

УДК 550.388.2

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ В ПАРАМЕТРЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ЗАДАЧЕ РЖД

В. Б. Лапшин, Н. П. Данилкин, С. В. Журавлев, Н. Г. Котонаева, М.Ю. Филиппов

Для задач РЖД предлагается метод расчета параметров пространственного распределения электронной плотности, исходя из доступных модельных и экспериментальных данных - модели IRI 2011, вертикального радиозондирования и результатов их обработки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ, МАГНИТОРАСЩЕПЛЕННЫЕ КОМПОНЕНТЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, IRI.

1. ВВЕДЕНИЕ

При расчете траекторных и энергетических характеристик в задачах радиосвязи необходимо знание распределения плотности электронов в ионосфере вдоль трассы. В подобных задачах ионосферную плазму достаточно принять двухмерно-неоднородной и учитывать только градиенты электронной концентрации вдоль трассы. Для этого двумерное пространственно-временное распределение ионизации $N(h, \varphi)$ рассчитывается в равноудаленных узловых точках вдоль дуги большого круга, соединяющей пункты передачи и приема, с шагом по угловому расстоянию $\Delta\varphi$ и по времени Δt . Здесь h – расстояние от Земли вдоль радиус вектора с центром в центре Земли, в дальнейшем этот параметр будем называть высотой и φ полярный угол.

Задача построения вертикального профиля электронной концентрации может быть решена двумя способами. Во-первых, в результате модельного построения с учетом конкретных оперативных значений ключевых параметров ионосферы, таких как критические частоты слоев F2 и F1, во-вторых, непосредственно по ионограммам вертикального и трансionoсферного радиозондирования. Причем для преобразования ионограмм внешнего и наземного зондирования используются методы решения обратной задачи, а проблема получения распределения электронной плотности по данным

трансionoсферного зондирования решается перебором допустимых решений прямой задачи. Преобразования ионограмм наземного радиозондирования в параметры пространственного распределения плотности электронов в ионосфере или, другими словами, в $N(r, t)$ - профили есть классическая задача ионосферной физики, здесь имеется в виду то, что зависимость от времени определяется последовательностью во времени измеренных и вычисленных $N(h)$ -профилей.

2. МОДЕЛЬНОЕ ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

В узловых точках невозмущенный высотный профиль электронной концентрации описывается моделью из семи квазипарабол, которые сопрягаются друг с другом с учетом непрерывности как самого профиля в точках смыкания двух соседних квазипарабол, так и первых производных функций. Параметры квазипарабол (критические частоты, высоты максимумов и полутолщины) находятся по алгоритмам, заложенным в основу Международной справочной модели IRI-2012.

Одним из преимуществ модели IRI-2011 является возможность ее коррекции по данным текущей диагностики, в частности по результатам вертикального зондирования (ВЗ). В пользу применения модели IRI также говорят следующие аргументы. Модель содержит всю необхо-

димую информацию без широтно-долготных ограничений, т.е. является глобальной; для нее предусмотрен учет возмущенных условий; предложена коррекция модели с помощью данных GPS, имеется доступная программная реализация, кроме того в IRI используются улучшенные модели слоя D и межслоевой области ("долины" между слоями E и F).

В качестве адаптационного (управляющего) параметра, максимально влияющего на распространение ДКМВ, берется критическая частота слоя ионосферы F2. Дополнительными адаптационными параметрами, полученными в результате мониторинга ионосферы, могут быть критическая частота слоя F1, предельная частота foE, высоты максимумов hmF1 и hmF2.

Профили рассчитываются для двух случаев, характеризующихся наличием или отсутствием слоя F1 в модельном N(h)-профиле. Расчетные формулы для аппроксимации N(h)-профиля, содержащие в качестве параметров, перечисленные выше величины приводятся в [1].

Пример ионосферы, состоящей из 7-ми квазипарабол, приведен на рис. 1.

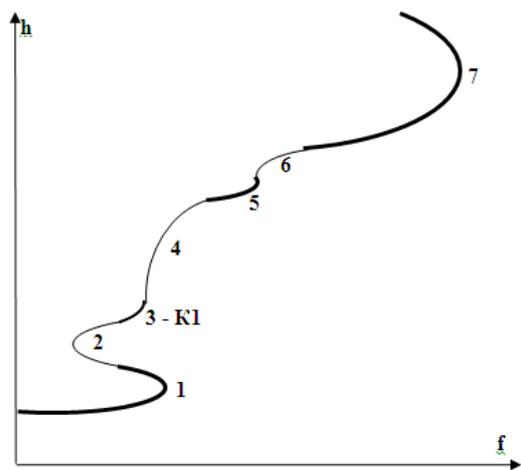


Рис. 1. Квазипараболическая аппроксимация ионосферы. Квазипараболы: 1 – слой E, 5 – слой F1, 7 – слой F2, 2 – долина EF, 3,4,6 – сопрягающие. K1 – обозначение для параболы 3.

Подобным образом рассчитываются профили электронной плотности в невозмущенной ионосфере. При наличии полной информации о состоянии ионосферы по данным вертикального радиозондирования, а также при наличии возмущений используют непосредственное восстановление N(h)-профиля по ионограммам.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ N(h)-ПРОФИЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАЗЕМНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Вертикальное наземное зондирование ионосферы производится круглосуточно, непрерывно, сеансами каждые 15 мин. Данные измерений представляются в виде высотно-частотных характеристик ионосферы (ионограмм). В состав пакета программного обеспечения современных ионозондов, таких, например, как «Парус-А», входят средства, обеспечивающие как автоматическую обработку обнаруженных сигналов вертикального радиозондирования ионосферы с выделением и классификацией магнитоионных компонент, так и автоматическое построение профиля электронной концентрации ионосферы, определение его параметров и формирование стандартных телеграмм

Ручная обработка используется для контроля программы автоматического распознавания характеристик ионосферы.

Правильная и максимально полная обработка ионограмм представляет собой сложный процесс и является важным этапом цепочки получения геофизической и радиофизической информации при ионосферном зондировании. Рассмотрим некоторые возможные алгоритмы этого процесса.

3.1. Вычисление N(h)-профилей по данным только обыкновенной «O» компоненты

Высотно-частотная характеристика, полученная по результатам ВЗ, является зависимостью действующей высоты от частоты зондирования. Действующая высота отражения h' для радиоволны с частотой f , падающей на ионосферу вертикально, вычисляется по формуле

$$h' = h_0 + \int_{h_0}^h n'(f, h) dh, \quad (1)$$

где h_0 – высота, где ионизация отсутствует,

h – истинная высота отражения от ионосферы, являющаяся искомой величиной,

n' – групповой показатель преломления частоты f .

Метод решения подобного интегрального уравнения, являющегося уравнением Вольтера, основан на составлении рекурсивных уравнений для вычисления приращения действующих высот.

На первом этапе вычисляются специальные коэффициенты β_{rn} для ряда фиксированных частот один раз для данного места. В дальнейшем они используются постоянно. На втором, используя эти коэффициенты, производится перерасчет действующих высот в истинные.

Расчетные формулы, первой части программы имеют вид:

$$X_{rn} = \frac{f_r^2}{f_n^2}; \quad (2)$$

$$Y_n = \frac{f_H}{f_n}; \quad (3)$$

$$W_{rn} = \frac{f_n}{f_r} \quad (4)$$

$$\mu_m^2 = 1 - \frac{2X_m(1-X_m)}{2(1-X_m) - Y_n^2 a + \sqrt{Y_n^2 a^2 + 4(1-X_m)^2 Y_n^2 b}}; \quad (5)$$

$$a = \sin^2 \theta, \quad b = \cos^2 \theta;$$

$$\mu'_{rn} = 0,98 \frac{\mu_{rn} W_{rn} - \mu_{r-1,n} W_{r-1,n}}{W_{rn} - W_{r-1,n}} \quad (6)$$

$$\beta_{rn} = \mu'_{r,n-1} - \mu'_{rn} \quad (r < n), \quad (7)$$

$$\beta_{rn} = \mu'_{nn}$$

где f_h – гирочастота; θ – угол между направлением распространения электромагнитных волн и вектором напряженности магнитного поля Земли; μ – показатель преломления; μ' – средний групповой показатель преломления на данном участке; f_n, f_r – фиксированные частоты.

Во второй части программы решается система рекурсивных уравнений (8):

$$h_n - h_{n-1} = \frac{1}{\beta_{nn}} \left\{ (h'_n - h'_{n-1}) + \sum_{r=1}^{n-1} \beta_{rn} (h_r - h_{r-1}) \right\}; \quad (8)$$

где h' – действующая высота; h – истинная высота.

Для определения высоты максимума ионизации используют формулу (9)

$$h_{\max} = 3,41h_{0,9} - 2,41h_{0,8}, \quad (9)$$

полученную при параболической экстраполяции $N(h)$ -профиля ионосферы к максимуму ионизации по высотам, на которых плотность ионизации составляет 0,9 и 0,8 от максимальной ионизации [2,3].

3.2. Учёт обеих компонент магниторасщепленного сигнала

При расчетах только по следу обыкновенного луча на ионограмме возникает ряд трудностей. Основная из них состоит в невозможности учитывать ионизацию, соответствующую плазменной частоте $f_N < f_{\min}$, где f_{\min} – наименьшая частота, на которой просматривается отражение на ионограмме в ночных условиях или наименьшая частота при отражении от слоя F2 днем.

Существует принципиальная возможность определения полного количества нижележащей (т.е. с $f_N < f_{\min}$) или межслоевой ионизации, если учитывать при расчете профиля ионизации след необыкновенного луча на ионограмме [4, 5, 6].

Основная идея учета необыкновенного луча при анализе ионограммы основана на том факте, что групповое запаздывание для обыкновенного и необыкновенного лучей различно. Поэтому, определяя с ионограммы по необыкновенному лучу величину группового запаздывания, вносимую на частотах $f_n > f_{\min}$ ионизацией, которой соответствует плазменная частота $f_N < f_{\min}$, можно скорректировать ранее вычисленный $N(h)$ -профиль и получить информацию о величине нижележащей ионизации I , где

$$I = \int_0^{z_{\min}} N dz \quad (10)$$

Рисунок 2 иллюстрирует расчёт I . На нем нанесены $z_o'(f)$ и $z_x'(f)$ – действующие высоты обыкновенного и необыкновенного лучей; $h(f)$ – вертикальное распределение ионизации в зависимости от истинной высоты, получаемое при анализе обыкновенной компоненты ионограммы; $z(f)$ – предположительно реально существующая в ионосфере зависимость ионизации от высоты; $h_x'(f)$ – действующая высота необыкновенного луча, полученная расчетным путем из $h(f)$. На частотах $f_n < f_{\min}$ невозможно вычислить зависимость электронной концентрации от высоты из-за отсутствия следов отражения от ионосферы на этих частотах. Однако можно вычислить величину нижележащей ионизации, которой будут соответствовать различные кривые $N(z)$. Последовательность вычислений при этом такова.

Первоначально вычисляется N(h)-профиль по следу отражения o-компоненты.

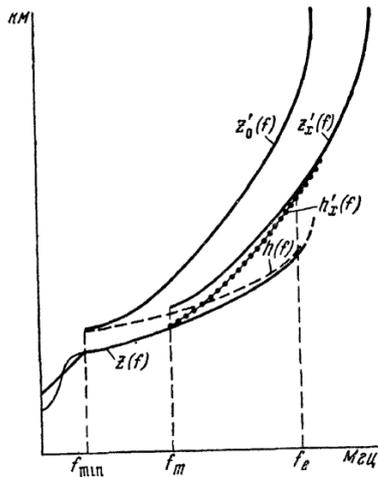


Рис. 2

Из N(h)-профиля, используя предварительно вычисленный групповой показатель преломления необыкновенного луча, рассчитываются действующие высоты $h_x'(f)$ и сравнивается с взятой из ионограммы действующей высотой необыкновенного луча $z_x'(f)$. Разность теоретической и экспериментальной действующих расстояний обозначается Δn для каждой частоты f_n . В этом расчете используется факт, что действующие высоты обыкновенного и необыкновенного лучей на любой частоте определяются формулами

$$z_{0n}' = z_n + \sum_{r=1}^n [(\bar{\mu}'_{rn})_0 - 1] \Delta z_r \quad (11)$$

$$z_{xn}' = z_n + \sum_{r=1}^n [(\bar{\mu}'_{rn})_x - 1] \Delta z_r, \quad \Delta z_r = z_r - z_{r-1} \quad (12)$$

где z_n – истинная высота на этой частоте; $(\mu'_{rn})_{0,x}$ – усредненная для данной прослойки величина группового показателя преломления, соответственно, для обыкновенного и необыкновенного лучей. Так как очевидно, что

$$z_n = h_n = \alpha_n I \quad (13)$$

где α_n – коэффициенты, то (12) может быть записано

$$z_{xn}' = h_n + \sum_{r=1}^n [(\bar{\mu}'_{rn})_x - 1] (\Delta h_r - I \Delta \alpha_n) - \alpha_n I$$

$$\Delta h_r = h_r - h_{r-1}, \quad \Delta \alpha_r = \alpha_{r-1} - \alpha_r. \quad (14)$$

Значение $h_x'(f)$, учитывая (11) и (12), будет иметь вид

$$h'_{xn} = h_n + \sum_{r=1}^n [(\bar{\mu}'_{rn})_x - 1] \Delta h_r \quad (15)$$

Групповые показатели преломления для необыкновенного луча $(\bar{\mu}'_{rn})_x$ вычисляются по формулам [7]:

$$f_n^x = \frac{f_H}{2} + \sqrt{\frac{f_H^2}{4} + f_n^2},$$

$$Y_n = \frac{f_H}{f_n^x}, \quad X_{r,n}' = \frac{X_{r,n}}{1 - Y_n} = \frac{f_r^2}{f_n^2},$$

$$t_{r,n} = \sqrt{1 - X_{r,n}'}, \quad K_n = \frac{Y_n}{2(1 - Y_n)},$$

$$\bar{\mu}'_{r,n} = 2(1 + K_n + \bar{D}_{r,n}) \frac{t_{r-1} - t_{r,n}}{X_{r,n}' - X_{r-1,n}'} - \frac{2K_n}{3} \frac{t_{r-1,n}^3 - t_{r,n}^3}{X_{r,n}' - X_{r-1,n}'}$$

Вычитая (15) из (14), получаем величину Δ для ряда частот

$$\Delta_n = z'_{xn} - h'_{xn} = I \left\{ \sum_{r=1}^n [(\bar{\mu}'_{rn})_x - 1] \Delta \alpha_r - \alpha_n \right\} = \beta_n I. \quad (16)$$

Таким образом, полученная величина Δ зависит для данного места только от величины нижележащей ионизации. Коэффициенты β_n и α_n зависят только от месторасположения ионосферной станции. Следовательно, вычислив величину Δ_n и зная коэффициенты β_n и α_n , можно определить I и далее скорректировать величину $h(f)$ по формуле (13). Для проверки правильности расчетов, исходя из полученной $h(f)$ -кривой рассчитываются $z_0'(f)$ и $z_x'(f)$

Эти расчеты повторяются до полного совпадения рассчитанных и экспериментально определенных частотных зависимостей действующих высот обыкновенного и необыкновенного следов на ионограмме.

Полученный по данным наземного зондирования описанным способом N(h)-профиль является для частот с $f_n > f_{min}$ реально существующим вертикальным распределением ионизации в ионосфере.

3.3. Определение N(h)-профилей в нижней ионосфере (в области D и в основании слоя E).

Точность расчета N(h)-профиля по ионограммам во многом определяется правильным

представлением ионизации на высотах $h < 100$ км. Среди различных простых дополнительных методов, помогающих скорректировать эквивалентную ионизацию в D-области, наиболее эффективно измерение поглощения радиоволн в некотором диапазоне около 2 МГц [3].

Метод расчета $N(h)$ -профиля в D-области, основанный на измерении всего двух параметров (действующей высоты h' и поглощения L), исходит из выражения [8].

$$N(h) = N_{60} \exp[\alpha(h - 60)^2] \quad (17)$$

где N_{60} - электронная концентрация на $h = 60$ км; α - параметр экспоненты. Поскольку h' и L являются функциями $N(h)$, то, подставляя (17) в соответствующие уравнения для h' и L , можно определить N_{60} и α , т.е. вычислить весь профиль.

Все вычисления необходимо проводить в рамках обобщенной магнитоионной теории [9].

На рисунке 3 [10] приведена сетчатая номограмма для расчета $N(h)$ -профиля вида (17) по данным наиболее часто встречающихся в средних широтах экспериментально определенных величин действующих высот (представлены значения $h'=100-120$ км) и поглощений, измеренных методом A1, на частоте 2 МГц (представлены значения $L = 16-34$ дБ). Вычисления произведены для $\theta = 25,5^\circ$ и $f_H = 1,29$ МГц, где θ - угол между направлением нормали к фронту волны и вектором земного магнитного поля, f_H - гирочастота. В расчетах использовался $\nu(h)$ -профиль, рекомендованный в [8] для средних широт.

Для исследования вопроса о том, в каких геомагнитных условиях можно пользоваться номограммами, были рассчитаны профили для условий, отличающихся от приведенных выше на $\Delta\theta = \pm 10^\circ$ и $\Delta f_H = \pm 0,1$ МГц. Результаты этих расчетов для $h' = 110$ км и $L = 26$ дБ приведены на рис.4. Кривая 1 - $f_H = 1,29$ МГц, $\theta = 15,5^\circ$; кривая 2 - $f_H = 1,19$ МГц, $\theta = 25,5^\circ$; кривая 3 - $f_H = 1,39$ (1,29) МГц, $\theta = 25,5^\circ$; кривая 4 - $f_H = 1,29$ МГц, $\theta = 35,5^\circ$. Расчеты для других величин h' и L при тех же $\Delta\theta$ и Δf_H дают аналогичные результаты. Рассчитан также $N(h)$ -профиль (кривая 5) для Магадана ($\theta = 19^\circ$, $f_H = 1,57$ МГц). Видно, что отклонениями от моделей, определенных номограммами, можно пренебречь.

Определение постоянной аппаратуры при измерении поглощения радиоволн методом A1 на частотах 2-3 МГц стандартным методом проводится при ночных измерениях, когда в ионосфере создаются условия для существова-

ния кратных отражений [11]. Этот метод непригоден, если необходимо измерять поглощение радиоволн на частотах, превышающих ночные значения $foF2$.

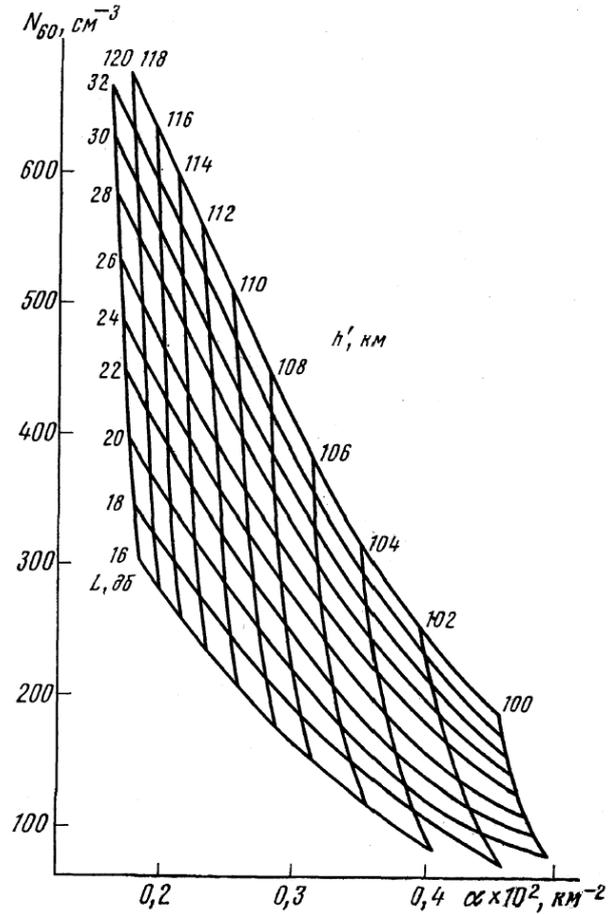


Рис. 3

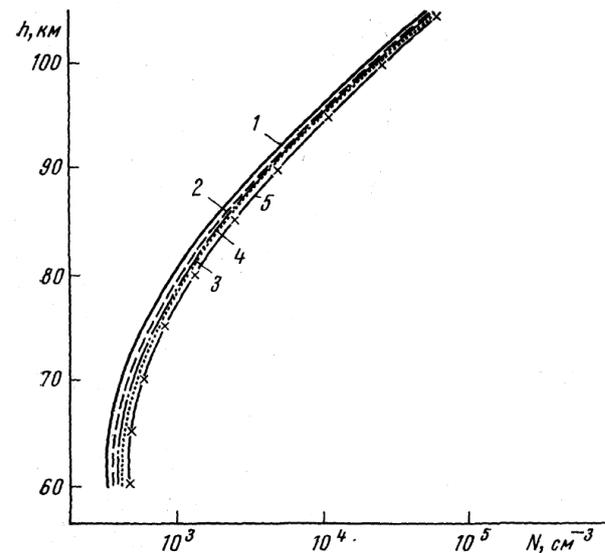


Рис.4

Ситуация в какой-то степени аналогична той, которая имеет место в радиоастрономии [12] при измерении поглощения радиоволн

земной атмосферой, когда об интенсивности источника, находящегося вне атмосферы, можно судить по различию в поглощении обеих магнитоионных компонент радиоволн космического происхождения. Рассмотрим методику определения постоянной аппаратуры в методе А1, основанную на технике раздельного приема обеих магнитоионных компонент сигнала.

При обработке экспериментальных данных по измерению поглощения радиоволн в ионосфере методом А1 на магниторасщепленных компонентах замечено, что между логарифмами амплитуд обыкновенной E_0 и необыкновенной E_x волн, измеренных на частотах $f \sim 4-6$ МГц, существует зависимость, близкая к линейной:

$$E_0 - E_x = (E_0 + K)C \quad (18)$$

где C – константа; K – поправка на высоту.

Такая зависимость, представляющаяся очевидной в случае малости отклоняющего поглощения, может существовать и при некоторых других условиях. Например, если между отклоняющими поглощениями o - и x -волн существует линейная зависимость, то для выполнения условия (18) необходимо, чтобы в суточном ходе параметры $N(h)$ - и $\nu(h)$ -профилей изменялись таким образом, чтобы линейная зависимость существовала также между отклоняющим и неотклоняющим поглощением o -волны.

Для проверки существования таких условий и подтверждения экспериментальных результатов, упомянутых ранее, был поставлен следующий численный эксперимент. Выбран характерный ионосферно-спокойный день, для которого рассчитывались через 15-минутные интервалы времени $N(h)$ -профили. Последние были усреднены за получасовые интервалы и по результирующим $N(h)$ - и некоторым постоянным $\nu(h)$ -профилям рассчитано поглощение радиоволн в диапазоне 4-6 МГц для обеих волн на фиксированной частоте f и для x -волны также на частоте $f + 0,7$ МГц. Вычисления производились в рамках обобщенной магнитоионной теории. Результаты расчетов удовлетворяют линейной зависимости с точностью не хуже 3% (в большинстве случаев лучше 1%) для расчетов на одинаковой частоте и не хуже 1,0% для всех расчетов, когда поглощение необыкновенной волны вычислялось на частоте $f + 0,7$ МГц. Поскольку указанная величина отклонения от линейного закона меньше разброса экспериментально определенных от ионосферы сигналов o - и x -волн, то ею можно пренебречь.

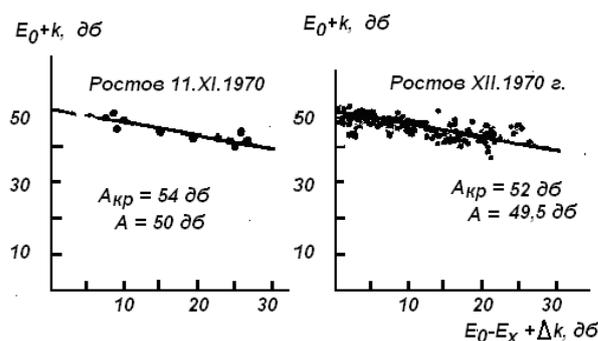


Рис. 5

Рисунок 5 иллюстрирует существование предлагаемого метода и одновременно является примером определения постоянной аппаратуры A этим методом для $f = 4$ МГц, для конкретных условий, когда определение постоянной аппаратуры $A_{кр}$ было также возможно методом кратных отражений. Здесь по оси абсцисс отложена разность усредненных логарифмов амплитуд обыкновенной и необыкновенной отраженных волн плюс разность поправок на высоту для o - и x -волн, а по оси ординат – усредненный логарифм амплитуд обыкновенной волны плюс ее поправка на высоту. Из фигуры видно, что экспериментальные величины достаточно хорошо подчиняются линейной зависимости. Величина ординаты, отсекаемая прямой, и есть постоянная аппаратуры, определенная предлагаемым методом. Для сравнения на фигуре указана также постоянная аппаратуры, определенная методом кратных отражений.

При измерении поглощения часто присутствуют очень медленные компоненты фединга, которые по-разному влияют на отражения 1-й и 2-й кратности. Это является причиной ошибок при определении постоянной аппаратуры методом кратных отражений. Ошибки могут быть очень велики и в отдельных случаях достигать 20 дБ. Поэтому для надежного определения постоянной необходимо иметь достаточное число независимых наблюдений, когда уже есть основание применять статистический анализ. Если учесть, что количество полностью независимых наблюдений, получаемых в течение одного калибровочного сеанса (т.е. в течение одного вечера или ночи), в среднем может быть около двух [13], то на это потребуется около одного месяца. Рассматриваемый метод не подвержен влиянию медленной компоненты фединга, так как она одновременно действует на o - и x -компоненты 1-й кратности, а отражения 2-й кратности в нем не используются.

Таким образом, производя измерение поглощения o - и x -компонент в невозмущенный день, можно определить постоянную аппаратуры с достаточной степенью точности даже за один день. Об этом свидетельствует сравнительно небольшой разброс точек на графике.

Настоящий метод, по-видимому, свободен от некоторых недостатков, присущих методу кратных отражений, в частности от весьма произвольного приравнивания отражающих свойств дневной и ночной ионосфер, что особенно существенно для высоких частот. Действительно, из фигуры видно, что постоянная аппаратуры, определенная настоящим методом, ниже постоянной аппаратуры, определенной методом кратных отражений, на ~ 3 -4 дБ, т.е. как раз на ту величину, на которую должен изменяться коэффициент отражения вследствие перехода от более диффузного ночного слоя к менее диффузному дневному слою. Существенно, что предлагаемый метод определения постоянной аппаратуры также не зависит от изменения отражающих свойств земной поверхности.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ N(H)-ПРОФИЛЕЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВНЕШНЕГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Внешнее зондирование со спутников дает распределение критической частоты вдоль траектории спутника, которое является главным адаптационным параметром для модельных расчетов $N(h)$ -профилей в ионосфере вдоль радиотрассы.

Вычисление $N(h)$ -профиля по данным внешнего зондирования может быть использовано для нахождения второго адаптационного параметра $hmF2$. В связи с тем, что на ионограммах внешнего зондирования отсутствуют области с ненаблюдаемой ионизацией расчет выполняется по соотношениям (1-9) по следу обыкновенной компоненты, либо для необыкновенной компоненты по соотношениям (12-16). На практике выбирается для расчетов та компонента, которая более отчетливо выглядит на ионограмме. Вычисленный дополнительный адаптационный параметр (высота максимума ионосферы) по данным внешнего зондирования должен совпадать с аналогичным, вычисленным по данным наземного зондирования. Их несовпадение служит аргументом для повторения рекурсивных расчетов.

ВЫВОД

Таким образом, для расчетов распространения радиоволн соответствующие адаптационные параметры для ионосферных моделей вычисляются наиболее совершенными способами и гарантируют совпадение высоты максимума ионосферы (как адаптационного параметра) и критических частот слоев, как дополнительных адаптационных параметров.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-13125 офи_м_РЖД.

CONVERSION METHOD OF IONOSONDE DATA IN THE PARAMETERS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE IONOSPHERE ELECTRON CONCENTRATION FOR THE PROBLEM RAILWAYS.

V.B. Lapshin, N.P. Danilkin, S.V. Zhuravlev, N.G. Kotonaeva, M.Y. Filippov

Calculating method of the spatial distribution parameters of the electron concentration on the basis of available the model and the experimental data - IRI 2011 model, vertical sounding and processed results is proposed for problem Railways.

KEY WORDS: IONOSPHERE, RADIOWAVE PROPAGATION, DISTRIBUTIONS OF ELECTRON CONCENTRATE, MAGNETOIONIC COMPONENTS, MODELLING, IRI

ЛИТЕРАТУРА

1. Bilitza D.(ed.) International Reference Ionosphere 1990. NSSDC90-22, Greenbelt, Maryland, 1990
2. Titheridge J.E. The calculation of real and virtual heights of reflection the ionosphere –J. Atm. Terr. Phys., 1959, 17, 96–09.
3. Данилкин Н.П. Катанаева Н.Г. Расчет высотных профилей электронной концентрации в ионосфере по ионограммам космической станции «Мир», Изв. вузов. Радиофизика, 2002, т.45, №5

4. Jackson J.E. J. Geophys. Res., 1956, 61, 107
(Пробл. соврем. физ. Сб. перев. и обз. ин. период, лит., 1957, 10, 152).
5. Titheridge J.E. J. Atmos. and Terr. Phys., 1959, 17, 110
6. Storey L.R. J. Res. Nat. Bur. Standards, 1960, D64, № 2, 111
7. Titheridge J.E. J. Atmos. and Terr. Phys., 1959, 17, 96
8. W. J. Beynon, S. Rangaswamy. J. Atmos. and Terr. Phys., 1969, 31, 891
9. H. K. Sen, A. A. Wyller. J. Geophys. Res., 1960, 65, 3931.
10. Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф. Номограммы для расчета модельного $n(h)$ – профиля в d – области ионосферы Геомagnetизм и аэрoномия, 1973, т. XIII, №5, с. 927-929
11. Н. Горбушина. Инструкция по измерению поглощения радиоволн в ионосфере. Л., 1959
12. C. G. Little, G. M. Lerfold, R. Parthasarathy. Rad. Sci., 1964, 68D, 859
13. W. R. Piggot. Annals of the IGY, III, part II, Pergamon Press, 1957