



МОДЕЛЬ IRI В ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОГО ПОЛЯ В ИОНОСФЕРНОМ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

И. В. Крашенинников

Анализируются результаты измерений напряженности волнового поля стандартного излучателя – Москва (РВМ) в акватории Индийского океана на основе расширенной модели IRI с включением технологии представления эффективной частоты соударений электронов в ионосфере. Показано, что, в целом, дополненная модель IRI достаточно достоверно описывает энергетические характеристики волнового поля при распространения дециметровых радиоволн в ионосфере в условиях очень высокого уровня солнечной активности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, МПЧ, НПЧ, НАПРЯЖЕННОСТЬ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ, ИОНОСФЕРНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ РАДИОВОЛН

ВВЕДЕНИЕ

Статистическая ионосферная модель IRI, рекомендованная URSI как базовая модель в исследовании и прогнозировании ионосферного распространения радиоволн [1,2], в настоящее время является наиболее апробированной технологией описания пространственного распределения электронной плотности в ионосфере, в том числе, и с применением адаптационных процедур к реальным данным радиозондирования ионосферы, например, [3]. Основанные на применении приближения геометрической оптики методы построения лучевых траекторий [4,5] и интегралы по ним дают возможность рассчитать как геометрические параметры прохождения радиоволн: МПЧ — максимальной применимой частоты, группового пути, углов прихода, так и характеристик, зависящих от напряженности волнового поля (НПЧ — наименьшая применимая частота, ОРЧ — оптимальная рабочая частота, частотные интервалы наличия радиосвязи). Однако расчет последних требует знания, в частности, фактора волновых потерь в ионосферной плазме и здесь основной вклад вносит процесс поглощения энергии радиоволны средой через столкновительный механизм взаимодействия электронов с нейтральными и ионизированными частицами атмосферы. В базовой версии модели IRI нет официально принятой процедуры расчета эффективной частоты соударений электронов и можно отметить некоторые подходы, в частности, барометрическое приближение, позволяющее в какой-то степени учесть данный фактор в распространении радиоволн. Сложность построения корректной модели эффективной частоты соударений заключается в существенной неопределенности эффективных сечений рассеяния электронов на нейтралах и ионах в ионосферных условиях. По-видимому, в настоящее время единственно обоснованной версией решения данной проблемы является обобщенная модель ионосферы СМИ-88 (СМИ-90) [6]. Разработанная там методология представления эффективной частоты соударений электронов была перенесена в модель IRI-2001 и применена, в частности, для анализа волнового поля на сверхдальней радиотрассе Москва(РВМ) — антарктическая станция “Академик Вернадский” Украинской Академии наук (~16 000 км) [7]. Полученные оценки напряженности волнового поля и соотношения сигнал/шум качественно и, в значительной степени, количественно соответствовали измеренным значениям, что свидетельствует об общей корректности расширенной модели IRI.

В данной работе представлены результаты анализа, с использованием обобщенной модели IRI, амплитудных измерений сигналов станции точного времени Москва(РВМ) в акватории Индийского океана, проводившихся в декабре-январе 1989-90 гг.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Регистрация уровня сигналов и характера суточного прохождения сигналов РВМ на частотах 4996, 9996 и 14996 кГц проводились в 1989 — 1990 гг. во время рейса гидрографического судна “Леонид Соболев”. С 22.12.1989 по 03.01.1990 корабль лежал в дрейфе примерно в центре Бенгальского залива (11° с.ш., 90° в.д.) и поэтому можно считать, что изменения положения судна совершенно незначительны по сравнению с длиной радиотрассы (~ 7000 км). Мощность излучателя составляла, согласно справочной информации, 5 кВт для частот 4996 и 9996 кГц и 8 кВт для номинала 14996 кГц и излучающая антенна не имела выделенного азимутального направления, т.е. можно считать излучение изотропным. Хотя следует отметить, что изотропное по азимуту излучение может обеспечить только вертикальный диполь и для него имеется диаграмма направленности в вертикальной плоскости, т.е. для низких углов прихода антенна дает усиление порядка 3 – 5 дБ в зависимости от частоты и высоты подвеса. В качестве приемной антенны использовался вертикальный вибратор длиной ~ 4 м с уровнем над морской поверхностью ~ 10 м, т.е. по сравнению с длинами волн его можно считать коротким диполем и его коэффициент усиления, который, зависит от частоты, можно оценить ~ 3 – 5 дБ — [8,9]. Следует отметить, что для вертикального диполя характерно расщепление диаграммы направленности с ростом частоты и коэффициент усиления может существенно отличаться от идеализированного случая.

Измерения производились во время излучения сигнала в виде несущей частоты (в начале часа с 30 мин. интервалом) в полосе 1 кГц на промежуточной частоте 215 кГц методом замещения усредненного, за время измерения порядка 1 мин, напряжения с антенны напряжением с прецизионного генератора. Усреднение необходимо в силу многомодового характера волнового поля и связанного с этим значительного интерференционного фединга сигнала. Таким образом, в результате оценивалось усредненное напряжение в мкВ на входе приемника. Такого рода измерения параметров поля корректны, если сигнал может быть выделен из фоновых электромагнитных шумов. На рисунке 1 (левая панель) представлены усредненные за период наблюдений суточные зависимости напряжений на входе приемника для трех частот в шкале времени — Московское декретное время (UTC+3 часа).

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Амплитуда волнового поля в геометрооптическом приближении определяется как [4]

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

где A_0^0 — первоначальное значение амплитуды в милливольт на метр на расстоянии в 1 км, определяемое мощностью излучения $A_0^0 = 245 \sqrt{P_t}$ [10], J — расходимость лучевой трубки, G_t , G_r — коэффициенты усиления антенн, k_0 — волновое число и $\chi = uz/2\mu$ — коэффициент затухания, $\mu^2 = 1 - u$, $u = \omega_N^2 / \omega^2$, $z = v_e / \omega$, ω_N - плазменная частота, v_e — эффективная частота столкновений электронов с нейтральными частицами и ионами.

Плазменная частота и частота соударений электронов определяются расширенной моделью ионосферы IRI. Интегрирование выполняется по лучевым траекториям, связывающим точки излучения и приема (модам). Коэффициент усиления передающей антенны $G_t = 1$, а для приемной антенны принимался в виде идеализированного вертикального диполя. Потери энергии радиоволны при отражении от земной поверхности рассматривались в [7] и применялись в данном исследовании.

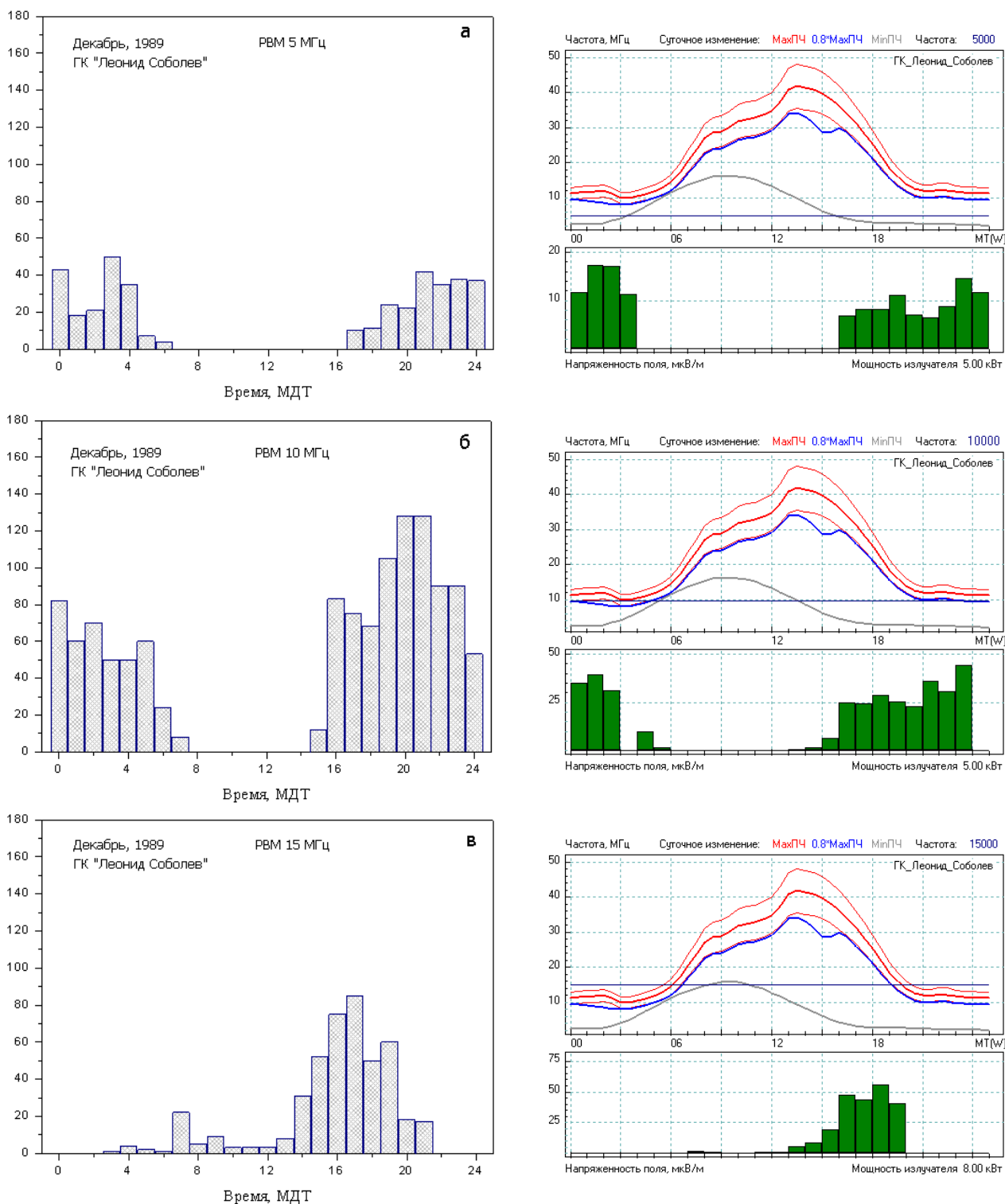


Рис. 1. Усредненные данные измерений антенного напряжения на радиотрассе Москва(РВМ) – ГК “Леонид Соболев” для трех частот (а,б,в) и синтезированное распределение напряженности поля по времени суток в расширенной модели IRI-2001.

1989-ый год относится к периоду экстремально высокой солнечной активности – для декабря 1989 г. сглаженный индекс солнечных пятен (в новой версии с 2015 г.) составлял 206, а средний уровень потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7} = 240$. Оптимизированный индекс [11] для модели IRI составляет $R_m^g \approx 195$ и рассчитанные результаты в среднемесечном (медианном) масштабе для указанных выше номиналов частот приведены на рис. 1 — правая панель. Шкала времени — московское зимнее время совпадает с шкалой МДТ (Московское декретное время, МДТ=UT+3). Зависимость МПЧ рассчитывалась для порогового уровня напряженности поля в 1 мкВ/м. Очень высокое значение солнечной активности приводит к высоким максимальным значениям МПЧ в дневные часы, поэтому в данном эксперименте имеется возможность проанализировать динамику поведения поля в существенно различающихся ситуациях. В целом, видно, что имеет место общее качественное сходство в поведении экспериментальных и расчетных данных. Неплохо совпадают времена суток, для которых нет прохождения частот 5 и 10 МГц и очень слабое поле для частоты 15 МГц. Причиной отсутствия прохождения может быть либо сильное поглощение, например, в дневные часы — 12:00 МДТ, либо превышение номинала над текущим значением МПЧ, что особенно наглядно проявляется для частоты 15 МГц в ночные часы. Также хорошо видно наличие, хотя и слабого, сигнала на частоте 15 МГц днем, в отличие от частот 5 и 10 МГц. Частота 15 МГц хоть и низка по сравнению с МПЧ трассы (~40 МГц) в дневное время, но мощности передатчика достаточно для превышения порогового значения. Также следует отметить эффект фокусировки волнового поля в вечернее время, когда МПЧ приближается к номиналу в 10 МГц (рис. 1,б) или пересекает его для 15 МГц (рис. 1,в). Наименьшая применимая частота представлена кривой, отмеченной серым цветом, и хорошо видны интервалы времени, когда поглощение настолько велико, что приходящее поле становится ниже порогового значения. Также следует отметить, что в общем сравнении амплитуда поля на частоте 5 МГц меньше, чем на других частотах – 10 и 15 МГц, что отражает частотную зависимость поглощения энергии радиоволн в ионосфере.

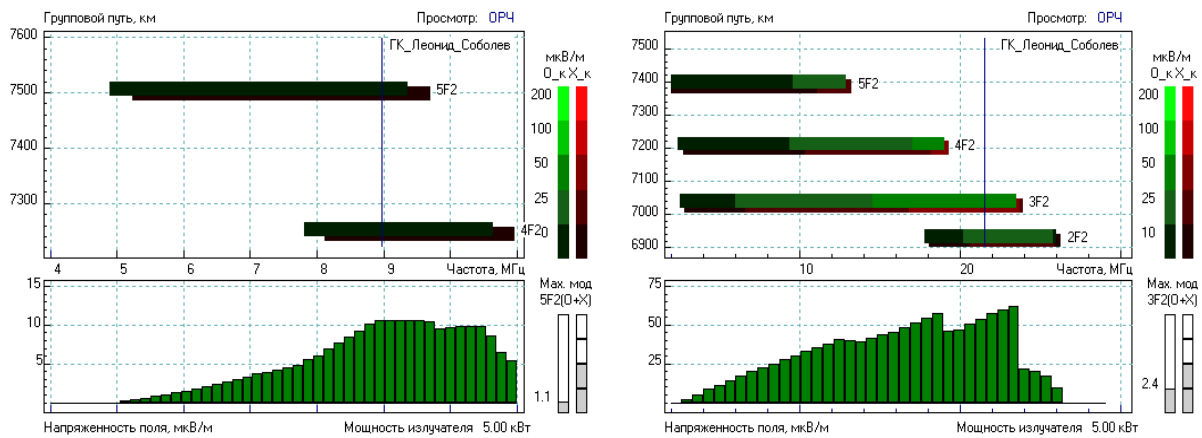


Рис. 2. Модовая структура волнового поля 28.12.1989 для 04:00 (а) и 18:00 МДТ (б) на радиотрассе Москва(РВМ) – ГК “Леонид Соболев” в модели IRI-2001.

Зависимость МПЧ радиотрассы имеет сложный характер — на различных участках она может формироваться различными модами, что связано со значительной продольной неоднородностью электронной плотности в направлении распространения в некоторые интервалы времени. Так, например, в утренние часы в условиях сильной продольной неоднородности ($foF2$ изменяется от ~ 4 до ~12 МГц) МПЧ формируется модами 4F2 и даже 5F2 (рис. 2,а), в то время как в вечерние часы может проходить самая низкая из возможных мод — 2F2. Следует отметить, что в данной ситуации он может быть и не самым энергетически выгодным способом переноса волнового поля (рис. 2,б), например, для оптимальной рабочей частоты.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из данных регистрации можно выделить интервал времени в районе 18:00 МДТ, где одновременно существует прохождение на всех трех частотах, что подтверждается и численным расчетом волнового поля (рис. 2). Если посмотреть величины регистрируемых напряжений на входе приемника, то хорошо видно, что от 5 к 10 МГц оно существенно выросло, а к 15 МГц, наоборот, несколько даже упало, по сравнению с величиной, характерной для 10 МГц. Однако, в прогнозе на 18:00 МДТ (рис. 2) отчетливо видно, что с ростом частоты напряженность поля возрастает вследствие уменьшения поглощения. Эта несколько парадоксальная, на первый взгляд, ситуация объясняется свойством антенны при трансформации напряженности волнового поля в напряжение на выходе, для которой существенно важен параметр антенны — ее электрическая длина [8,9]

$$l_{eff} = \lambda \sqrt{G_r / 4\pi}, \quad (2)$$

где G_r — линейный коэффициент усиления, λ — длина волны. Т.е., этот параметр характеризует способность антенны извлекать энергию волнового поля из пространства, которая, в частности, обратно пропорциональна частоте. Для частот 10 и 15 МГц коэффициенты усиления антенны меняются незначительно, что свойственно так называемым коротким диполям, а длина волны уменьшается в 1,5 раза. Увеличение же напряженности волнового поля на частоте 15 МГц несколько меньше (~1,3), за счет выхода из полосы прохождения моды 5F2 (рис. 2,б).

Используя соотношение (2) можно оценить и саму величину генерируемого напряжения на входе приемника, так для частоты 15 МГц оно должно бы составить $\sim 400 \mu V$, что примерно в 5 раз больше, чем регистрируется в эксперименте. Примерно такая же ситуация и с другими частотами, что и есть проявление фактора сложности в измерении амплитуды поля, ввиду существенной неопределенности частотной зависимости коэффициента усиления антенн. В данном случае, еще следует учесть два обстоятельства: первое — идеальный характер передачи напряжения антенны на вход приемника (КПД антенно-фидерного тракта), второе — поляризационные потери, оцениваемые с коэффициентом 0.5 по мощности (эллиптически поляризованная волна принимается на линейную вертикальную антенну) и к антенне было подключено два приемника. С помощью одного приемника измерялось напряжение, генерируемое в антенне, а второй приемник работал как спектрометр, оценивая доплеровские спектры проходящих сигналов. С учетом этих факторов расчетные данные становятся уже соизмеримыми с экспериментальными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ данных регистрации амплитуды волнового поля станции Москва(РВМ) на трех частотах в акватории Индийского океана показывает, что расширенная модель ионосферы IRI-2001, включающая пространственное распределение эффективной частоты соударений электронов, достаточно достоверно описывает энергетические характеристики распространения декаметровых радиоволн в ионосфере в условиях высокого уровня солнечной активности.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. // Radio Science, V. 36, N. 2, P. 261–275, 2001.
2. Bilitza, D., D. Altadill, V. Truhlik, V. Shubin, I. Galkin, B. Reinisch, and X. Huang (2017). International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions, Space Weather, 15, 418–429, doi:10.1002/2016SW001593.
3. Galkin I.A., Reinisch B.W., Huang X., Bilitza D. Assimilation of GIRO data into a real-time IRI // Radio Science. V. 47. N. 2. P. RSOL07. 2012. doi 10.1029/2011RS004952
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. Часовитин Ю.К., Широчков А.В., Беспозванная А.С. и др. Глобальная эмпирическая модель распределения электронной концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования, 1988. N 44. С. 6–13.
7. Крашенинников И.В., Попов А.В., Стаханова И.Г.. Анализ модовой структуры волнового поля на сверхдлинной радиотрассе Москва(РВМ) - антарктическая станция “Академик Вернадский” // Геомагнетизм и аэрномия, 2016. Т. 56. №5. С. 662–669.
8. Айзенберг. Г.З. Коротковолновые антенны. М.: Радио и связь, 1962. — 815 с.
9. Гончаренко И.В. Антенны КВ и УКВ. М.: Радио, 2004. (в 4-х томах).
10. Maslin N.M. HF Communication: A System Approach. Pitman Publishing. 1987. 240 p.
11. Крашенинников И.В., Павлова Н.М., Ситнов Ю.С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия, 2017. Т. 57. № 6. С. 774–782.

MODEL IRI IN THE PROBLEM OF ESTIMATING THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE WAVE FIELD IN IONOSPHERIC RADIO WAVES PROPAGATION

I.V. Krasheninnikov

Measurements of the wave field strength from the radio-beacon - Moscow (RVM) in the Indian Ocean water area are analyzed on a basis of the IRI model supplemented with the technology for representing the effective frequency of electron collisions in the ionosphere. It is shown that, in general, the expanded IRI model quite reliably describes the energy characteristics of the wave field for the short waves propagation in the ionosphere under conditions of very high level of solar activity.

KEYWORDS: IONOSPHERE, RADIO WAVES PROPAGATION, MUF, NPC, WAVE FIELD STRENGTH, IONOSPHERIC ABSORPTION OF RADIO WAVES