Для локального полуденного времени в приемной точке — Москва (ИЗМИРАН) синтезированные ионограммы НЗ для радиотрасс канонической предельной дальности односкачкового распространения в условиях высокого (левые панели) и низкого (правые панели) уровней солнечной активности для радиотрасс, имеющих чисто меридиональное и широтное направления, представлены на рис. 3. Вычисления выполнялись со следующими исходными параметрами: мощность излучения 1 кВт, частотная полоса для оценки среднеквадратичной напряженности поля фоновых электромагнитных шумов [3] — 2.6 кГц (типичная для узкополосных систем радиосвязи), ненаправленное излучение — $G_t = G_r = 1$ и некогерентное суммирование амплитуд полей парциальных мод. Видно, что для низкой солнечной активности имеет место общее свойство — значительно уменьшается перекрытие частотных интервалов мод 1F2 и 2F2 и для широтной радиотрассы

формируется выраженный провал в интегральной частотной зависимости SNR (рис. 3, правая панель). В приведенном примере южная меридиональная направленность радиотрассы дает минимальную продольную неоднородность электронной компоненты ионосферной плазмы. Для более неоднородного широтного направления в это же время провал в амплитуде поля выражен более отчетливо. Из рисунка 3 также можно видеть, что при низкой солнечной активности имеет место снижение ННЧ. Этот эффект связан с уменьшением электронной плотности n_e в слоях E и D ионосферы при понижении числа солнечных пятен, а поскольку эффективная частота соударений электронов ν_e крайне слабо зависит от уровня солнечной активности (через плотность нейтральной атмосферы), то вклад поглощения, определяемый соотношением $n_e \nu_e / \mu$, уменьшается.

Рисунок 4 иллюстрирует фактор дальности радиотрассы в переносе излучения — провал в амплитудно-частотной зависимости волнового поля отчетливо связан с отсутствием односкачкового отражения от регулярного слоя E ионосферы, т. е. он проявляется для дальностей превышающих ~ 2300 км и определяющим поглощением в нижней части ионосферы. Другим важным фактором формирования глубокого провала является наличие продольного градиента электронной плотности на радиотрассе, что можно видеть из рис. 5, на левой панели которого представлен случай, когда солнечный терминатор находится внутри радиотрассы и имеет место сильный продольный градиент по E-слою ионосферы (ввиду большой частоты столкновений релаксация слоя E происходит значительно быстрее, чем слоя F2). Продольная неоднородность E-слоя приводит к деформации и асимметрии лучевых траекторий и, как следствие, к смещению (увеличению) нижней границы частотного диапазона моды 1F2 (наименьшая частота определяется нулевым углом возвышения для лучевой траектории в одной из терминальных точек радиотрассы — иллюстрируется рис. 8). В результате формируется разрыв частотных интервалов 1F2 и 2F2, в котором, практически, отсутствует волновое поле. Следует отметить, что в данном случае отсутствие волнового поля является чисто геометрическим следствием сильно неоднородной среды, а не обусловлено поглощением в нижележащих областях ионосферы.

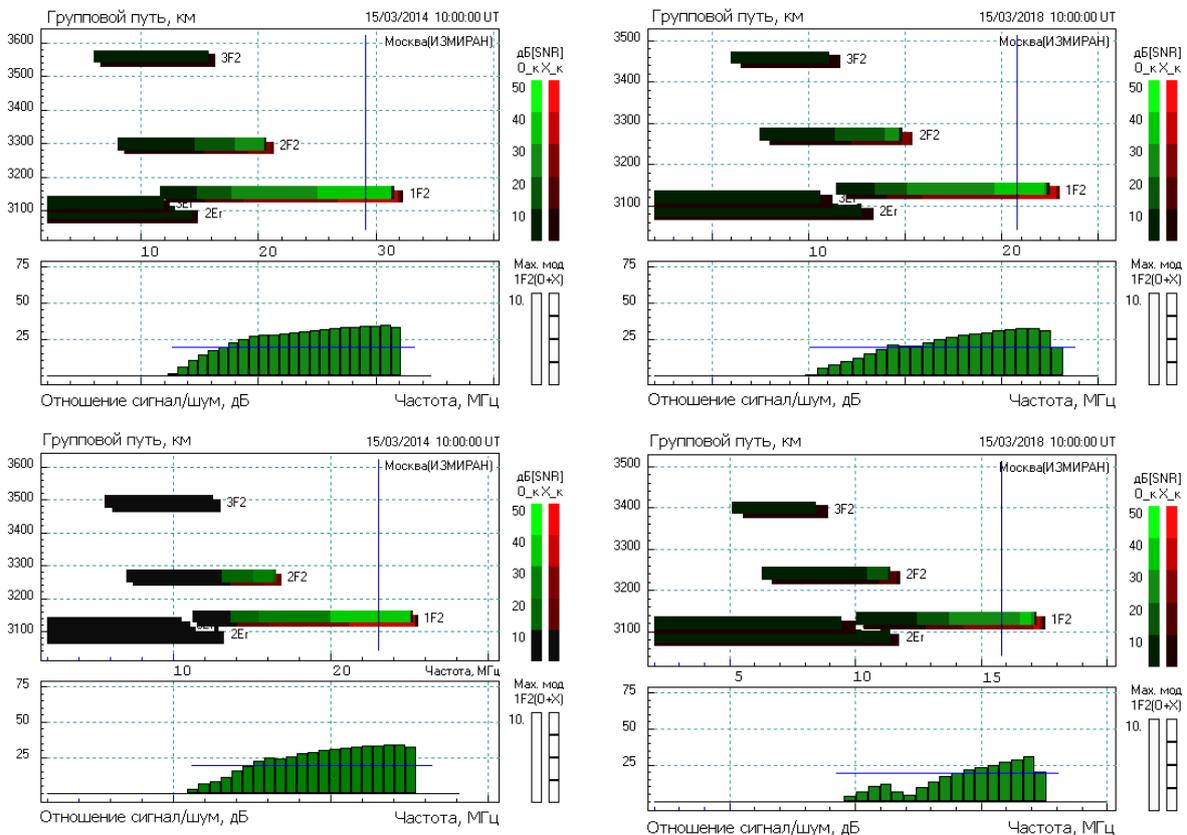


Рис. 3. Модовая структура волнового поля на дальности 3000 км южного меридионального (верхние панели) и западного широтного (нижние панели) направления в модели IRI для 10:00 UT в условиях высокой ($R_{ms} \sim 110$, март, 2014, левые панели) и низкой ($R_{ms} \sim 10$, март, 2018 г., правые панели) солнечной активности.

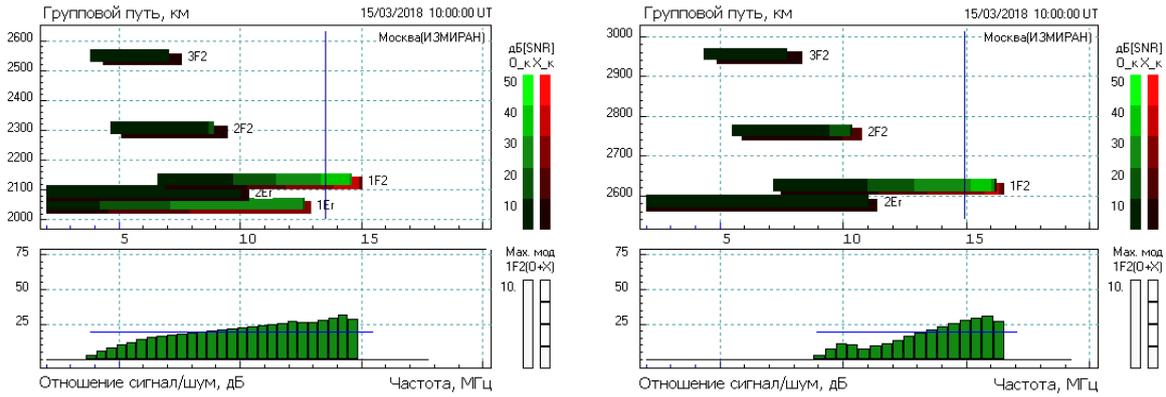


Рис. 4. Модовая структура волнового поля для дальностей: 2000 (левая панель) и 2500 (правая панель) при низкой солнечной активности 15.03.2018 10:00 UT, рассчитанная в медианной модели IRI.

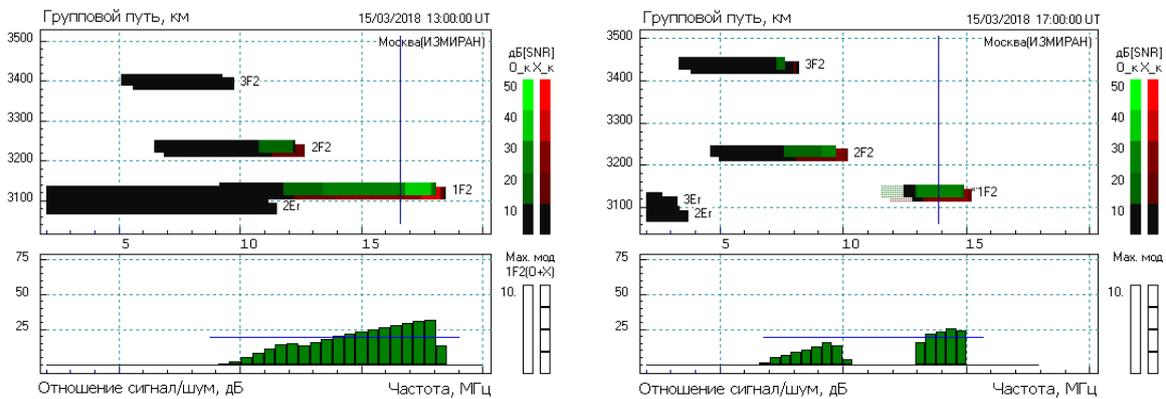


Рис. 5. Модовая структура волнового поля для дальности 3000 км широтного (западного) направления: 13:00 UT (левая панель) и 17:00 UT (правая панель) при низкой солнечной активности 15.03.2018 и прохождением вечернего терминатора по радиотрассе.

3 ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ

Можно выделить три основных физических фактора, определяющих возникновение провала в частотном диапазоне переноса излучения для больших дальностей односкачкового распространения радиоволн. Это: *а)* кривизна земной поверхности, *б)* значительно большее проявление уровня солнечной активности в параметрах слоя *F2* по сравнению со слоем *E* и *в)* влияние нижележащей электронной плотности, включая переходную область *E-F*, на формирование нижней границы моды *1F2*. Фактор продольной неоднородности электронной плотности по радиотрассе является способствующим, но не определяющим в появлении энергетического провала в частотной зависимости амплитуды волнового поля в двухточечной задаче.

Геометрически максимальная дальность радиотрассы D_{max} связана с высотой отражения для тонкого слоя следующим соотношением [2]:

$$D_{max} = 2r_e \arccos \frac{r_e}{r_e + h}, \quad (3)$$

где r_e — радиус Земли, h — высота отражения над земной поверхностью. Для слоя *E* ионосферы имеет место практически зеркальное отражение радиоволн и для высот 105 и 110 км максимальная дальность составляет $\sim 2300 - 2350$ км, что соответствует результатам моделирования (рис. 4) и экспериментальным данным (рис. 1,2), показывающим отсутствие видимого следа моды *1E1* (однократное отражение от регулярного слоя *E*) на дальности 2500 км. Для *F2*-слоя ионосферы соотношение (3) дает заниженные оценки, поскольку для него уже характерно рефракционное

отражение и для высоты $hmF2 \sim 250$ км, обычной для дневного времени, предельная дальность составляет ~ 3500 км. Однако реальное односкачковое прохождение декаметровых радиоволн может быть существенно дальше. Как можно видеть из рис. 6, на ионограмме НЗ при разносе терминальных пунктов на ~ 4200 км устойчиво существует след моды $1F2$, хотя и образованный только верхними лучами, отражающимися на высотах в окрестности максимума слоя $F2$. Увеличение продольной неоднородности с течением времени приводит к ослаблению волнового поля моды $1F2$ (рис. 5, правая панель) вследствие возрастания расходимости. (Всплески SNR в частотной области существования $1F2$ в 11:00 UT, по-видимому, обусловлены фокусирующим действием проходящей внутренней акустико-гравитационной волны – АГВ).

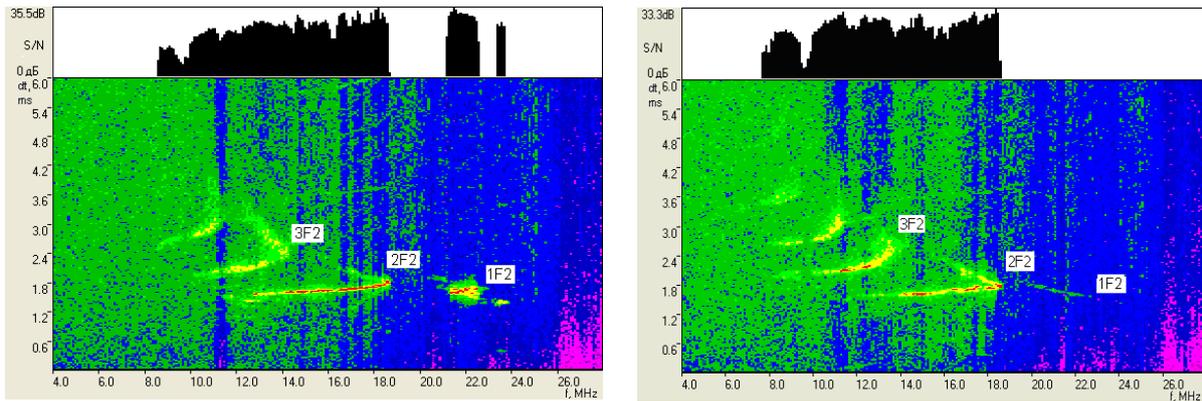


Рис. 6. Модовая структура волнового поля для дальности ~ 4200 км Иркутск(ИСЗФ)-Москва(ИЗМИРАН) 08.09.2011 11:00 UT (левая панель) и 12:45 UT (правая панель).

Для представленного на рис. 3 случая отношение $foF2$ к foE для 10:00 UT в общей точек радиотрасс (ИЗМИРАН) в максимуме (март, 2014 г.) и минимуме (март, 2018 г.) солнечной активности составляет ~ 1.6 и ~ 1.1 , что проявляется в МПЧ – разность для моды $1F2 \sim 6\text{--}8$ МГц, а для моды $2Er \sim 1$ МГц. Следует отметить, что для моды $1F2$ увеличение МПЧ не пропорционально увеличению плазменной частоты в максимуме слоя $F2$ — для $foF2$ отношение составляет ~ 1.55 , а для МПЧ $1F2$ оно гораздо меньше ~ 1.25 . Это объясняется особенностями формирования МПЧ на больших дальностях, в частности, она определяется $Ne(h)$ -профилем во внутренней части слоя $F2$ ионосферы, где различие в электронной плотности для максимума и минимума солнечной активности существенно меньше, чем в максимуме слоя. Слой E ионосферы для дальностей, превышающих ~ 2300 км, проявляется как “полутемное” образование — при двойном отражении от него след на ионограмме НЗ сильно ослаблен и, как правило, не регистрируется, но он продолжает оказывать большое влияние как на значение нижней границы, так и на амплитуду волнового поля проходящей моды $1F2$, особенно для частот вблизи нижней границы ее существования. Большие потери энергии волны на частотах в окрестности нижней границы $1F2$ связаны с уменьшением показателя преломления при прохождении максимума слоя E и они возрастают с дальностью радиотрассы. Существенное уменьшение МПЧ моды $2F2$ и, практически, инвариантное значение минимальной частоты $1F2$ из-за слабой вариации слоя E от регулярного ионизирующего солнечного излучения приводит к меньшему перекрытию мод $1F2$ и $2F2$ (рис. 3) и, как следствие, к формированию провала в интегральной энергетике волнового поля при низком уровне солнечной активности. Уменьшение вещественной части показателя преломления на высотах E -слоя ионосферы приводит также к искривлению лучевой траектории, что можно видеть на рис. 9 (отмечено кружочком).

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности в амплитудно-частотной зависимости волнового поля для радиотрасс с дальностями близкими к предельной дальности односкачкового прохождения декаметровых радиоволн рассмотрим на двух примерах: данных наклонного радиозондирования ионосферы с технологией ЛЧМ-сигнала и регистрации интегрального информационного сигнала в сканирующем режиме работы узкополосной системы радиосвязи. Первый случай, как и результат, приведенный на рис. 1,2 получен на той же широтной радиотрассе Инскип (Англия) – Москва (ИЗМИРАН) 19:37 МДТ

06.03.2006 г (16:37 UT) — рис. 7 (левая панель) в условиях прохождения вечернего терминатора. Среднемесячные сглаженные индексы солнечной активности для данного месяца — $R_{ms} \sim 27$ и $F_{10.7ms} \sim 81$. Для 06/03/2006 дневной индекс $F_{10.7} = 73$, а K_p -индекс ~ 2 . Расчет ионограммы НЗ выполнялся с теми же начальными параметрами, что и в численном моделировании, но с антеннами — вертикальный вибратор [16], диаграмма направленности которых близка к изотропной для характерных для данной радиотрассы углов прихода. На экспериментальной ионограмме НЗ наблюдается глубокий провал SNR в частотной области за МПЧ 2F2, а в синтезированной ионограмме ему соответствует только относительно небольшой спад, хотя сами области существования базовых мод достаточно хорошо совпадают. Измерения и анализ энергетических характеристик волнового поля представляют собой значительно более сложную экспериментальную задачу по сравнению, например, с измерениями группового запаздывания зондирующих сигналов. Связано это, в первую очередь, со сложностью учета характеристик приемных и передающих антенн, значительной неопределенностью эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме и, также, в данном случае, со спецификой используемого ЛЧМ-сигнала, т.е. с корректным учетом как эффективной мощности излучения, так и его частотной полосы. Поэтому в данном примере можно говорить, главным образом, только о качественном сравнении результатов и принципиальной возможности модели ионосферы и механизма распространения радиоволн показать формирование немонотонности в частотном ходе энергетика волнового поля.

Во втором примере, на радиотрассе восточного направления от ИЗМИРАН с дальностью ~ 3100 км, радиозондирование ионосферы осуществлялось практически монохромным сигналом с известными техническими параметрами приемно-передающего оборудования. На рис. 8, левая панель, представлен усредненный результат регистрации уровня информационного сигнала в сканирующем узкополосном режиме работы системы связи в диапазоне 10-20 МГц также в условиях прохождения вечернего терминатора по радиотрассе. Усреднение выполнено по 7-ми реализациям. Амплитуда информационного сигнала показывает превышение полезного сигнала над помехами, определяет эффективность передачи информации и, в общем аспекте, отражает базовое соотношение сигнал/шум, хотя и имеет несколько более сложную природу в условиях многомодового прохождения радиоволн. Так, в частности, можно видеть спадание данного параметра к МПЧ 2F2, вместе с увеличением амплитуды волнового поля на верхней ветви следа данной моды и всплеск на частоте смыкания ветвей для необыкновенной компоненты, когда, в данной ситуации, реализуется одномодовый режим. Рассчитанные условия прохождения радиоволн с техническими параметрами радиокommunikационной системы и среднемесячными параметрами солнечной активности для апреля 2017 г. в модельном представлении ионосферы отражены на правой панели рис. 8 и можно видеть качественное и, в значительной степени, количественное соответствие расчетов экспериментальным данным. В частности, имеет место существование глубокого провала в модельной амплитудно-частотной зависимости, частотный интервал которого очень близок к экспериментальному результату.

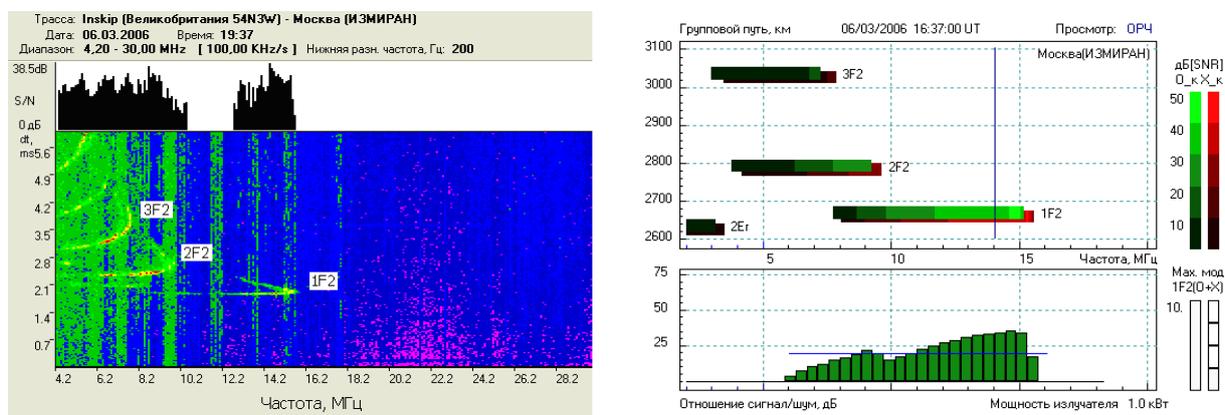


Рис. 7. Амплитудно-частотная зависимость волнового поля (SNR): экспериментальная ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы 06.03.2006 16:37 UT (верхняя панель) и синтезированная в модели IRI (нижняя панель).

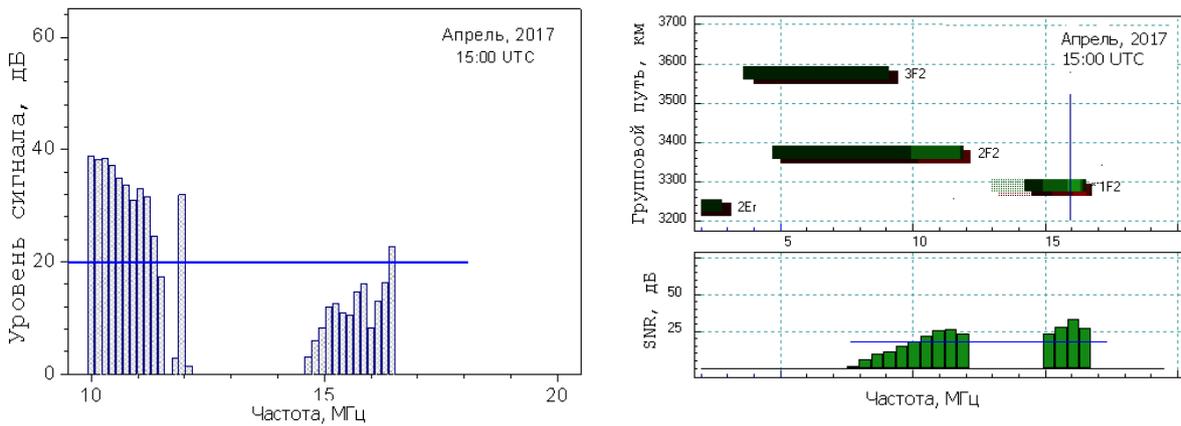


Рис. 8. Экспериментальные (усредненные) результаты работы радиокommunikационной системы в режиме частотного сканирования диапазона 10–20 МГц (левая панель) и синтезированная ионограмма НЗ в модели IRI (правая панель) апрель 2017 г.

5 ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как следует из представленных выше результатов, практическое отсутствие волнового поля в некотором интервале внутри общего частотного диапазона прохождения радиоволн может быть обусловлено двумя причинами: чисто геометрическим ограничением снизу или (и) их большим затуханием в ионосферной плазме нижележащего слоя. На экспериментальной ионограмме НЗ достаточно хорошо наблюдается слабый трек моды 1F2 в области энергетического провала, а нижняя граница следа в синтезированной ионограмме близка к данным радиозондирования (~ 8 МГц). Можно заключить, что в данном случае провал в экспериментальной АЧХ обусловлен большими потерями энергии волны в нижележащем слое E ионосферы. Характер проявления “полутемного” слоя E в модели IRI в изотропном приближении иллюстрируется на рис. 9 для двух частот проходящей моды 1F2: вблизи нижней границы — 8752 кГц (кривые 1) и вблизи МПЧ — 14911 кГц (кривые 2). Величина минимальной частоты определяется нулевым значением угла возвышения в одной из терминальных точек радиотрассы — в данном случае на приемном конце (рис. 8, правая панель, кривая 1). Видно, что для частот вблизи нижней границы частотного интервала моды 1F2 как интегральный показатель поглощения $k_0 \int_L \chi ds$, так и лучевая траектория L испытывают сильное влияние слоя E ионосферы, в

частности, поглощение энергии волны происходит, главным образом, при его прохождении (рис. 8, левая панель). При этом, двукратное отражение от слоя E, практически, забирает все энергию моды 2Er — хотя ее след принципиально существует, но энергетически совсем не проявляется как в экспериментальной, так и в синтезированной ионограммах (рис. 7). Из данных моделирования следует, что для формирования более выраженного провала в частотной зависимости амплитуды поля необходимо более высокое поглощение для проходящей через слой E ионосферы моды 1F2 в нижнем частотном диапазоне ее существования. Одной из возможных причин недостаточности ионосферной модели IRI в данной ситуации можно рассматривать ее частную модель для слоя E и, в частности, параметры его максимума.

Как известно, высота максимума hmE в профиле электронной плотности модели IRI жестко установлена на 110 км (как и полутолщина – 10 км), а в реальности она может варьироваться и, в частности, доходить до 120–125 км. Особенно возрастание hmE характерно для локального утренне-вечернего времени суток в период интенсивного изменения электронного содержания, что в совокупности с увеличением полутолщины слоя должно приводить к возрастанию проходимого пути в данном слое ионосферы, особенно для низких углов возвышения. В результате должно бы возрастать поглощение (рис. 9) и, следовательно, уменьшаться напряженность волнового поля в нижней части частотного диапазона однокачковой моды 1F2. Эти предположения подтверждаются обсерваторскими результатами на ст. ИЗМИРАН — усредненная среднемесячная зависимость экспериментальных параметров максимума слоя E в режиме ручной обработки ионограмм и восстановления $Ne(h)$ -профиля для марта 2017 г. приведена на рис. 10.

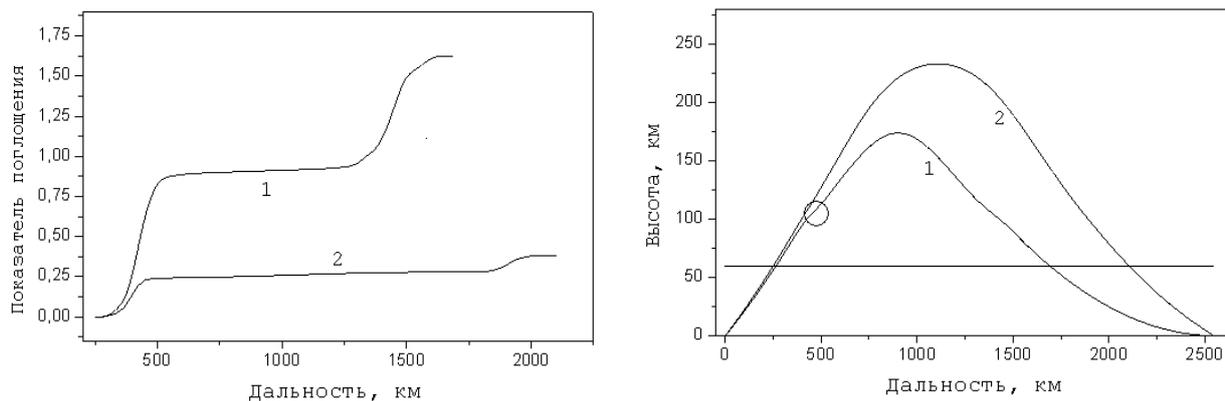


Рис. 9. Интегральный показатель поглощения (левая панель) вдоль лучевых траекторий (правая панель), соответствующих минимальной и максимальной частотам моды $1F2$ в модели IRI для данных радиозондирования 06.03.2006 г. 16:37 UT. Кружочком выделена локальная деформация лучевой траектории для минимальной частоты при прохождении E -слоя ионосферы.

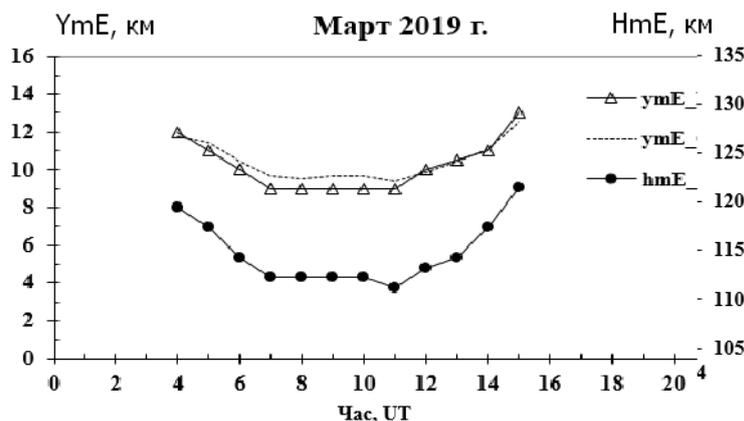


Рис. 10. Суточный ход высоты и полутолщины слоя E ионосферы по станции ИЗМИРАН для марта 2019 г.

Другой, теоретически возможный фактор, способный повлиять на энергетику волны, рассматривается в работе [17], где показано, что поглощение в E - и D -областях для проходящих радиоволн возрастает при использовании обобщенного показателя преломления (мнимой части) в форме, предложенной Sen and Wyller [18]. Утверждается, что данное представление более корректно для описания влияния нижней ионосферы на поглощение проходящей радиоволны, чем соотношение Эпплтона–Хартри.

Поглощение также будет возрастать с увеличением электронной плотности в E -слое ионосферы (возрастает зенитный угол Солнца) с приближением к летнему сезону, что можно видеть в результатах для апреля месяца на рис. 8, где дальность и продольная неоднородность уже достаточны для формирования провала вследствие геометрооптического ограничения проходящей моды $1F2$. Для летних месяцев появление провала в частотном ходе энергетических параметров волнового поля на дальностях односкачкового прохождения, особенно широтного направления, превышающих 2500 км, в условиях низкой солнечной активности будет являться уже высоковероятным событием.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты численного моделирования и анализ экспериментальных данных показывают, что в периоды минимума солнечной активности для радиотрасс с дальностями, близкими к канонической предельной дальности для односкачкового распространения, значительно возрастает вероятность образования глубокого провала в амплитудно-частотной зависимости волнового поля при наличии

выраженного слоя E ионосферы. Особенно данный эффект характерен для радиотрасс широтного направления во время прохождения терминатора, т.е. при максимальной продольной неоднородности электронной плотности ионосферной плазмы. Данная особенность может служить хорошим индикатором достоверности модельных представлений ионосферы, в особенности, эффективной частоты соударений электронов, а в практическом аспекте может приводить, в частности, к понижению надежности работы ионосферных радиокommunikационных систем, вследствие возможного попадания рабочих частот в полосу энергетического провала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с англ. второго издания “URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction” под ред. Н.В. Медниковой. М., Наука. 342 с. 1978.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М., Мир, 1973. 502 с.
3. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 240 p. 1987.
4. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред, М., Наука, 304 с., 1980.
5. Ratcliffe J.A. The magnetoionic theory and its applications to the ionosphere. Cambridge: Cambridge University Press. 206 p. 1959.
6. Крашенинников И.В., Егоров И.Б. Формирование комбинированных модов в ионосферном прохождении радиоволн // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 45. № 2. С. 241–244. 2005.
7. Крюковский А.С., Скворцова Ю.И. Применение теории катастроф для описания пространственно-временной структуры частотно-модулированного сигнала в плазме // Электромагнитные волны и электронные системы. Т. 18. № 8. С. 18–23. 2013.
8. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V.15. P. 418–429. doi:10.1002/2016SW00159. 2017.
9. Часовитин Ю.К., Широчков А.В., Беспрозванная А.С. и др. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования, 1988. № 44 М.: МГК, С. 6-13.
10. Крашенинников И.В., Павлова Н.М., Ситнов Ю.С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрoномия, 2017. Т. 57. № 6. С. 774–782.
11. Крашенинников И.В. Модель IRI в задаче оценки энергетических характеристик волнового поля в ионосферном распространении радиоволн // Гелиогеофизические исследования, выпуск 17, ИПГ, Москва, 2018. С. 1-6.
12. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задачи распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде // Радиотехника и электроника. Т. 14. № 9. С. 1673–1677. 1969.
13. Banks P.M. Collision frequencies and energy transfer // Planet. Space Sci. V.14. N. 11. P. 1085–1103. 1966.
14. Данилкин Р. П., Денисенко П. Ф., Водолазкин В. И. и др. Эффективная частота соударений электронов в E-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 18. № 1. С. 154–160. 1978.
15. Крашенинников И.В., Гвишвили Г.В., Стаханова И.Г. Оценка критической частоты в задаче радиопросвечивания ионосферы с высокоорбитальных космических аппаратов в арктическом регионе // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 58. № 5. С. 669–675. 2018.
16. Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. М.: “Радио и связь”, 1962. 815 с.
17. Zawdie K. A., Drob D. P., Siskind D. E., Coker C. Calculating the absorption of HF radio waves in the ionosphere // Radio Sci. V. 52. P. 767–783. doi:10.1002/2017RS006256. 2017.
18. Sen H. K. and Wyller A. A. On the generalization of the Appleton-Hartree magnetoionic formulas, J. Geophys. Res., 65, 3931–3950, doi:10.1029/JZ065i012p03931. 1960

FEATURES OF FREQUENCY DEPENDENCE IN THE ENERGY TRANSFER PROBLEM FOR RADIO PATHS NEAR SINGLE-HOP LIMITING DISTANCE IN THE CONDITIONS OF LOW SOLAR ACTIVITY

Krashennikov I.V.

Formation the feature, in a form of deep trough, in frequency dependence of the wave field strength for single-hop paths with distances near classical limiting distance 3000 km at low level of solar activity was considered. Model calculations within the framework of the extended global ionospheric IRI model show high probability for appearing such situation in the local daytime with a developed regular E-layer of the ionosphere. Some experimental results in multifrequency radio sounding of the ionosphere with a registration of the deep trough in frequency dependence of signal-to-noise ratio (SNR) were analyzed. It is shown that the IRI model, in principle, makes it possible to reproduce this peculiarity in the wave field energy parameters, but in some cases of experimental data, to a large extent, is able to provide only a qualitative description of this effect. Possible reasons for the quantitative discrepancy between experimental and model results are discussed.

KEYWORDS: IONOSPHERE, IONOSPHERIC RADIO WAVE PROPAGATION, MODE STRUCTURE, WAVE'S FIELD, IONOSPHERIC ABSORPTION OF RADIO WAVES