

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ВЫСОТНЫХ ПРОФИЛЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИ МНОЖЕСТВЕННОМ РАССЛОЕНИИ ОБЛАСТИ E

© 2021 г. П. Ф. Денисенко¹, *, В. В. Соцкий¹, **

¹Научно-исследовательский институт физики (НИИ физики ЮФУ),

г. Ростов-на-Дону, Россия

*e-mail: denis@sfedu.ru

**e-mail: vvsotsky@sfedu.ru

Поступила в редакцию 01.10.2020 г.

После доработки 14.12.2020 г.

Принята к публикации 28.01.2021 г.

Предложен способ определения высотных профилей электронной плазменной частоты по ионограммам вертикального зондирования с учетом дополнительных отражений сигналов от слоя $E2$ и от спорадического слоя Es . Рассмотрено два варианта расчетов профиля для области E : с использованием параболической модели электронной концентрации и с использованием профилей из модели IRI. Предложен способ корректировки моделей, учитывающий наличие слоев $E2$ и Es . Расчеты показывают, что учет расслоений $E2$, Es или их комбинации дает практически совпадающие профили в области F независимо от используемой модели для области E . Во всех расчетах, учитывающих слой $E2$, отсутствует долина электронной концентрации в межслоевой EF -области. При наличии данных о поглощении сигналов, отражающихся от слоя E , возможна дополнительная коррекция профилей из модели IRI по этим данным. Предложен способ такой коррекции с максимальным изменением профиля в области D . Проведенное тестирование методики по данным четырех наземно-ракетных экспериментов показывает хорошее согласие рассчитанных профилей, в том числе с учетом слоя $E2$, с ракетными измерениями электронной концентрации в области E .

DOI: 10.31857/S0016794021040052

1. ВВЕДЕНИЕ

Часто в области E диагностируются дополнительные слои $E2$ и Es [U.R.S.I. Handbook ..., 1978]. Ни в одном из известных методов восстановления высотных зависимостей электронной концентрации $n_e(h)$ (или $f_N(h)$ -профилей, в терминах электронной плазменной частоты) из ионограмм вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы слой $E2$ не рассматривается как самостоятельный с собственными параметрами критической частоты $foE2$ и высоты максимума $hmE2$. В лучшем случае область E рассматривается как единое целое, состоящее из собственно регулярного слоя E и дополнительного расслоения $E2$. Спорадический слой Es , как правило, игнорируется. Между тем, слой Es может оказывать существенное влияние на ВЧ-радиоволны, в частности, он может поддерживать распространение собственных мод и может вызывать большие потери при распространении сигналов с отражением от области F [Handbook ..., 1998].

Целью работы является учет дополнительных расслоений в области E и оценка влияния

данной процедуры на точность восстановления $f_N(h)$ -профилей в области F . Рассматриваются и сопоставляются два базовых способа расчета $f_N(h)$ -профилей в области E . В первом, наиболее распространенном в мире¹, слой E представляется в виде эквивалентного параболического распределения электронной концентрации, учитывающего ионизацию в области E , при расчетах профиля в области F [Reinisch and Xueqin, 1983]. Как отмечают авторы, их метод предназначен для определения $n_e(h)$ -профиля в области F и не предназначен для исследования ионизации в нижней области E . Во втором [Денисенко и др., 2018; Денисенко и Соцкий, 2019] – для расчетов $f_N(h)$ в областях D и E используется корректируемая модель IRI-2016 [Bilitza et al., 2017]. Для декаметровых радиоволн, распространяющихся в ионосфере, на области D и E приходится ~80% общих

¹ В центре данных LGDC (The Lowell GIRO Data Center) накоплено более 17 миллионов ионограмм и $n_e(h)$ -профилей, рассчитанных программой NHPS по данным мировой сети ионосферных станций ВЗ (<http://giro.uml.edu/>, <http://giro.uml.edu/sao-explorer.html>).

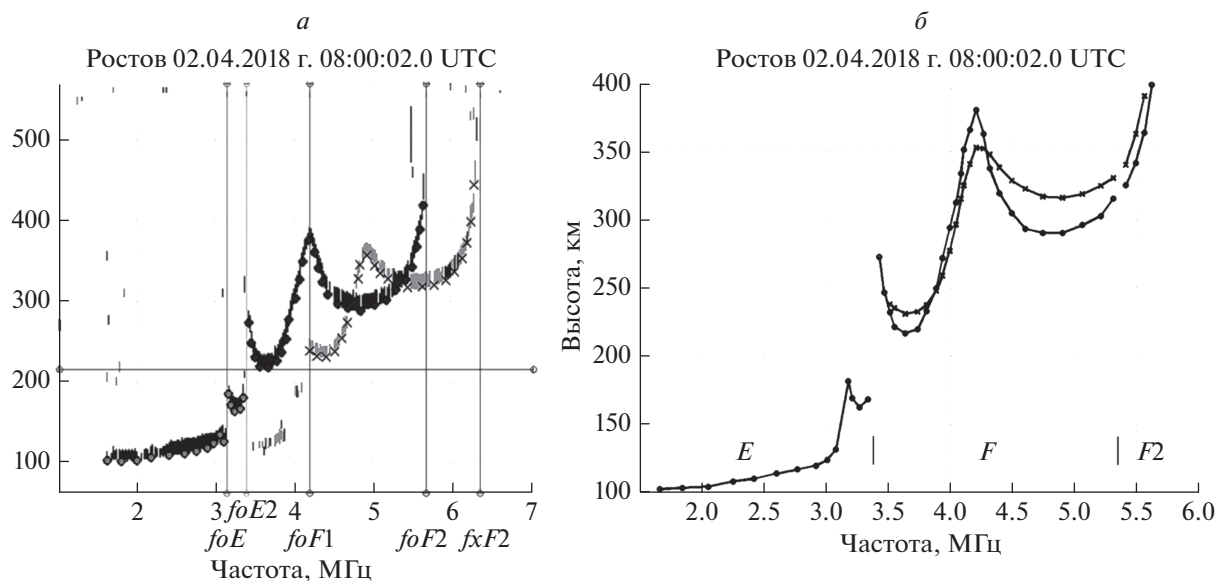


Рис. 1. Ионограмма с расслоением $E2$ в области E (а). Показаны точки оцифровки обоих следов. Разделение частотного диапазона на три интервала (б): первый – E -область, второй – F -область, третий – окрестность максимума слоя $F2$. Кривые с кружками – o -следы, линии с крестиками – x -следы ионограммы. Необыкновенный след представлен в функции эквивалентных частот $f \rightarrow f\sqrt{1 - f_H/f}$, где f_H – гирочастота электронов.

энергетических потерь. Поэтому в первом способе оценка поглощения радиоволн в ионосфере не предусмотрена. Второй способ дает значения поглощения, близкие к экспериментально наблюдаемым [Денисенко и др., 2018; Денисенко и Соцкий, 2019].

Отметим, что существование различных способов учета ионизации в нижней ионосфере обусловлено некорректностью обратной задачи [Денисенко и Соцкий, 1987; Danilkin et al., 1988]. Это означает, что в частотном интервале ионограммы $0 \leq f \leq f_{\min}$, в котором отсутствуют отражения сигналов вследствие их поглощения, возможно получение множества отличающихся друг от друга решений ($f_N(h)$ -профилей). В этих случаях из физических предположений, а также в зависимости от целей дальнейшего применения рассчитанных из ионограммы $f_N(h)$ -профилей, привлекается дополнительная информация о высотном ходе $f_N(h)$, позволяющая существенно сузить множество решений вплоть до единственного.

2. МЕТОД РАСЧЕТА $f_N(h)$ -ПРОФИЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Все использованные в работе ионограммы, если не оговорено особо, зарегистрированы ионозондом “Парус” в п. Ростов (47.24° N, 39.63° E).

Для восстановления $f_N(h)$ -профилей в F -области за основу взят модифицированный вариант методики [Денисенко и Соцкий, 2019]. Как и в

публикации [Денисенко и Соцкий, 2019], весь частотный диапазон на ионограмме ВЗ (рис. 1а) условно разделяется на три интервала (рис. 1б): первый – E -область; второй – F -область; третий – окрестность максимума слоя $F2$, к которой относятся 3–5 отраженных сигналов каждой из поляризаций.

Действующие высоты o -следа $h'_o(f)$ из первого интервала используются для восстановления $f_N(h)$ -профиля в областях D и E , включая дополнительные расслоения $E2$ и Es . Методика расчетов детально описана ниже.

Второй частотный интервал используется для восстановления $f_N(h)$ -профиля в области F . В этой части ионосферы применяется кусочно-линейное представление высотной зависимости электронной концентрации. В отличие от метода, изложенного в работе [Денисенко и Соцкий, 2019], расчет $f_N(h)$ -профиля для второго частотного интервала проводится по обоим следам ионограммы с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [Худсон, 1970]. Решение находится путем минимизации суммы квадратов невязок расчетных и экспериментальных действующих высот отражения o -сигналов $h'_o(f)$ и x -сигналов $h'_x(f)$. Выбор МНК обусловлен следующими соображениями. За счет боковых отклонений лучей зондирующие o - и x -сигналы распространяются в разных пространственных секторах ионосферы. При наличии горизонтальных градиентов электрон-

ной концентрации o - и x -следы ионограммы будут отличаться от таковых для горизонтально стратифицированной среды. Дополнительным источником рассогласования рассчитываемых o - и x -следов являются ошибки оцифровки ионограммы и неадекватность принятой модели реальному высотному распределению плазменных частот. Поэтому рассчитанный $f_N(h)$ -профиль представляет некий усредненный результат, отнесенный к пункту зондирования. Отметим, что при известных углах прихода отраженных от ионосферы лучей детальную диагностику градиентов можно провести с помощью методики [Zabotin et al., 2006; Жбанков и Заботин, 2009].

Действующие высоты обоих следов ионограммы из третьего частотного интервала используются для восстановления $f_N(h)$ -профиля в окрестности максимума слоя $F2$.

В настоящей работе используется три вида аппроксимации высотной зависимости электронной концентрации $n_e(h)$ ($n_e \sim f_N^2$) в разных слоях ионосферы: кусочно-линейная, параболическая и квазигауссовская. Кусочно-линейная аппроксимация применяется в областях D , E и F . Параболическая зависимость принимается для слоя E

$$f_N^2(h) = (foE)^2 \left[1 - \left(\frac{hmE - h}{H_p} \right)^2 \right] \quad (1)$$

в интервале высот $h_0 \leq h \leq hmE$, где h_0 – высота начала ионосферы с плазменной частотой $f_{N0} = 0$; hmE – высота максимума; foE – критическая частота; H_p – полутолщина параболы. Квазигауссовское распределение описывает высотный ход электронной концентрации в окрестности максимума области $F2$

$$f_N^2(h) = (foF2)^2 \exp \left[- \left(\frac{hmF2 - h}{H_g} \right)^2 \right],$$

где $foF2$ и $hmF2$ – соответственно критическая частота и высота максимума слоя $F2$; H_g – шкала высоты.

Для определения парциального вклада любого высотного интервала $[h_1, h_2]$ в действующую высоту на частоте f используется преобразование

$$\delta h'(f) = \int_{h_1}^{h_2} \mu'[f, f_N(h)] dh = \int_{f_{N1}^2}^{f_{N2}^2} \mu'(f, f_N) \frac{dh}{df_N^2} df_N^2,$$

где μ' – групповой показатель преломления. Для сокращения записи зависимость μ' от гирочастоты электронов f_H и угла между волновым вектором и вектором напряженности геомагнитного поля опущена. Для μ' используется его представление из работы [Paul, 1967]. В зависимости от вида производной dh/df_N^2 получаем:

$$\begin{aligned} \delta h'(f) &= \Delta h A_l(f, f_{N1}, f_{N2}), \\ \Delta h &= h_2 - h_1 \text{ для линейного слоя,} \\ \delta h'(f) &= H_p A_p(f, f_{Np}, foE) \\ &\text{для параболического слоя,} \\ \delta h'(f) &= H_g A_g(f, f_{Ng}, foF2) \\ &\text{для квазигауссовского слоя.} \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь индексы “ l , p , g ” у величин A обозначают соответствующую модель слоя; f_{Np} и f_{Ng} – плазменные частоты в основании параболического и квазигауссовского слоев. Примеры получения конкретных выражений для величин A даны в работе [Денисенко и Соцкий, 2019].

Для определения параметров слоев минимизируется функционал

$$R(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \left[h'(f_i) - h'_{\text{calc}}(f_i, \mathbf{x}) \right]^2, \quad (3)$$

где n – число отсчетов действующих высот, по набору \mathbf{x} линейных и одного нелинейного параметра (критической частоты); индекс “ calc ” обозначает вычисляемые значения действующих высот. Минимизация (3) при фиксированном нелинейном параметре сводится к стандартной схеме МНК [Худсон, 1970]. Для получения оптимального решения критическая частота варьируется в допустимых пределах, и находится минимум минимума выражения (3). Затем определяются невязки

$$\Delta h'(f_i) = h'(f_i) - h'_{\text{calc}}(f_i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

и находится среднеквадратичное отклонение (СКО) экспериментальных действующих высот от расчетных

$$S = \left[\sum_{i=1}^n [\Delta h'(f_i)]^2 / n \right]^{1/2}, \quad (5)$$

которое определяет качество решения.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ $f_N(h)$ -ПРОФИЛЕЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОСТОГО СЛОЯ E

Для параболической модели слоя E действующие высоты o -сигналов, отражающиеся от него, представляются в виде

$$h'_o(f_i) = h_0 + H_p A_p(f_i, f_{N0}, foE), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

При фиксированном значении foE переопределенная ($n > 2$) система линейных уравнений (6) решается методом наименьших квадратов, и находятся параметры h_0 и H_p .

Большое отклоняющее поглощение вблизи максимума слоя E не дает возможности определить точное значение критической частоты foE .

Таблица 1. Сравнение параметров полного профиля для двух моделей простого слоя E

Модель слоя E	h_0 , км	foE , МГц	hmE , км	S_E , км	$foF2$, МГц	$hmF2$, км	So , км	Sx , км
Парабола	98.4	1.85	109.5	2.8	5.37	232.8	1.8	2.4
Коррекция IRI	65.0	1.88	109.9	4.3	5.37	231.7	1.7	2.4

Можно только утверждать, что она находится в интервале частот $foE_{\max} < foE < foF_{\min}$. Здесь foE_{\max} – максимальная рабочая частота o -сигналов для области E , foF_{\min} – минимальная рабочая частота для области F . Вариации критической частоты foE в интервале $foE_{\max} < foE < foF_{\min}$ с решением системы (6) позволяют найти минимальное СКО (5) S_E с соответствующими ему значениями foE , h_0 , H_p , $hmE = h_0 + H_p$, определяющими весь $f_N(h)$ -профиль (1).

Коррекция модели IRI для нижней ионосферы в настоящей работе осуществляется следующим образом. В первом приближении для условий эксперимента (географические координаты, мировое время UT) задаются значения высоты максимума $hmE_{IRI} = 110$ км и критической частоты $foE_{IRI} = 0.5(foE_{\max} + foF_{\min})$. Для этих исходных данных модель IRI дает таблицу высот с постоянным шагом Δh_{IRI} от начала ионосферы h_0 до высоты hmE_{IRI} и соответствующую таблицу плазменных частот $f_{N, IRI}$ от $f_{N0} = f_{N, IRI}(h_0)$ до $f_{N\max} = f_{N, IRI}(hmE_{IRI})$. Назовем этот $f_{N, IRI}(h)$ -профиль базовым.

Между двумя соседними точками таблицы принимается линейное по высоте распределение электронной концентрации. Для волн, вертикально падающих на ионосферу, парциальный вклад j -го интервала в действующую высоту o -сигнала на частоте f_i определяется выражением (2)

$$\delta h'_{o,j}(f_i) = \Delta h A_{i,j}(f_i, f_{N_{j-1}}, f_{N_j}).$$

Действующая высота для каждой частоты может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} h'_o(f_i) &= h_0 + \sum_{j=1}^{r(i)} \delta h'_{o,j}(f_i) = \\ &= h_0 + \Delta h \sum_{j=1}^{r(i)} A_{i,j}(f_i, f_{N_{j-1}}, f_{N_j}) = h_0 + \Delta h M_{i,i}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$; $r(i)$ – номер интервала, на котором отражается i -ый сигнал. Определение величины $M_{i,i}$ очевидно. Индекс “ i ” подчеркивает линейную аппроксимацию электронной концентрации между соседними точками таблицы IRI. Представив выражение (7) в виде переопределенной системы уравнений

$$M_{i,i} \Delta h = h'_o(f_i) - h_0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

находим с помощью МНК единственную неизвестную Δh . В результате определяются новая

скорректированная по действующим высотам (“деформированная” по высоте) таблица $f_N(h)$ и соответствующее СКО S_E (5).

Для определения оптимального значения foE используется следующий прием. Модель IRI в нижней ионосфере имеет максимальный градиент df_N/dh на высоте $h_D \approx 95$ км. Часть ионосферы, находящаяся выше этого уровня, дает главный вклад в групповое запаздывание сигналов. Поэтому при изменении критической частоты на величину ΔfoE коррекция подвергается модель IRI именно в интервале высот $h_D < h \leq hmE$. С этой целью к плазменным базовым частотам модели $f_{N, IRI}$ добавляется (вычитается) поправка вида

$$\Delta f_N = \Delta foE \left(\frac{h - h_D}{hmE - h_D} \right)^2, \quad (9)$$

где $\Delta foE < foF_{\min} - foE_{IRI}$. Как следует из (9), максимальное изменение плазменной частоты происходит на высоте максимума слоя E , минимальное (нулевое) – на высоте h_D . Варьируя теперь критическую частоту foE_{IRI} с соответствующим изменением плазменных частот по формуле (9) и решая каждый раз систему уравнений (8), по минимальному значению S_E находим табличную зависимость $f_N(h)$, наилучшим образом согласующуюся с действующими высотами ионограммы. Полученное решение с критической частотой $foE = foE_{IRI} + \Delta foE$ и высотой максимума $hmE = h_0 + (n_E - 1)\Delta h$, где n_E – число точек в таблице IRI, является оптимальным.

Расчет профилей выше слоя E проводится по скорректированным на нижнюю ионосферу действующим высотам сигналов, отраженных от области F . Результаты восстановления полных профилей из ионограммы, изображенной на рис. 2а, представлены на рис. 2б и в табл. 1. Используются обозначения: So и Sx – среднеквадратичные отклонения (5) соответственно для действующих высот o - и x -следов ионограммы в области F . Из графиков и таблицы видно, что ключевые параметры (критические частоты и высоты максимумов слоев) либо совпадают, либо близки. Параболическая модель дает меньший, чем скорректированная модель IRI, вклад в групповые пути сигналов, отраженных в области F . Поэтому соответствующий $f_N(h)$ -профиль имеет хотя и мало отличающиеся, но большие истинные высоты.

На рисунке 3 в качестве примера представлены частотные (эквивалентные) зависимости невязок

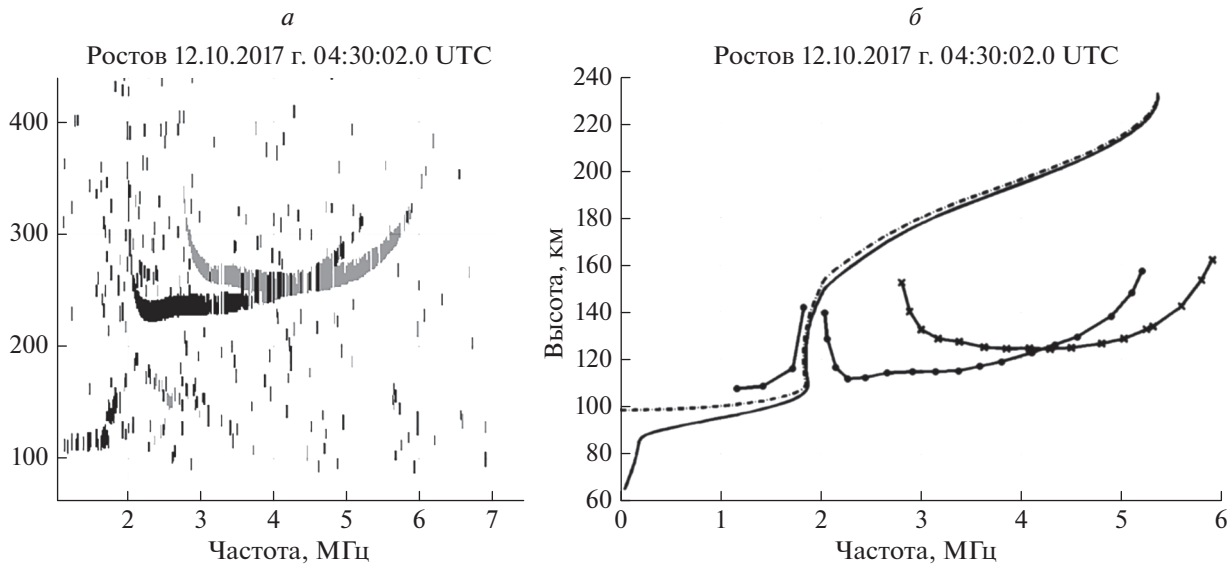


Рис. 2. Ионограмма (а) и вычисленные по ней полные $f_N(h)$ -профили (б): сплошная линия – коррекция модели IRI в области E ; штрихпунктирная линия – параболическая зависимость $n_e(h)$ в области E . Кривые с кружками – o -след; кривые с крестиками – x -след. Действующие высоты обоих следов в области F уменьшены в два раза.

действующих высот (4) для o - и x -следов в области F . Видно, что невязки для сигналов разных поляризаций изменяются в “противофазе”. Средние по всему частотному интервалу значения невязок близки по абсолютной величине и противоположны по знаку. Обращает внимание увеличение невязок на частотах, близких к критической частоте $foF2$. Сигналы разных поляризаций вблизи максимума ионосферы имеют максимальное пространственное расхождение, что обеспечивает максимальную чувствительность к горизонтальным градиентам. Таким образом, восстановленный $f_N(h)$ -профиль, действительно, “усреднен” по пространственному сектору радиозондирования.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ $f_N(h)$ -ПРОФИЛЕЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СЛОЯ $E2$

Ионограмма с наличием слоя $E2$ представлена на рис. 1а. Первый интервал (E -область) рабочих частот o -следа ионogramмы (рис. 1б) разбивается на две группы отсчетов. К первой группе относится начальный отрезок ионogramмы (n_1 отсчетов), включая точку перегиба на частоте, которая принимается условно в качестве критической частоты foE (рис. 1а). Вторая группа из n_2 отсчетов относится к области $E2$ с критической частотой $foE2$. Рассмотрено два варианта расчетов. В первом – обе группы данных объединяются, и расчеты проводятся так же, как для простого слоя E со значением критической частоты foE , равным $foE2$. Во втором варианте последовательно восстанавливается сначала слой E (с критической ча-

стотой foE из ионogramмы на рис. 1а), а затем слой $E2$ (с критической частотой $foE2$), который представляется параболической моделью.

Рассмотрим второй вариант расчетов с использованием коррекции IRI-профиля. Задача решается в два этапа. На первом этапе по действующим высотам отражений $h'_o(f)$, $f \leq foE$ сигналов первой группы проводится расчет $f_N(h)$ -профиля в области E . Используется алгоритм коррекции базового профиля модели IRI, описанный в разделе 3. Отличие заключается только в том, что начальное значение $foE_{IRI} = foE$, и табличные значения $f_{N, IRI}(h)$ корректируются по формуле (9) для положительного значения ΔfoE . Поскольку в этом случае новая критическая частота всегда превышает foE_{IRI} , то приходится ограничивать измененную сетку плазменных частот значением foE_{IRI} . После пересчета величин $M_{l,i}$, $i = 1, 2, \dots, n_1$ (7) и решения системы уравнений (8) МНК находится новый высотный шаг таблицы Δh и соответствующее СКО (5) S_{E1} . Путем вариаций ΔfoE находят минимальное значение S_{E1} , соответствующие ему hmE , шаг таблицы Δh и $f_N(h)$ -профиль ниже высоты hmE . Последняя точка профиля $f_{Nmax} = f_N(hmE) = foE_{IRI}$ служит начальной точкой для расчетов профиля в слое $E2$.

На втором этапе по действующим высотам отражений $h'_o(f)$, $foE \leq f \leq foE2$ сигналов второй группы проводится расчет $f_N(h)$ -профиля в слое $E2$. Для него в интервалах плазменных частот $foE \leq f_N \leq foE2$ и высот $hmE \leq h \leq hmE2$ принимается параболическое распределение

Ростов 12.10.2017 г. 04:30:02.0 UTC

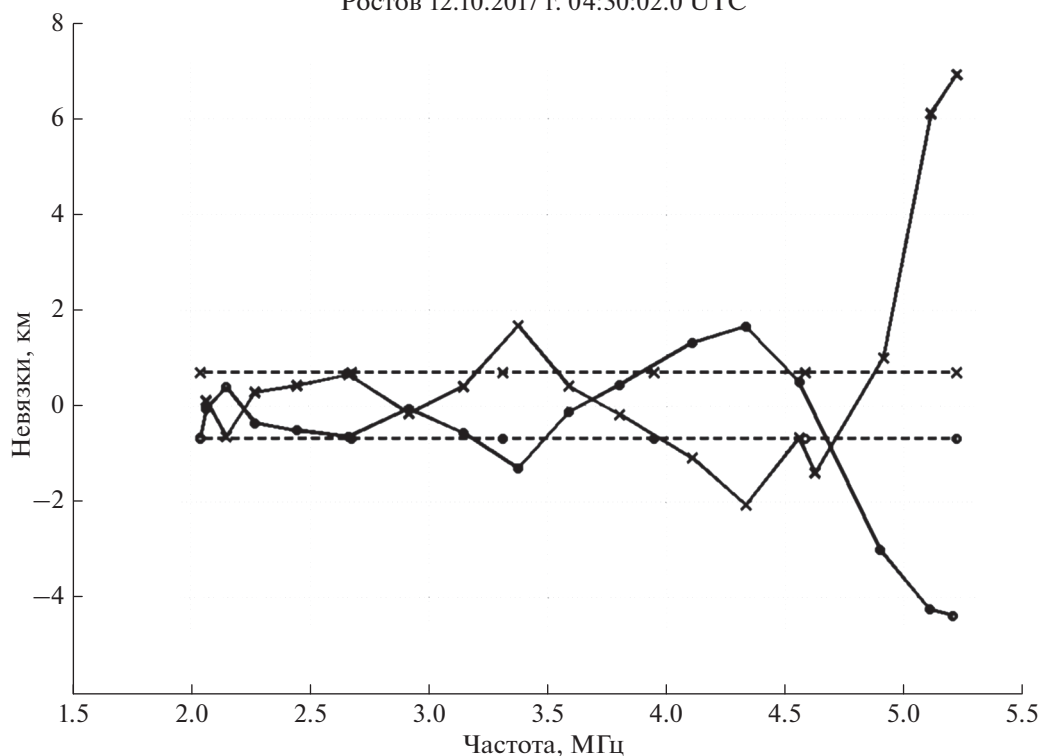


Рис. 3. Невязки действующих высот для *o*-следа (линия с кружками) и для *x*-следа на эквивалентных частотах (линия с крестиками). Штриховые прямые – средние по интервалу частот значения невязок (в тех же обозначениях).

$$f_N^2(h) = (foE2)^2 \left[1 - \left(\frac{hmE2 - h}{H_p} \right)^2 \right]$$

с высотой максимума $hmE2$ и полутолщиной H_p . Вклад слоя $E2$ в действующие высоты второй группы сигналов определяется путем удаления группового запаздывания ниже высоты hmE

$$\delta h'_o(f) = h'_o(f) - \int_{h_0}^{hmE} \mu'_o[f, f_N(h)] dh - h_0.$$

Тогда для определения параметра H_p получается переопределенная система уравнений

$$A_p(f_i, foE, foE2) H_p = \delta h'_o(f_i), \quad i = 1, 2, \dots, n_2. \quad (10)$$

Методом наименьших квадратов за счет вариаций $foE2$ из интервала $f_{n_2} < foE2 < foF_{min}$, находятся минимальное значение СКО S_{E2} (5), соответствующие ему $foE2$, H_p и высота максимума

$$hmE2 = hmE + H_p \sqrt{1 - (foE/foE2)^2}.$$

При аппроксимации области E двумя параболическими слоями схема расчетов такая же, как и выше. Сначала находится высота пересечения двух парабол hmE за счет минимизации СКО S_{E1} для первой группы данных. Затем удаляется вклад

нижней параболы в групповые пути сигналов второй группы, и по остаткам из системы уравнений (10) находятся параметры второй параболы.

Результаты восстановления полных $f_N(h)$ -профилей из ионограммы, изображенной на рис. 1, представлены на рис. 4 и в табл. 2. Включены четыре варианта расчетов, отличающиеся представлением профиля в нижней ионосфере: 1) при параболической аппроксимации $n_e(h)$ в области E без выделения слоя $E2$ в отдельный слой по объединенным данным первой и второй групп с критической частотой $foE = foE2$ (1-я строка табл. 2); 2) аналогичный первому расчет со скорректированным профилем модели IRI в области E с $foE = foE2$ (2-я строка); 3) при параболическом представлении слоев E и $E2$ (3-я строка); 4) со скорректированным профилем модели IRI в области E и с параболическим профилем в слое $E2$ (4-я строка). Значение СКО (5), рассчитанное для действующих высот отражения сигналов от слоев E и $E2$ (объединенное значение), обозначено как S_E . Соответствующие СКО для *o*- и *x*-следов в области F обозначены как S_o и S_x . Из 7-го столбца табл. 2 следует, что учет двух расслоений как единого целого дает аномально большие СКО действующих высот, а их отдельный учет уменьшает значения S_E в 3–4 раза. Большие значения СКО

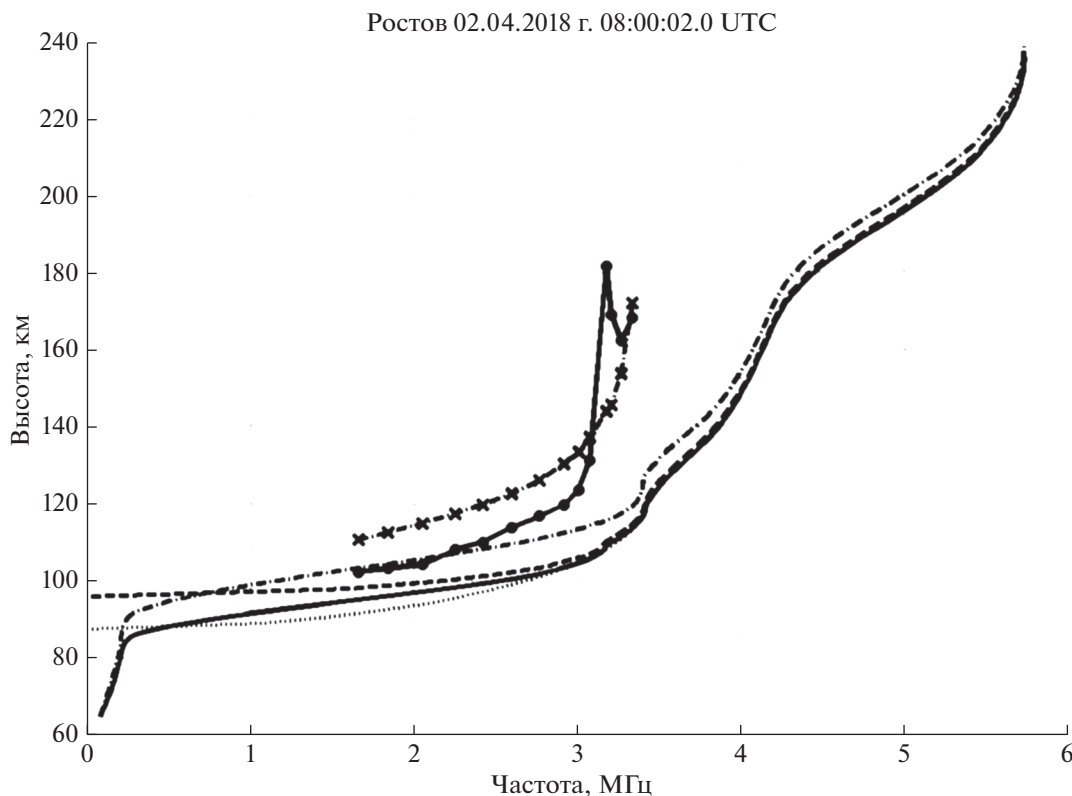


Рис. 4. Результаты восстановления полных $f_N(h)$ -профилей со слоями E и $E2$ из ионограммы, изображенной на рис. 1, для четырех вариантов представления ионизации в нижней ионосфере ($h \leq hmE2$). Расчеты без выделения слоя $E2$ в отдельный слой ($foE = foE2$): пунктирная линия — параболическая зависимость $n_e(h)$ для слоя E ; штрихпунктирная — скорректированный $f_N(h)$ -профиль модели IRI для слоя E . Расчеты с отдельным учетом слоев E и $E2$: штриховая линия — параболическое представление каждого из слоев; сплошная линия — скорректированный $f_N(h)$ -профиль модели IRI для слоя E и с параболой в слое $E2$. Сплошная линия с кружками — фрагмент ионограммы для областей E и $E2$, штрихпунктирная линия с крестиками — расчетная ионограмма для скорректированного профиля модели IRI ($foE = foE2$).

указывают на неадекватность применения моделей при объединении двух слоев. При этом, однако, использование параболического распределения в объединенном слое E дает в области F результаты, конкурирующие с результатами учета этих расслоений. Игнорирование двойного расслоения при коррекции модели IRI дает в слое E

и основании области F существенное различие профилей.

Из графиков видно, что скорректированный IRI-профиль, представляющий область E как единое целое, расположен выше такового, учитывающего наличие двух слоев. В области E эффективная частота соударений электронов экспонен-

Таблица 2. Сравнение параметров полного профиля для двух моделей слоев E и $E2$

	Модель слоя E	h_0 , км	foE , МГц	hmE , км	$foE2$, МГц	$hmE2$, км	S_E , км	$foF1$, МГц	$hmF1$, км	$foF2$, МГц	$hmF2$, км	So , км	Sx , км
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Парабола ($foE = foE2$)	87.3	—	—	3.38	120.7	11.4	4.20	166.6	5.72	233.6	3.8	7.0
2	Коррекция IRI ($foE = foE2$)	65.0	—	—	3.38	125.8	15.0	4.20	172.1	5.74	239.1	4.2	7.0
3	Парабола	96.0	3.18	110.6	3.41	119.8	2.6	4.20	167.8	5.73	235.6	3.8	7.6
4	Коррекция IRI	65.0	3.18	109.3	3.42	119.6	3.4	4.20	166.7	5.74	235.8	4.4	7.2

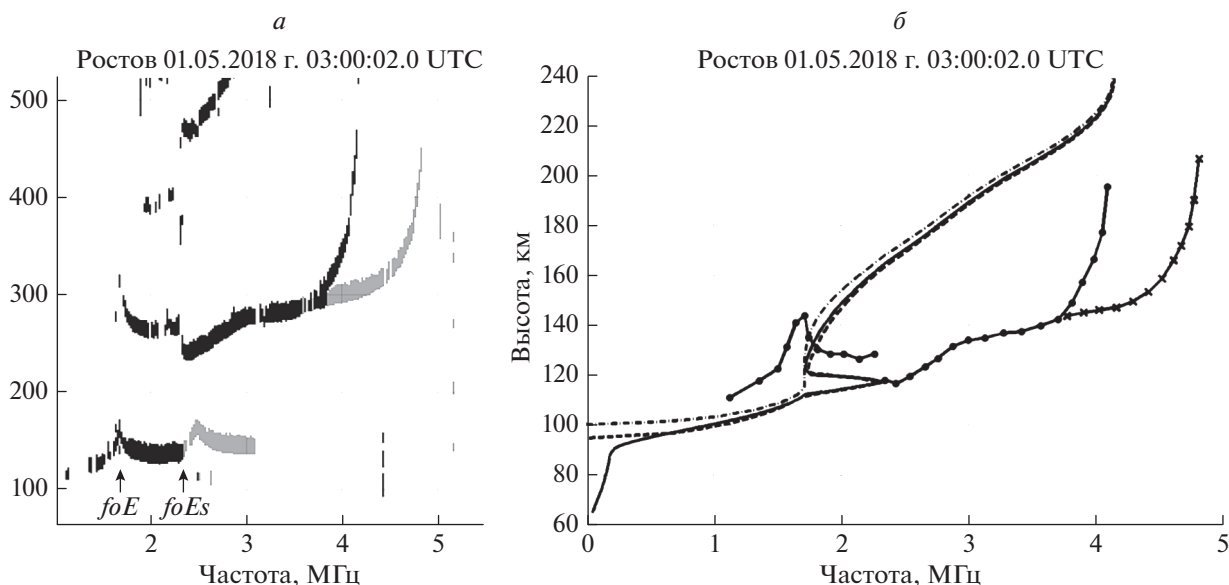


Рис. 5. Ионограмма со спорадическим слоем E_s (а) и вычисленные по ней полные $f_N(h)$ -профили (б): сплошная линия – скорректированная модель IRI и линейный слой E_s ; штрихпунктирная линия – параболическое распределение $n_e(h)$ с игнорированием слоя E_s ; штриховая линия – параболическое распределение $n_e(h)$ и линейный слой E_s . Ионограмма (б): сплошные кривые с кружками – o -след, с крестиками – x -след. Действующие высоты в области F уменьшены в два раза.

циально убывает с ростом высоты. Для радиоволн, вертикально отраженных областью E , это приводит к существенному занижению оценок поглощения радиоволн. Также обращает на себя внимание, что во всех расчетах профилей отсутствует сколь-нибудь выраженная долина $n_e(h)$ в межслоевой EF -области.

5. ВОССТАНОВЛЕНИЕ $f_N(h)$ -ПРОФИЛЕЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ НАЛИЧИИ СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E_s

Ионограмма со спорадическим слоем E_s типа “с” представлена на рис. 5а. Первый интервал рабочих частот o -следа ионogramмы (E -область, см. раздел 2) разбивается на две группы. К первой группе относится начальный отрезок ионogramмы (n_1 отсчетов), включая точку перегиба на частоте, которая принимается условно в качестве критической частоты foE области E . Второй отрезок ионogramмы (n_2 отсчетов) относится к слою E_s с критической частотой $foEs$. При аппроксимации области E параболической зависимостью $n_e(h)$ слой E_s игнорируется, и расчеты проводятся так же, как для простого слоя E (см. раздел 3). В этом случае истинное значение foE ищется путем вариаций foE в интервале частот $foE_{\max} < foE < foF_{\min}$.

Поиск скорректированного профиля модели IRI при наличии спорадического слоя проводится по той же схеме, что и для слоя $E2$ (см. раздел 4). Сначала по действующим высотам отражения

сигналов первой группы на частоте foE_{IRI} находится высота hmE , на которой пересекаются слои E и E_s . Для слоя E_s принимается линейная зависимость $n_e(h)$ с полутолщиной H_s (“наклонное зеркало”). Она находится МНК из системы уравнений, аналогичной (10), составленной для действующих высот второй группы сигналов

$$A_i(f_i, foE, foEs)H_s = \delta h'_i(f_i), \quad i = 1, 2, \dots, n_2.$$

Затем определяется высота максимума $hmEs = hmE + H_s$. Распределение электронной концентрации принимается симметричным в верхней и нижней частях слоя E_s с полутолщиной H_s .

При восстановлении верхней части профиля на высотах $h \geq hmEs$ спорадический слой игнорируется, начальной точкой является (foE, hmE) . Положение нижнего края долины определяется пересечением верхней части рассчитанного спорадического слоя и нижней части профиля, восстанавливаемого по o - и x -следам второго частотного интервала ионogramмы (F -область, см. раздел 2).

Результаты расчетов изображены на рис. 5б и суммированы в табл. 3. В интервале высот от 110 км до 150 км, как видно из графиков, 1-ой и 2-ой строк табл. 3, имеет место существенное расхождение результатов, хотя максимальные высоты $hmF2$ практически одинаковы. Использование параболического распределения для области E и линейного для E_s -слоя дает результаты близкие к IRI-

Таблица 3. Сравнение параметров полного профиля с дополнительным расслоением E_s

	Модель слоя E	h_0 , км	f_oE , МГц	hmE , км	f_oE_s , МГц	hmE_s , км	S_E , км	f_oF2 , МГц	$hmF2$, км	S_o , км	S_x , км
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Парабола	100.3	1.72	116.4	—	—	1.1	4.14	238.9	2.1	5.7
2	Парабола + E_s	94.2	1.72	111.8	2.32	116.9	2.8	4.15	238.7	3.4	5.8
3	Коррекция IRI + E_s	65.0	1.72	112.2	2.32	117.1	2.8	4.14	237.3	2.7	5.5

профилю. Это хорошо видно из сопоставления строк 2 и 3 табл. 3 и графиков на рис. 5б.

6. ВОССТАНОВЛЕНИЕ $f_N(h)$ -ПРОФИЛЕЙ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ НАЛИЧИИ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СЛОЕВ $E2$ И E_s

Ионограмма с двумя дополнительными расслоениями $E2$ и E_s представлена на рис. 6а. Из предыдущих разделов следует, что учет дополнительных расслоений в области E дает практически совпадающие $f_N(h)$ -профили в области F независимо от того, какая модель описывает слой E (параболическая или скорректированная IRI).

При наличии слоев $E2$ и E_s при любой модели $n_e(h)$ для слоя E расчеты проводятся последовательно в три этапа. На первом – восстанавливается профиль ниже hmE . На втором этапе находится

параболическое распределение в слое $E2$ (см. раздел 4). И, наконец, на третьем – линейное распределение $n_e(h)$ в слое E_s (см. раздел 5). Его параметры находятся по скорректированным на групповые запаздывания в слоях E и $E2$ действующим высотам отражения сигналов от слоя E_s . Результаты представлены на рис. 6б и в табл. 4. Из строк 2 и 3, а также из графиков видно практически полное совпадение результатов. Для сравнения проведены расчеты по схеме: слой E_s игнорируется, слой E и $E2$ объединяются и аппроксимируются параболой. Результаты представлены строкой 1 в табл. 4 и изображены штрихпунктирной кривой на рис. 6б. В данном случае имеют место большие расхождения результатов в долине и нижней части области F . Большое значение СКО в E -области $S_E = 10.8$ км при использовании параболи-

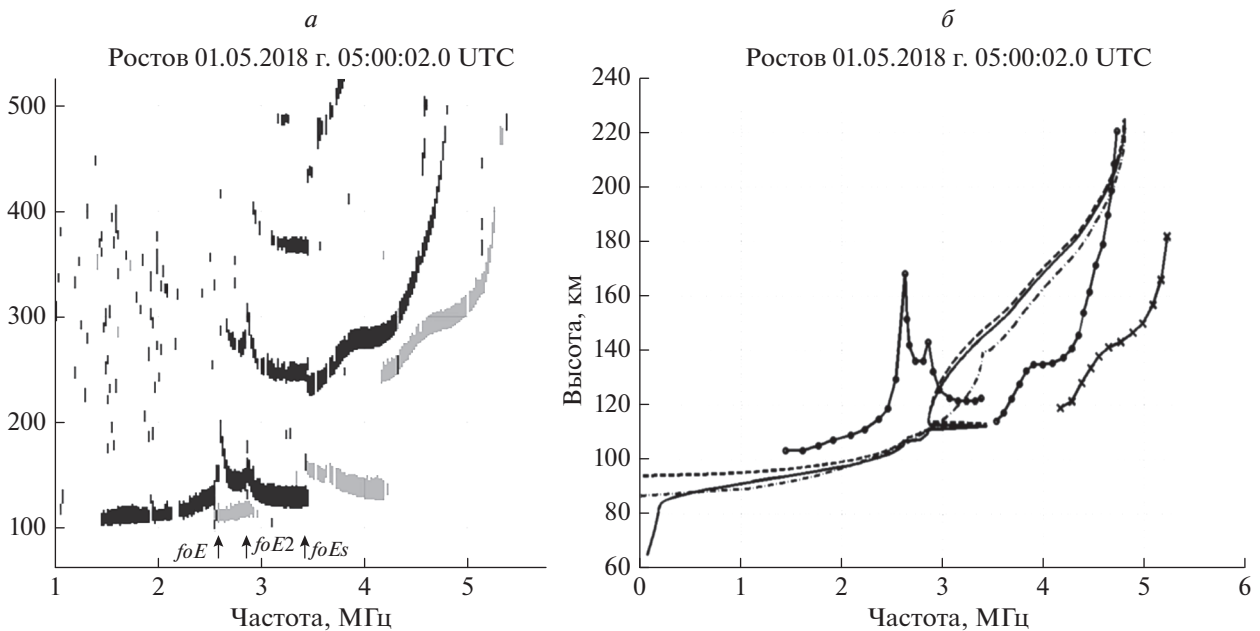


Рис. 6. Ионограмма с дополнительными расслоениями $E2$ и E_s (а) и вычисленные по ней полные $f_N(h)$ -профили (б): сплошная линия – скорректированная модель IRI с параболическим слоем $E2$ и линейным слоем E_s ; штрихпунктирная линия – параболическое распределение $n_e(h)$ для объединенных слоев E и $E2$ ($f_oE = f_oE2$) с игнорированием слоя E_s ; штриховая линия – параболические распределения $n_e(h)$ для слоев E и $E2$ и линейным слоем E_s . Ионограмма (б): сплошные кривые с кружками – о-след, с крестиками – х-след. Действующие высоты в F -области уменьшены в два раза.

Таблица 4. Сравнение параметров полного профиля с дополнительными расслоениями $E2$ и Es

	Модель слоя E и дополнительные слои	h_0 , км	f_oE , МГц	hmE , км	f_oE2 , МГц	$hmE2$, км	f_oEs , МГц	$hmEs$, км	S_E , км	f_oF2 , МГц	$hmF2$, км	S_o , км	S_x , км
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Парабола	87.3	—	—	3.40	139.0	—	—	10.8	4.81	221.8	2.9	6.1
2	Парабола + $E2$ + Es	94.0	2.63	107.5	2.86	111.1	3.44	113.0	3.0	4.80	224.8	2.6	6.2
3	Коррекция IRI + $E2$ + Es	65.0	2.63	106.8	2.86	110.9	3.44	112.1	1.8	4.81	225.2	2.7	6.0

Таблица 5. Результаты дополнительной коррекции модели IRI с использованием поглощения радиоволн на частоте 2.25 МГц при наличии простого E -слоя

Эксперимент	(ВЗА) $L_1 = 27.4$ дБ; $L_2 = 26.0$ дБ				(В-3) $L_1 = 20.2$ дБ; $L_2 = 19.0$ дБ			
	K	$\Delta L_1/L_1$, %	$\Delta L_2/L_2$, %	S_E , км	K	$\Delta L_1/L_1$, %	$\Delta L_2/L_2$, %	S_E , км
До коррекции	0	-25.4	-26.4	1.22	0	-41.3	-43.1	2.75
После коррекции	-0.45	0.4	0	1.45	-0.66	0.3	0	2.36

Примечание. (ВЗА) – высотный атмосферный зонд; (В-3) – Вертикаль-3.

ческого распределения указывает на неадекватность модели.

7. ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ $f_N(h)$ -ПРОФИЛЕЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНО-РАКЕТНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Проведенное выше сопоставление различных способов восстановления высотных зависимостей электронной плазменной частоты во внутренней ионосфере показывает, что учет расслоений $E2$, Es или их комбинации дает практически совпадающие результаты расчетов $f_N(h)$ в области F независимо от того, какая модель принята для самой нижней части $f_N(h)$ -профиля: параболическая или корректируемая модель IRI. Профили модели IRI отражают высотный ход $f_N(h)$ в нижней ионосфере в среднем, поэтому их коррекция дает лишь эквивалентные распределения в смысле наилучшего соответствия действующим высотам o -следа в области E . При дополнительной коррекции они могут стать эквивалентными и в смысле соответствия данным о поглощении радиоволн при вертикальном зондировании области E .

Оценим такие возможности по данным четырех наземно-ракетных экспериментов [Данилкин и др., 1989] при вертикальных запусках геофизических ракет в средних широтах европейской части России: 1) высотного атмосферного зонда (ВЗА), 15.07.1975 г., 06:40 местного времени (ЛТ); 2) Вертикаль-3, 02.09.1975 г., 07:40 ЛТ; 3) Вертикаль-4, 14.10.1976 г., 13:50 ЛТ; 4) Вертикаль-7, 03.11.1978 г., 15:05 ЛТ. Во всех экспериментах помимо ракетных измерений электронной концен-

трации n_e методом дисперсионного УКВ-интерферометра (погрешность измерений n_e не более 10% [Бирюков и др., 1980]) регистрировались ионограммы ВЗ и измерялось поглощение радиоволн методом А1 на двух частотах: 2.00 МГц и 2.25 МГц. В двух случаях слой E был простым (рис. 7а, 7б), а в двух – имел дополнительные расслоения $E2$ (рис. 7в, 7г). На рисунках видно в среднем удовлетворительное совпадение результатов восстановления $f_N(h)$ -профилей в области E по предлагаемой в работе методике (сплошные кривые), включая случаи с дополнительными расслоениями $E2$, с ракетными измерениями (штрихпунктирные линии). Однако, расчеты поглощения радиоволн на частотах 2.00 МГц и 2.25 МГц (методику подробно см. в [Денисенко и др., 2018]) с использованием восстановленных по ионограммам $f_N(h)$ -профилей показывают их существенное отличие (на десятки процентов) от экспериментальных значений (см. табл. 5 и табл. 6). Ниже предлагается способ дополнительной коррекции рассчитанных $f_N(h)$ -профилей в области D , позволяющий удовлетворить заданному поглощению и мало изменить действующие высоты.

Основной вклад в групповые запаздывания сигналов дает слой плазмы толщиной несколько километров вблизи уровня их отражения. Поэтому для коррекции удобно использовать соотношение

$$f_{N,L}(h) = f_N(h) \left[1 + K(1-x)^m \right], \quad x = \frac{h-h_0}{hmE-h_0}, \quad (11)$$

$$h_0 \leq h \leq hmE.$$

Оно характерно тем, что изменения профиля минимальны вблизи максимума слоя E и максимальны в области D . Равенство рассчитанного и

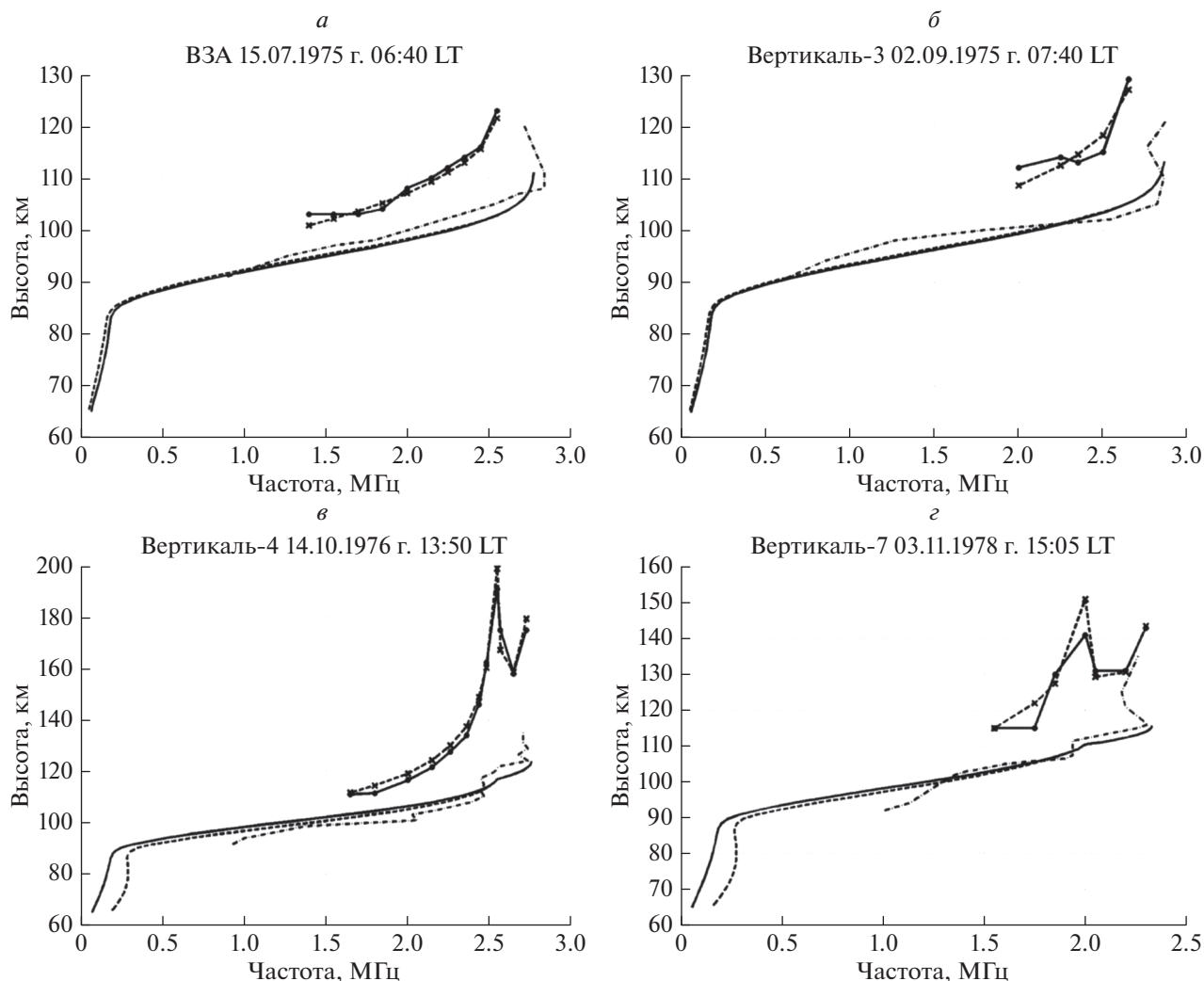


Рис. 7. (а), (б) – расчеты для простого слоя E ; (в), (г) – расчеты для слоя E с дополнительным расслоением $E2$. Сплошная линия – $f_N(h)$ -профиль модели IRI, скорректированный по действующим высотам (сплошная линия с кружками); штриховая линия – тот же профиль с дополнительной коррекцией по значению поглощения на частоте 2.25 МГц; штрихпунктирная линия – ракетные данные; штриховая линия с крестиками – расчетные значения действующих высот с минимальным значением S_E .

измеренных значений поглощения достигается за счет вариаций коэффициента K в (11) при заданном показателе степени m . Параметр m подбирается таким образом, чтобы изменение СКО S_E было минимальным. Оказалось, что для простого

слоя E оптимальным является $m = 1$, в остальных случаях $m = 2$.

Результаты дополнительной коррекции рассчитанных $f_N(h)$ -профилей изображены штриховыми линиями на рис. 7 и представлены в табл. 5

Таблица 6. Результаты дополнительной коррекции модели IRI с использованием поглощения радиоволн на частоте 2.25 МГц при наличии слоев E и $E2$

Эксперимент	(В-4) $L_1 = 32.6$ дБ; $L_2 = 27.8$ дБ				(В-7) $L_1 = 26.6$ дБ; $L_2 = 22.8$ дБ			
	K	$\Delta L_1/L_1, \%$	$\Delta L_2/L_2, \%$	$S_E, \text{ км}$	K	$\Delta L_1/L_1, \%$	$\Delta L_2/L_2, \%$	$S_E, \text{ км}$
До коррекции	0	49.1	42.7	4.59	0	33.3	39.9	4.41
После коррекции	1.40	9.9	0	3.99	1.70	-6.2	0	4.73

Примечание. (В-4) – Вертикаль-4; (В-7) – Вертикаль-7.

Таблица 7. Результаты дополнительной коррекции модели IRI с использованием поглощения радиоволн на двух частотах 2.00 и 2.25 МГц

Эксперимент	ВЗА		В-3		В-4		В-7	
	$\Delta L_1/L_1, \%$	$\Delta L_2/L_2, \%$	$\Delta L_1/L_1, \%$	$\Delta L_2/L_2, \%$	$\Delta L_1/L_1, \%$	$\Delta L_2/L_2, \%$	$\Delta L_1/L_1, \%$	$\Delta L_2/L_2, \%$
После коррекции	5.3	-6.7	4.7	-5.5	4.5	-6.5	-2.5	3.4

и табл. 6. Для коррекции использовались данные о поглощении L_2 на частоте $f_2 = 2.25$ МГц, а контроль качества коррекции осуществлялся по данным о поглощении L_1 на частоте $f_1 = 2.00$ МГц. Определялись разности ΔL значений поглощения между экспериментом и теорией, а также относительные погрешности $\Delta L/L$ до и после коррекции. Как видно из табл. 5 для простого слоя E до коррекции погрешности оценок поглощения составляли десятки процентов. После коррекции погрешности на контрольной частоте $f_1 = 2.00$ МГц составили менее 1%. При наличии дополнительного слоя $E2$ (табл. 6) для эксперимента Вертикаль-4 до коррекции погрешности составили ~50%, а для эксперимента Вертикаль-7 – ~40%. После коррекции они не превысили 10%. Во всех экспериментах величина $S_E(5)$ после коррекции изменяется незначительно, что свидетельствует о малом изменении расчетных значений действующих высот, и следовательно, об эффективности проведенной по формуле (11) коррекции $f_N(h)$ -профиля.

Таким образом, показано, что дополнительная коррекция профиля модели IRI по данным о поглощении только для одной частоты существенно улучшает прогноз поглощения для другой частоты. Отметим, что для коррекции могут использоваться не только измеренные (экспериментальные) значения поглощения на одной или нескольких частотах, но и модельные значения поглощения, рассчитанные, например, по рекомендациям сектора радиосвязи Международного Союза Электросвязи (ITU-R) [Recommendation ..., 2019]. В табл. 7 приведены результаты дополнительной коррекции тех же $f_N(h)$ -профилей с использованием данных о поглощении на обеих частотах. Видно, что во всех экспериментах с помощью коррекции (11) удается достичь совпадения расчетных и экспериментальных значений поглощения с разницей до 7%.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен способ определения высотных профилей электронной плазменной частоты по ионограммам вертикального зондирования с учетом дополнительных отражений сигналов от слоя $E2$ и от спорадического слоя Es . При восстановлении профиля в слое $E2$ используется параболиче-

ская модель электронной концентрации, в слое Es – линейная.

2. Для сравнения рассмотрено два варианта расчетов профиля для области E : с использованием параболической модели электронной концентрации и с использованием профиля из модели IRI. Первая модель широко используется при автоматических расчетах профилей на мировой сети ионосферных станций, однако она непригодна для получения оценок величины поглощения радиоволн в области E . Напротив, вторая модель наилучшим образом подходит для этих целей. Предложен способ корректировки обеих моделей, учитывающий наличие слоев $E2$ и Es .

3. Показано, что учет расслоений $E2$, Es или их комбинации дает практически совпадающие профили в области F независимо от используемой модели для области E . Во всех расчетах, учитывающих слой $E2$, возможным наличием долины электронной концентрации в межслоевой EF -области пренебрегается.

4. При наличии данных о поглощении сигналов, отражающихся от слоя E , возможна дополнительная коррекция профилей из модели IRI по этим данным. Предложен способ такой коррекции с максимальным изменением профиля в области D . Показано, что такая коррекция существенно повышает прогностические возможности вертикального зондирования: полученные профили существенно (до 7–10%) снижают погрешности оценок поглощения радиоволн в нижней ионосфере. Адекватность результатов реальным ситуациям подтверждена данными четырех совместных наземно-ракетных экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

– Бирюков А.В. Данилкин Н.П. Денисенко П.Ф. и др. Фотохимия нижней области F и структурные параметры ионосферы по данным комплексных наземно-ракетных экспериментов // Космич. исслед. Т. 18. № 5. С. 748–753. 1980.

- Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф., Рудаков В.А., Соцкий В.В., Фаер Ю.Н., Водолазкин В.И. Результаты совместных измерений концентрации и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере ракетными и наземными радиометодами во время запусков геофизических ракет “Вертикаль” / Ракетное зондирование верхней атмосферы и ионосферы до высоты 1500 км. Сб. статей. Ростов н/Д: изд-во Ростовского ун-та. С. 42–49. 1989.
- Денисенко П.Ф., Соцкий В.В. Особенности обратных задач вертикального зондирования ионосферы (обзор) // Изв. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. Естеств. науки. № 2. С. 59–71. 1987.
- Денисенко П.Ф., Мальцева О. А., Соцкий В. В. Коррекция профилей электронной концентрации нижней ионосферы по данным вертикального зондирования с использованием модели IRI // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 58. № 2. С. 250–258. 2018.
<https://doi.org/10.7868/S0016794018020116>
- Денисенко П.Ф., Соцкий В.В. Восстановление высотных профилей электронной концентрации по данным вертикального зондирования с использованием модели IRI // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 59. № 6. С. 774–785. 2019.
<https://doi.org/10.1134/S0016794019050031>
- Жбанков Г.А., Заботин Н.А. Восстановление трехмерного распределения электронной концентрации по ионограммам dynasonde-21 // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. № 2. С. 52–56. 2009.
- Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 296 с. 1970.
- Bilitza D., Altadill D., Truhlik D. et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V. 15. P. 418–429. 2017.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001593>
- Danilkin N.P., Denisenko P.F., Sotsky V.V. Peculiarities of the inverse problems of vertical radio sounding of the ionosphere // Adv. Space Res. V. 8. № 4. P. (4)91–(4)94. 1988.
- Handbook. The Ionosphere and its Effects on Radiowave Propagation. A guide with background to ITU-R procedures for radio planners and users. International Telecommunication Union. Radiocommunication Bureau. Switzerland, Geneva. 170 p. 1998.
- Paul A.K. Use of virtual-height slopes for determination of electron density profiles // Radio Sci. V. 2. № 10. P. 1195–1204. 1967.
- Recommendation ITU-R P.533-14 (08/2019): Method for the prediction of the performance of HF circuits. 2019.
<https://www.itu.int/rec/R-REC-P.533-14-201908-1/en>
- Reinisch B.W., Xueqin H. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. 3. Processing of bottomside ionograms // Radio Sci. V. 18. № 3. P. 477–492. 1983.
- U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction / REPORT UAG-23A. Revision of chapters 1-4. Ed. W.R. Piggott and K. Rawer. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, NOAA, Boulder, Colorado. 145 p. 1978.
- Zabotin N.A., Wright J.W., Zhabankov G.A. NeXtYZ: Three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms // Radio Sci. V. 41. RS6S32. 2006.
<https://doi.org/10.1029/2005RS003352>