

УДК 621.371/372

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ НА ПРЕДЕЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ОДНОСКАЧКОВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

© 2020 г. И. В. Крашенинников¹*, В. Н. Шубин¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*e-mail: krash@izmiran.ru

Поступила в редакцию 29.03.2019 г.

После доработки 29.07.2019 г.

Принята к публикации 26.09.2019 г.

Рассмотрена возможность формирования глубокого провала в интегральной амплитудно-частотной зависимости волнового поля на классической предельной дальности односкачкового ионосферного распространения радиоволн в условиях низкой солнечной активности. Расчеты в рамках глобальной ионосферной модели как со стандартным (IRI), так и альтернативным динамическим (IRI + GDMF2) представлением слоя $F2$ ионосферы сопоставлены с экспериментальными результатами многочастотного наклонного радиозондирования ионосферы. Показана принципиальная возможность модельного описания данной особенности в энергетических параметрах задачи переноса излучения в ионосфере.

DOI: 10.31857/S001679402002008X

1. ВВЕДЕНИЕ

Модовая структура волнового поля в краевой задаче ионосферного распространения радиоволн определяется следующими базовыми факторами: положением терминальных точек, уровнем солнечной активности и локальным временем в области средней точки радиотрассы. Уже на расстояниях ~ 500 км сказывается кривизна земной поверхности. Так, для односкачковой моды слоя E ионосферы с характерным высотным максимумом 110 км дальность прохождения не превышает ~ 2500 км. Для $F2$ -слоя определен специальный ионосферный параметр — $M3000F2$ [Руководство, 1978], который представляет собой отношение $MПЧ(3000)F2/foF2$, где $MПЧ(3000)F2$ — максимально-применимая частота на дальности 3000 км, $foF2$ — критическая частота. Хотя мода $1F2$ может существовать и на расстояниях, значительно превышающих 3000 км (при благоприятных условиях до ~ 4500 км), дальность 3000 км является исторически обоснованным верхним пределом, характеризующим определенную однородность параметров ионосферного распространения радиоволн. В частности, имеет место принципиальное существование нижнего луча и, следовательно, наличие точки смыкания следов верхних и нижних лучей — $MПЧ 1F2$. Другим важным параметром частотного диапазона прохож-

дения радиоволн на заданное расстояние 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 $MПЧ$, зависит от технических средств излучения—приема электромагнитных волн и от поглощения энергии волны ионосферной плазмой. По умолчанию предполагается, что в частотном интервале [$ННЧ$, $MПЧ$] при условии изотропного излучения и приема волновое поле существует на любой частоте и, как правило, имеет явно выраженный тренд к монотонному возрастанию вследствие уменьшения поглощения энергии волны с ростом частоты [Дэвис, 1973]. Также будет иметь место возрастание с частотой и соотношения сигнал/шум — SNR (signal to noise ratio), поскольку основная компонента фонового электромагнитного шума — атмосферная, уменьшается с ростом частоты [Maslin, 1997]. 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 [$ННЧ$, $MПЧ$] на дальностях, близких к канонической предельной дальности. Данное обстоятельство

может приводить, в частности, к существенному понижению надежности работы ионосферных радиокommunikационных систем, поскольку рабочие частоты могут попасть в интервал с неблагоприятными энергетическими условиями прохождения радиоволн.

В данной работе на основе моделирования и экспериментальных данных радиозондирования ионосферы проанализированы физические аспекты в задаче переноса излучения для классической предельной дальности односкачкового распространения радиоволн при низкой солнечной активности, приводящие к формированию глубокого провала в амплитудно-частотной зависимости волнового поля.

2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Технология моделирования основана на приближении геометрической оптики [Кравцов и Орлов, 1980] в двухточечной задаче ионосферного распространения радиоволн и представлении комплексного показателя преломления $n = \mu - i\chi$ [Ratcliffe, 1959; Дэвис, 1973; Budden, 1985] в виде вещественной и мнимой составляющих. Вещественная часть показателя преломления определяет пространственную расходимость волнового поля (затухание), а существенно меньшая мнимая часть – поглощение энергии волны в плазме через столкновительный механизм электронов с ионами и молекулами газов. Для амплитуды поля одной моды решение уравнения переноса имеет вид [Кравцов и Орлов, 1980]

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

где A_0^0 – первоначальное значение амплитуды в милливольтгах на метр на расстоянии в 1 км, определяемое мощностью излучения в кВт;

$A_0^0 = 245 \sqrt{P_t}$ [Maslin, 1987]; $J = \frac{\mu da}{\mu_0 da_0}$ – пространственная расходимость лучевой трубки; G_t, G_r – коэффициенты усиления антенн; k_0 – волновое

число и $\chi = -\frac{Z}{2\mu} \frac{\partial n^2}{\partial(Z)} \Big|_{Z=0}$ – погонный коэффициент

поглощения; $X = \omega_N^2 / \omega^2$, $Y = \omega_H / \omega$, $Z = v_e / \omega$, ω_N, ω_H – циклические плазменная и гирочастоты; v_e – эффективная частота столкновений электронов с нейтральными молекулами газов и ионами в ионосферной плазме, 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 [Дэвис, 1973] – $\mu^2 = 1 - X$, $\chi = XZ / 2\mu$.

Так, погонный коэффициент затухания $\chi \sim 1/\omega^3$, и из выражения (1) следует общий тренд – без учета направленных свойств антенн амплитуда волнового поля растёт с частотой.

Общая амплитудно-частотная зависимость поля формируется когерентным или некогерентным суммированием парциальных волновых полей мод в случае многомодового прохождения радиоволн. Достаточно типичная частотная зависимость энергетических параметров волнового поля при высокой солнечной активности для широтной радиотрассы Inskip (Англия) (53.9° N, 2.8° W) – Москва (ИЗМИРАН) (55.5° N, 37.3° E) дальностью – 2550 км [Крашенинников и Егоров, 2005] приведена на рис. 1. Как на экспериментальной регистрации SNR, так и в синтезированной ионограмме НЗ, хорошо видна общая однородность с возрастающим трендом напряженности поля по частоте. 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 результирующего поля [Kravtsov and Orlov, 1999; Крюковский и Скворцова, 2013] и, как следствие, является причиной осцилляций интегрального волнового поля и в частотной области для фиксированной дальности. Последние проявляются в экспериментальной регистрации частотной зависимости модовой структуры поля – ионограмме НЗ (рис. 1, левая панель).

В настоящее время наиболее апробированным и используемым источником данных по электронной плотности ионосферной плазмы является глобальная ионосферная модель IRI [Bilitza et al., 2017], входным параметром которой является уровень солнечной активности в виде сглаженного числа солнечных пятен (числа Вольфа). С учетом реформы 2015 г. определения чисел Вольфа [Clette et al., 2014] в последующем будет использоваться механизм формирования индикатора среднемесячных солнечных данных в виде оптимизированных индексов R_m^s и F_m^s [Крашенинников и др., 2017], которые для марта и июня месяцев максимумов и минимумов двух последних циклов солнечной активности представлены в таблице 1. Для задачи численного моделирования переноса излучения данная модель была дополнена расчетом эффективной частоты соударений из модели СМН-88 [Часовитин и др., 1988], построенной на основе результатов работы [Banks, 1966] и экспериментальных исследований [Данилкин и др., 1978]. Параметры главного ионосферного максимума – слоя F2 в модели IRI определялись как базовыми коэффициентами

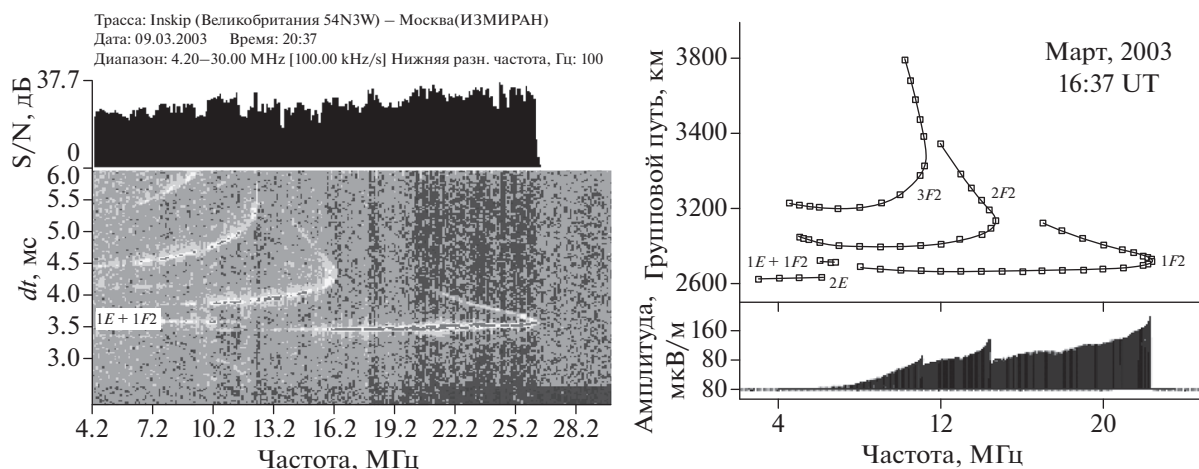


Рис. 1. Энергетические характеристики волнового поля: экспериментальная ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы (левая панель, SNR) и синтезированная в модели СМИ-88 [Часовитин и др., 1988] (правая панель, напряженность поля) для высокого уровня солнечной активности.

CCIR, так и в опциональном режиме – моделью GDMF2 (Global Dynamic Model of the F2 layer) [Шубин и Деминов, 2019] (в дальнейшем модель IRI + GDMF2). Для среднемесячных расчетов в модели IRI управляющий параметр солнечной активности задавался значением R_m^g , а в дневном масштабе в модели IRI+GDMF2 – параметром F_m^g с дополнительным учетом текущих гелиогеофизических данных. Управляющим параметром для IRI+GDMF2 в базовом для данной модели суточном интервале времени является эффективный индекс солнечной активности $FF = [F10.7 + 2F10.7(day, \tau)]/3$, где $F10.7$ – индекс солнечной активности в данный день, а $F10.7(day, \tau)$ – сглаженный интегральный индекс за предыдущие 27 дней [Шубин и Деминов, 2019]. Среднемесячный индекс FF также приведен в таблице и он близок к фактическому среднемесячному значению потока солнечного радиоизлучения F_m в силу близких масштабов интервалов усреднения, но существенно отличается от сглаженных 12-месячным фильтром данных. Исходя из общих методологических принципов медианных моделей в применении к среднемесячному масштабу, в дальнейшем будут использоваться сглаженные оптимизированные индексы.

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 ра-

диоволн, форме представления модовой структуры волнового поля. Базовые лучевые расчеты выполнены методом характеристик [Лукин и Спиридонов, 1969] 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 $-f_{o,x}$ [Крашенинников и др., 2018]

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

где f_L и f_T – продольная и поперечная составляющие гирочастоты $f_H = \omega_H/2\pi$ электронов на направление волнового вектора в средней точке радиотрассы с учетом высоты слоя и углов прихода в приближении тонкого отражающего слоя [Дэвис, 1973]. Предполагается, что энергия волны для частот $f_{o,x}$ распределяется поровну.

Для локального полуденного времени в Москве (ИЗМИРАН) ионограммы НЗ для радиотрассы меридионального направления и канонической предельной дальности односкачкового

Таблица 1. Среднемесячные индексы солнечной активности

Год	Месяц	R_{ms}	F_{ms}	R_m^g	F_m^g	FF_m	F_m
2003	Март	118.7	138.3	95.3	142.9	129.6	132.2
2006	Март	27.4	81.2	24.2	82.0	75.3	75.5
2014	Июнь	114.1	145.5	99.8	148.7	122.6	122.2
2018	Июнь	7.3	70.0	7.9	70.2	72.6	72.5

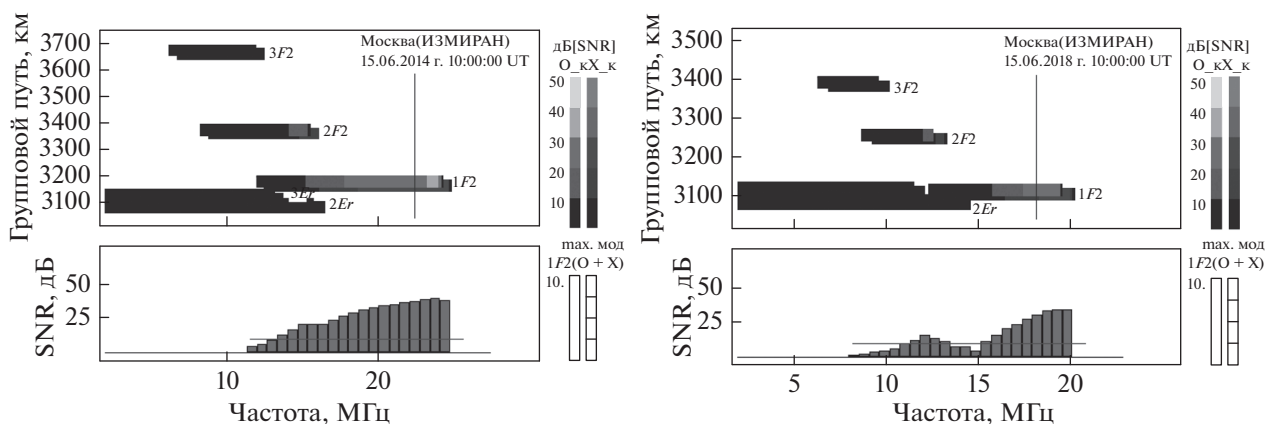


Рис. 2. Частотная зависимость модовой структуры волнового поля и SNR на дальности 3000 км меридионального направления в модели IRI + GDMF2 для 10:00 UT в условиях высокой ($R_{ms} \sim 110$, июнь 2014, левая панель) и низкой ($R_{ms} \sim 10$, июнь 2018, правая панель) солнечной активности.

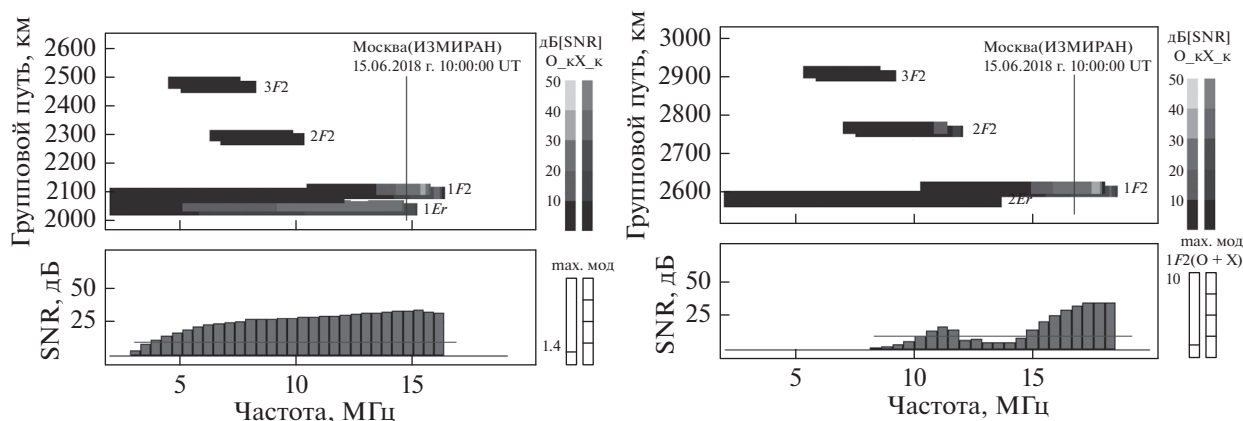


Рис. 3. Частотная зависимость модовой структуры волнового поля и SNR для дальностей: 2000 (левая панель) и 2500 (правая панель) при низкой солнечной активности (июнь 2018 г. 10:00 UT), рассчитанная в модели IRI + GDMF2.

распространения 3000 км в условиях высокого (левая панель) и низкого (правая панель) уровней солнечной активности представлены на рис. 2. Вычисления выполнялись со следующими исходными параметрами задачи: мощность излучения 1 кВт, частотная полоса для оценки мощности фоновых электромагнитных шумов [Maslin, 1997] – 2.6 кГц, ненаправленное действие антенн ($G_t = G_r = 1$) и некогерентное суммирование полей мод. Видно, что для низкой солнечной активности имеет место значительно меньшее перекрытие частотных интервалов существования мод 1F2 и 2F2 и формируется глубокий провал, достигающий, практически, до нулевых значений, в суммарной частотной зависимости SNR (рис. 2, 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 выра-

жен более отчетливо. Из рисунка 2 также можно видеть, что при низкой солнечной активности имеет место снижение НЧ более чем на 4 МГц. Этот эффект связан с уменьшением электронной плотности n_e в слоях E и D ионосферы при понижении уровня солнечной активности, а поскольку эффективная частота соударений электронов ν_e крайне слабо зависит от него, то вклад поглощения, определяемый соотношением $n_e \nu_e / \mu$, уменьшается. Рисунок 3 иллюстрирует качественное проявление дальности радиотрассы в переносе излучения – провал в амплитудно-частотной зависимости волнового поля отчетливо связан с отсутствием односкачкового отражения от регулярного слоя E ионосферы.

3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИЧИНЫ

Можно выделить три основных физических фактора, определяющих возникновение провала

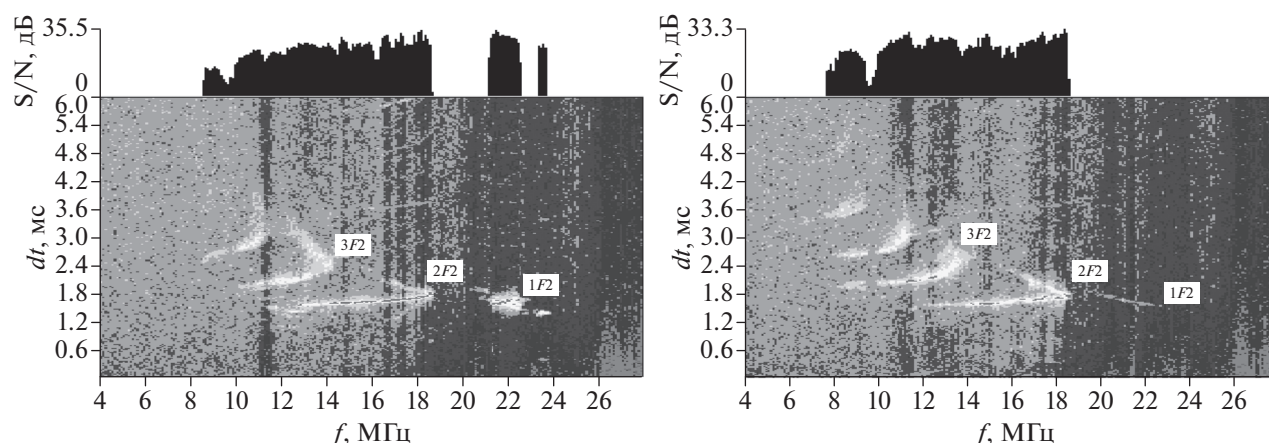


Рис. 4. Экспериментальные ионограммы наклонного радиозондирования ионосферы для дальности ~ 4200 км Иркутск (ИСЗФ)—Москва (ИЗМИРАН) 08.09.2011 г. 11:00 UT (левая панель) и 12:45 UT (правая панель).

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 $E-F$, как на значение нижней границы [Krasheninnikov et al., 1996], так и на амплитуду поля моды $1F2$ в нижней части следа на ионограмме НЗ. Фактор продольной неоднородности электронной плотности по радиотрассе является способствующим, но не определяющим в формировании энергетического провала.

Геометрически максимальная дальность радиотрассы D_{\max} связана с высотой отражения следующим соотношением [Дэвис, 1973]:

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

где r_e — радиус Земли; h — высота отражения над земной поверхностью. Для слоя E ионосферы имеет место практически зеркальное отражение и для высот 105 и 110 км максимальная дальность составляет 2300–2350 км, что соответствует результатам моделирования (рис. 3) и экспериментальным данным (рис. 1), показывающим отсутствие моды $1Er$ (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 радиоволн может быть существенно дальше. Как можно видеть из рис. 4, в модовой структуре волнового поля при разное 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. 4, 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).

Для представленного на рис. 2 случая отношение $foF2$ к foE для 10:00 UT в области средней точки радиотрассы в максимуме (июнь, 2014 г.) и минимуме (июнь, 2018 г.) солнечной активности составляет ~ 1.5 и ~ 1.1 , что проявляется и в МПЧ — разность для моды $1F2 \sim 5$ 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 в нижней части слоя $F2$ ионосферы, где различие в электронной плотности для максимума и минимума солнечной активности существенно меньше [Дэвис, 1973; Крашенинников и др., 2017]. Слой E ионосферы для дальностей, превышающих 2300 км, проявляется как “полутемное” образование — при двойном отражении от него след на ионограмме НЗ сильно ослаблен, но он продолжает оказывать большое влияние как на нижнюю границу существования, так и на амплитуду волнового поля проходящей моды $1F2$. 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 умень-

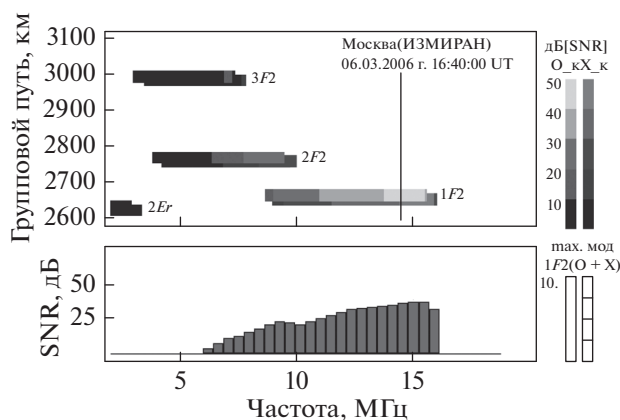
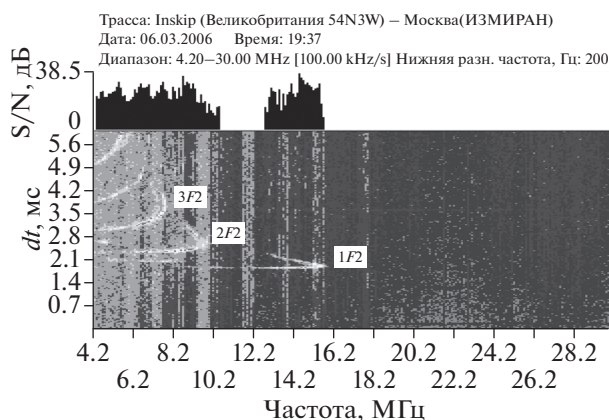


Рис. 5. Амплитудно-частотная зависимость волнового поля (SNR): экспериментальная ионограмма наклонного радиозондирования ионосферы 06.03.2006 г. 16:37 UT (левая панель) и синтезированная в модели IRI + GDMF2 (правая панель).

шение МПЧ моды $2F2$ и, практически, такое же значение минимальной частоты $1F2$ приводит к меньшему перекрытию мод $1F2$ и $2F2$ (рис. 2) и, как следствие, к формированию провала в энергетике волнового поля на данном отрезке общего частотного интервала прохождения.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Особенности в амплитудно-частотной зависимости волнового поля для радиотрасс с дальностями, близкими к предельной дальности односкачкового прохождения декаметровых радиоволн, анализировались на двух экспериментальных примерах: данных наклонного радиозондирования ионосферы с технологией ЛЧМ-сигнала [Иванов и др., 2003] и результатах регистрации информационного сигнала в сканирующем режиме работы узкополосной системы радиосвязи. Первый случай, как и результат, приведенный на рис. 1, получен на той же широтной радиотрассе Inskip (Великобритания) – Москва (ИЗМИРАН) и в то же время 19:37 МДТ 06.03.2006 г. (16:37 UT) – рис. 5 (левая панель), когда вечерний терминатор находится между терминальными точками. Среднемесячные сглаженные индексы солнечной активности для данного месяца – $R_{ms} \sim 27$ и $F10.7_{ms} \sim 81$. Модель IRI + GDMF2 [Шубин и Деминов, 2019] позволяет для конкретного дня учитывать текущие дневные гелио- и геомагнитные условия. Для 06.03.2006 г. дневной индекс $F10.7 = 73$, а Kp -индекс ~ 2 . Синтез ионограммы НЗ выполнялся с теми же начальными параметрами излучения, что и в численном моделировании, но с реальными антеннами типа вертикальный диполь, диаграмма направленности которого близка к изотропной [Айзенберг, 1962]. На экспериментальной ионограмме НЗ наблюдается глубокий провал в частотной области за МПЧ $2F2$, а в

синтезированной ионограмме ему соответствует только относительно небольшой спад, хотя области существования базовых мод достаточно хорошо совпадают.

Интерпретация измерений энергетических характеристик волнового поля представляют собой значительно более сложную экспериментальную задачу по сравнению, например, с анализом данных группового запаздывания зондирующих сигналов. Связано это, в первую очередь, со сложностью представления характеристик приемных и передающих антенн, значительной неопределенностью эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме а, 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 провала в частотном ходе энергетике волнового поля.

Во втором примере с передающим устройством, отстоящим на расстоянии ~ 3100 км (52° N, 86° E), зондирование ионосферы осуществлялось практически монохромным сигналом с известными техническими параметрами приемо-передающего оборудования. На рисунке 6 (левая панель) представлен усредненный результат регистрации уровня информационного сигнала в сканирующем узкополосном режиме работы системы связи в диапазоне 10–20 МГц. Усреднение проводилось по 7 реализациям. Амплитуда информационного сигнала показывает превышение полезного сигнала над помехами (в том числе образованными и собственным излучением), определяет эффективность передачи информации и, в общем аспекте, отражает соотношение сиг-

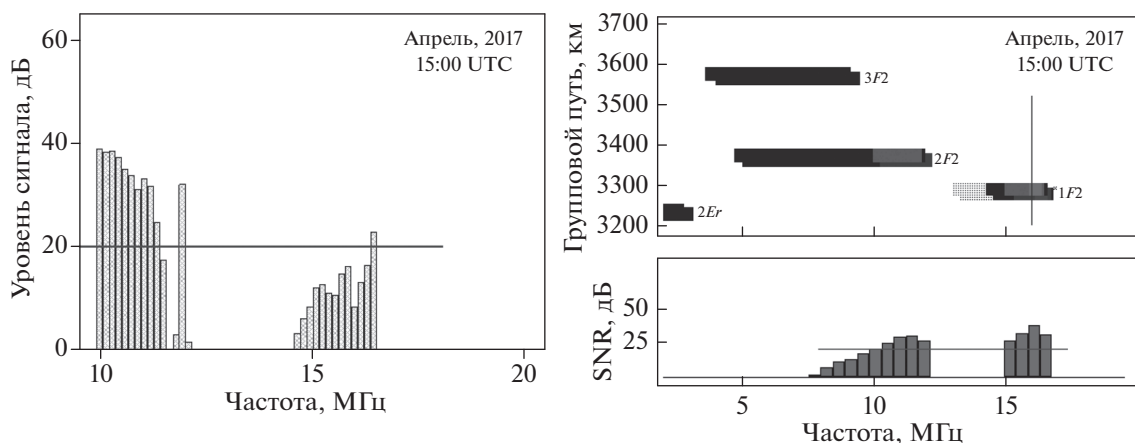


Рис. 6. Усредненные экспериментальные результаты работы радиокommunikационной системы в режиме частотного сканирования диапазона 10–20 МГц (левая панель) и синтезированная ионограмма НЗ в модели IRI (правая панель) для апреля 2017 г.

нал/шум, хотя и имеет несколько более сложную природу в условиях многомодового прохождения радиоволн. Так, в частности, можно видеть спадание данного параметра к МПЧ $2F_2$ (рис. 6, левая панель) вместе с ростом амплитуды поля на верхней ветви следа и всплески на частотах смыкания ветвей для необыкновенной компоненты ионограммы НЗ, где единственно теоретически корректно реализуется одномодовый режим прохождения радиоволн. Рассчитанные ионограммы НЗ с техническими параметрами радиокommunikационной системы и среднемесячными параметрами солнечной активности для апреля 2017 г. приведены на рис. 6 (правая панель) и можно видеть, в значительной степени, принципиальное соответствие модельных расчетов экспериментальным данным, в частности, наличие глубокого провала в амплитудно-частотной зависимости.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе, в основном, представлены результаты исследований частотных особенностей энергетических параметров волнового поля в модельном представлении IRI + GDMF2, но, принципиально, они не отличаются от расчетов, выполненных в базовой модели IRI (высотный профиль в нижней ионосфере определялся моделью IRI). Так, например, модель IRI также показывает аналогичный небольшой провал в амплитудно-частотной зависимости для случая, представленного на рис. 5. Практическое отсутствие волнового поля в некотором частотном интервале может быть обусловлено двумя причинами: геооптическим ограничением прохождения или большим затуханием волны. На экспериментальной ионограмме НЗ достаточно хорошо виден слабый след моды $1F_2$ и оценка нижней

границы области его существования в синтезированной ионограмме близка к данным радиозондирования. Иными словами, в данном случае провал в АЧХ обусловлен большими потерями энергии волны в нижележащем слое ионосферы – слое E . Характер проявления “полутемного” слоя E в модели IRI + GDMF2 иллюстрируется на рис. 7 для двух частот проходящей моды $1F_2$: минимальной – 9140 кГц (кривые 1) и максимальной – 15650 кГц (кривые 2). Величина минимальной частоты определяется нулевым значением угла возвышения в одной из терминальных точек радиотрассы – в данном случае на приемном конце (рис. 7, правая панель, кривая 1). Видно, что для минимальной частоты моды $1F_2$ 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. При этом, хотя след моды $2Er$ принципиально существует, но энергетически совсем не проявляется как в экспериментальной, так и в синтезированной ионограммах (рис. 5).

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 $1F_2$ в нижнем частотном диапазоне ее существования. Как известно, высота максимума hmE слоя E в профиле электронной плотности модели IRI жестко установлена на 110 км, а в реальности она может варьироваться и, в частности, доходить до 120–125 км. Особенно возрастание hmE характерно для вечернего времени суток в период интенсивного снижения электронного содержания, что должно приводить к возрастанию проходимого пути в

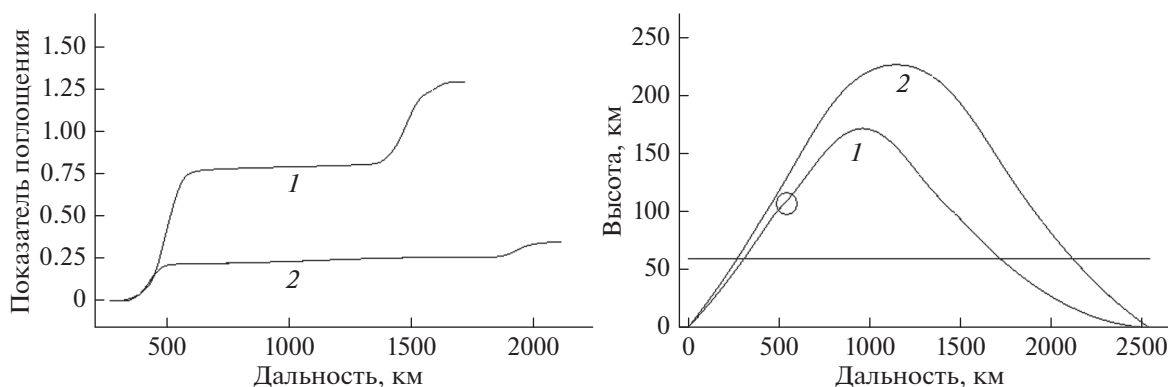


Рис. 7. Интегральный показатель поглощения (левая панель) вдоль лучевых траекторий (правая панель), соответствующих минимальной и максимальной частотам моды $1F_2$ в модели IRI + $SDMF_2$ для данных радиозондирования 06.03.2006 г. 16:37 UT. Отмечена локальная деформация лучевой траектории для минимальной частоты при прохождении E -слоя ионосферы.

слое E ионосферы, особенно для низких углов возвышения. В результате должно бы возрастать поглощение и, следовательно, уменьшаться напряженность волнового поля в нижней части частотного диапазона односкачковой моды $1F_2$. Как показано в работе [Zawdie et al., 2017] поглощение в E - и D -областях для проходящих радиоволн возрастает при обобщенном представлении показателя преломления в форме, предложенной Sen and Wyller [1960], которая, как утверждается, более корректна для нижней ионосферы, 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. 6. Для летних месяцев (рис. 2) появление провала в частотном ходе энергетических параметров волнового поля на дальностях односкачкового прохождения, 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. 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 радиоком-

муникационных систем, вследствие возможного попадания рабочих частот в интервал существования энергетического провала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Айзенберг Г.З. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 815 с. 1962.
- Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 502 с. 1973.
- Данилкин Р.П., Денисенко П.Ф., Водолазкин В.И. и др. Эффективная частота соударений электронов в E -области ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 18. № 1. С. 154–160. 1978.
- Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 46. № 11. С. 919–252. 2003.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 304 с., 1980.
- Крашенинников И.В., Егоров И.Б. Формирование комбинированных модов в ионосферном прохождении радиоволн // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 45. № 2. С. 241–244. 2005.
- Крашенинников И.В., Павлова Н.М., Ситнов Ю.С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 57. № 6. С. 774–782. 2017.
- 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 аэронавигация. Т. 58. № 5. С. 669–675. 2018.
- 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.
- 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.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с англ. второго издания “URSI Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction”. Ред. Н.В. Медникова. М.: Наука. 342 с. 1978.
- *Часовитин Ю.К., Широков А.В., Беспозванная А.С. и др.* Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исслед. № 44. С. 6–13. 1988.
- *Шубин В. Н., Деминов М.Г.* Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019.
- *Banks P.M.* Collision frequencies and energy transfer // Planet. Space Sci. V. 14. № 11. P. 1085–1103. 1966.
- *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. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW00159>
- *Budden K.G.* The propagation of radio waves. Cambridge: Cambridge University Press. 669 p. 1985.
- *Clette F., Svalgaard L., Vaquero J.M., Cliver E.W.* Re-visiting the sunspot number: a 400-year perspective on the solar cycle // Space Sci. Rev. V. 186. № 1. P. 35–103. 2014.
- *Krasheninnikov I.V., Jodogne J.-C., Alberca L.F.* Compatible analysis of vertical and oblique sounding data // Annali di Geofisica. V. 39. № 4. P. 763–768. 1996.
- *Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I.* Caustics, catastrophes and wave fields. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 216 p. 1999.
- *Maslin N.M.* HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 240 p. 1987.
- *Ratcliffe J.A.* The magnetoionic theory and its applications to the ionosphere. Cambridge: Cambridge University Press. 206 p. 1959.
- *Sen H.K., Wyller A.A.* On the generalization of the Appleton-Hartree magnetoionic formulas, J. Geophys. Res. V. 65. 3931–3950, 1960. <https://doi.org/10.1029/JZ065i012p03931>
- *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. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017RS006256>