

МЕТОД ЛОКАЦИИ МОЛНИЙ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ТВИК-АТМОСФЕРИКОВ

А. В. Швец, Ю. В. Горишня

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: a_shvets@ire.kharkov.ua

Приведен метод определения дистанции до источника излучения (молнии) и средней высоты нижней границы ионосферы вдоль трассы распространения в околосемном волноводе Земля-ионосфера. Метод основан на явлении интерференции между модами в спектрах твик-атмосфериков (твиков), наблюдающихся в ночное время. С помощью предложенного метода определены дальности до источников (в диапазоне от 500 до 4 000 км) по ансамблю экспериментальных записей твиков, выполненных в Атлантическом и Индийском океанах. Получены оценки вариаций высоты нижней границы ионосферы, которые составили 5–6 км в течение ночи и 2–3 км на сезонном масштабе времени. Ил. 7. Библиогр.: 23 назв.

Ключевые слова: локация молний, волновод Земля-ионосфера, мониторинг нижней ионосферы.

Разряд молнии является источником электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Максимум спектральной плотности излучения приходится на диапазоны сверхнизких частот (СНЧ) 3...3 000 Гц и очень низких частот (ОНЧ) 3...30 кГц. Электромагнитный импульс, излученный молнией в данных частотных диапазонах, может распространяться вдоль земной поверхности на расстояния до десятков тысяч километров за счет волноводного механизма распространения в полости Земля-ионосфера. Импульсные сигналы от молний, распространяющиеся внутри полости Земля-ионосфера, называются атмосфериками и используются как для локации молний, так и для исследования эффектов распространения СНЧ-ОНЧ-радиоволн. Верхней границей волновода, от которой отражаются СНЧ-ОНЧ-радиоволны, служит область нижней ионосферы на высотах 60...90 км с низкой концентрацией заряженных частиц ($10^6...10^9 \text{ м}^{-3}$). Данная область ионосферы является важным элементом в цепочке воздействия явлений космической погоды на окружающую среду, однако непрерывный мониторинг ее состояния вызывает существенные трудности при использовании станций ионосферного зондирования и других средств. В связи с этим получили распространение методы исследования с помощью радиосвечивания волновода Земля-ионосфера радиоволнами ОНЧ-радиостанций, а также с использованием СНЧ-ОНЧ-излучений, возбуждаемых разрядами молний.

В дневное время атмосферик формируется, как правило, волнами, распространяющимися под скользящими углами к границам волновода. В ночное время, вследствие повышения нижней границы ионосферы и соответствующего уменьшения потерь в ней, наблюдаются сигналы так называемых твик-атмосфериков, или твиков, в формировании которых существенную роль иг-

рают волны, падающие на ионосферу под крутыми углами [1]. Сигналы твиков можно различить на слух, подключив громкоговоритель к выходу антенного усилителя приемника, как короткие мелодичные звуки спадающего тона. Твики отличаются от обычных атмосфериков, регистрируемых в дневное время, большей длительностью (10...150 мс).

Исследованиям твик-атмосфериков посвящено достаточно публикаций [1–11]. Использование модели волновода с изотропными проводящими стенками позволило удовлетворительно объяснить дисперсионные свойства твиков. В работе [12] твики интерпретировались как резонансные колебания в поперечном сечении плоского бесконечного резонатора Земля-ионосфера. На этой основе были получены оценки проводимости нижней ионосферы путем измерения параметров пика на резонансной частоте в спектре твика. Тем не менее необычно слабое затухание при распространении твиков вблизи критических частот волновода, приводящее к появлению «хвостов» в твиках, удалось объяснить, только принимая во внимание магнитоактивные свойства ионосферной плазмы [13]. В работах [9, 14–16] было показано, что поляризация «хвостовой» части твиков – левая, близкая к круговой. На основании данного свойства в работе [15] получены оценки электронной концентрации в окрестности высоты отражения ОНЧ-радиоволн по результатам анализа твиков.

Пример экспериментальной записи трех компонент поля твика приведен на рис. 1, а. Кроме вертикальной электрической компоненты (E_z) и горизонтальной магнитной, перпендикулярной к направлению распространения твика (H_ϕ), в поле присутствует продольная магнитная компонента (H_ρ), появление которой обусловлено анизотропией верхней стенки волновода. Можно видеть, что головная часть твика ($\tau < 0,5$ мс) линей-

но поляризована, поскольку представлена только в поперечной компоненте поля. Данное обстоятельство используется для определения азимута источника [17]. За счет волн, распространяющихся под крутыми углами к границам волновода, в спектрах компонент поля твиков (рис. 1, б) наблюдаются составляющие в областях, близких к частотам отсечки, которые отмечены вертикальными линиями. В координатах время-частота (на сонограмме, рис. 1, в) твик выглядит в виде короткой широкополосной головной части, кото-

рая со временем «распадается» на несколько узко-полосных ветвей, убывающих по частоте и приближающихся асимптотически к критическим частотам волновода Земля-ионосфера. По спектру «хвостовой» части твика можно оценить частоты отсечки, однако точность таких оценок ограничена вследствие существенного затухания сигнала вблизи этих частот. Поэтому для получения более точных оценок необходим учет частотной дисперсии в сигнале, которая определяется расстоянием до источника и высотой волновода.

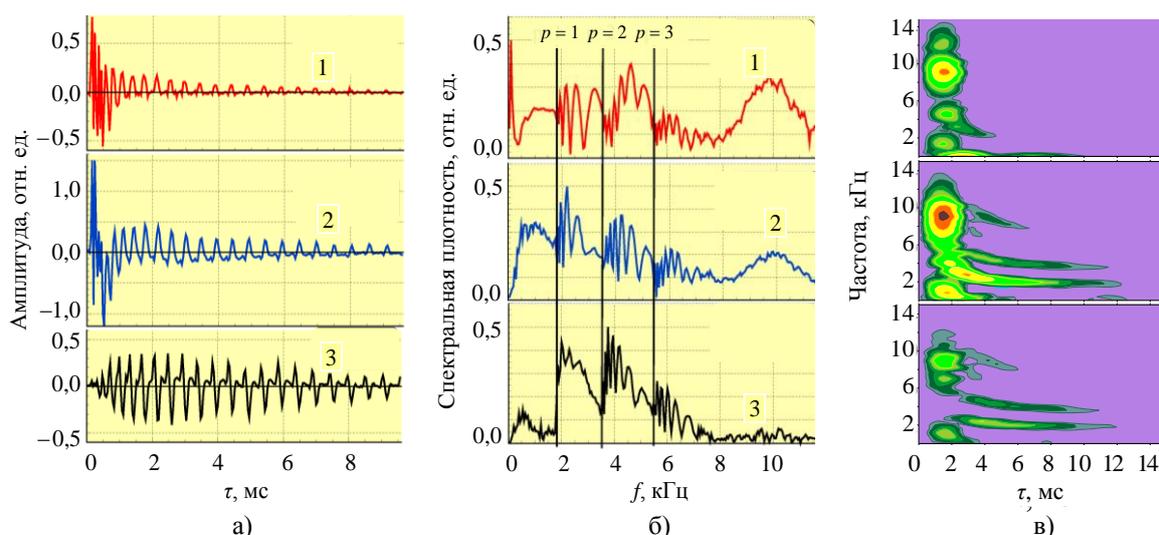


Рис. 1. Волновые формы (а), спектры (б) и сонограммы (в) вертикальной электрической E_z (кривая 1), поперечной H_ϕ (кривая 2) и продольной H_p (кривая 3) магнитных компонент поля твик-атмосфера

Мгновенная частота в отдельной ветви (моды) меняется со временем в соответствии со следующей зависимостью в приближении плоского бесконечного волновода с идеально проводящими границами [7, 11]:

$$f_p(\tau) = \frac{f_{cp}}{\sqrt{1 - \left(1 + \frac{c\tau}{r}\right)^{-2}}}, \quad (1)$$

где время τ отсчитывается от момента прихода атмосферика в точку наблюдения; $f_{cp} = cp/2h$ – критическая частота p -й моды ($p = 1, 2, 3, \dots$); c – скорость света в вакууме; r – дистанция до источника; h – высота нижней границы ионосферы.

Выражение (1) является основой методов определения дистанции до источника и высоты волновода по сонограмме твика [1, 7, 8]. Требования получения одновременно высокого разрешения по частоте и по времени ограничивают точность данных методов. В работах [17, 18] предложен метод определения дистанции до источника и высоты волновода («харьковский» ме-

тод [19]) по фазовому спектру продольной магнитной компоненты поля для 1-й моды, полученному по результатам трехкомпонентных измерений твиков. Это позволило уменьшить ошибку определения дистанции до источника приблизительно до 5% [19].

В настоящей работе рассмотрен метод, основанный на свойствах интерференции нулевой и 1-й мод в спектрах твиков, и выполнен анализ накопленного ансамбля данных.

1. Метод модовой интерференции для определения высоты волновода и дистанции до источника. Наиболее существенной проблемой в «харьковском» методе является точное определение начала атмосферика, т. е. момента его прихода в пункт наблюдения, определяющего вид фазового спектра. Поэтому вместо фазового спектра в предлагаемой методике рассматриваются положения минимумов и максимумов в амплитудном спектре твика, возникающих за счет интерференции нулевой и 1-й мод в диапазоне частот между частотами отсечки 1-й и 2-й мод. Положения экстремумов на частотной оси опре-

деляются разностью фаз между типами колебаний и не зависят от точности определения начала атмосферика. Комплексную амплитуду спектральной плотности поля можно представить в виде суммы двух мод

$$A(\omega) = a_0(ikrS_0) + a_1(ikrS_1) = a_0(ikrS_0) \left[1 + \frac{a_1}{a_0} \exp(ikr(S_1 - S_0)) \right], \quad (2)$$

где $i = \sqrt{-1}$; $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число для свободного пространства; ω – угловая частота; r – расстояние до источника; c – скорость света в вакууме; S_0, S_1 и a_0, a_1 – синусы собственных углов и амплитуды нулевой и 1-й мод соответственно.

Предполагая, что частотные зависимости амплитуд $a_0(\omega)$ и $a_1(\omega)$ являются достаточно гладкими в рассматриваемом частотном диапазоне, из формулы (2) можно получить частоты минимумов и максимумов в амплитудном спектре $|A(\omega)|$, возникающие, когда разность фаз между нулевой и 1-й модами [18]

$$\Delta\phi = kr \operatorname{Re}(S_1 - S_0) \quad (3)$$

становится равной $(2n - 1)\pi$, $n = 1, 2, \dots$ или $2n\pi$, $n = 0, 1, \dots$ для условия минимума или максимума соответственно.

Мы рассматриваем интерференцию между нулевой и 1-й модами в спектре твика для случая плоского волновода с идеально проводящими границами, что является достаточно точным приближением волновода Земля-ионосфера для дистанций до нескольких тысяч километров. Синус угла нулевой моды принят равным $S_0 = 1$ как для плоской ТЕМ-волны, распространяющейся параллельно границам волновода. В данном случае

$$S_0 = 1, \quad S_1 = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{c1}}{f} \right)^2}, \quad (4)$$

где $f_{c1} = c/2h$ – первая частота отсечки; h – высота ионосферы; f – частота волны. Тогда разность фаз между этими модами (3) равна

$$\Delta\phi = \frac{\omega}{c} f (S_1 - 1). \quad (5)$$

Используя выражения (4) и (5), можно найти частоту n -го минимума в спектре:

$$f_n = \frac{f_{c1}^2 r}{(2n-1)c} + \frac{(2n-1)c}{4r}. \quad (6)$$

Подстановка выражения для частоты отсечки в формулу (6) дает следующее соотношение, связывающее частоту n -го минимума с высотой волновода и дальностью до источника:

$$f_n = \frac{cr}{4(2n-1)h^2} + \frac{(2n-1)c}{4r}. \quad (7)$$

Полученная зависимость имеет минимум, в общем случае, при нецелом значении:

$$n_{\min} = \frac{1}{2} + \frac{r}{2h}. \quad (8)$$

Частота, соответствующая n_{\min} , равна частоте отсечки 1-й моды

$$f_n(n_{\min}) = f_{c1}. \quad (9)$$

Таким образом, полное количество интерференционных минимумов в спектре твика, возникающих за счет взаимодействия нулевой и 1-й мод, зависит только от одной переменной – отношения дистанции до источника к высоте волновода. Необходимо отметить, что выражение (8) дает формальное основание для способа оценки дистанции путем подсчета полного количества вариаций в спектре твика, предложенного в «харьковской» методике [17].

Метод определения дистанции путем подсчета полного количества вариаций в спектре атмосфериков за счет интерференции между двумя соседними модами имеет простой физический смысл, однако ряд особенностей ограничивают его точность. В случае интерференции между нулевой и 1-й модами можно выделить два таких фактора.

Первый фактор – трудность определения количества вариаций в области частот выше частоты отсечки 2-й моды, где взаимодействуют уже более двух мод, а частоты первых минимумов могут лежать в достаточно высокочастотной области. Так, например, при $h = 90$ км и $r = 3000$ км частота первого минимума f_1 в соответствии с формулой (7) близка к 30 кГц.

Второй фактор – трудность определения количества вариаций вблизи частоты отсечки 1-й моды, где ширина таких вариаций сужается, в особенности для значительно удаленных источников, и, вследствие ограниченного частотного разрешения, некоторые вариации могут быть не учтены. Так, при параметрах, использованных в предыдущей оценке, согласно формулам (7), (8) расстояние между ближайшими к частоте отсечки минимумами составляет около 50 Гц. Такой разнос по частоте близок к частотному разрешению спектра атмосферика, длительность которого составляет несколько десятков миллисекунд.

Для преодоления указанных ограничений предлагается использовать диапазон между частотами отсечки 1-й и 2-й мод.

Пусть $f_1 = \alpha f_{c1}$; $f_2 = \beta f_{c1}$; $\beta > \alpha \geq 1$, где f_1 и f_2 – значения частот первого и последнего уверенно определяемых минимумов в спектре. Тогда разность фаз между данными частотами, определяемая взаимодействием нулевой и 1-й мод, из формулы (5) равна

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = \\ &= \frac{2\pi}{c} r [f_2(S_1(f_2) - 1) - f_1(S_1(f_1) - 1)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Из формулы для критической частоты 1-й моды, полагая косинус модального угла $C_1 = f_{c1}/f$, получим количество вариаций в заданном частотном диапазоне:

$$n_{12} = \frac{\Delta\phi_{12}}{2\pi} = \frac{r}{2h} \left(\sqrt{\beta^2 - 1} - \sqrt{\alpha^2 - 1} - \beta + \alpha \right). \quad (11)$$

Таким образом, модифицированная методика определения дистанции сводится к следующему:

- по спектру «хвостовой» части атмосферика определяется частота отсечки 1-й моды и, соответственно, высота отражения от ионосферы;
- в диапазоне частот $f > f_{c1}$ выбирается и подсчитывается уверенно определяемое количество вариаций в спектре атмосферика n_{12} ;
- определяются частоты первого и последнего минимумов f_1, f_2 и коэффициенты α и β ;
- полученные величины подставляются в формулу (11), из которой находится дистанция r .

В данной методике оценки дистанции необходимо привлечение независимой оценки высоты волновода. Однако рассмотренная модель позволяет оценить оба параметра: высоту волновода и дистанцию.

Определение номера минимума в спектре n в формуле (3) может быть затруднено, о чем мы говорили ранее, за счет ограниченной полосы и частотного разрешения спектров, а также влияния высших мод. Для исключения n будем рассматривать условия (3) для минимумов и максимумов, наблюдающихся в диапазоне между первой и второй частотами отсечки. Для любой пары экстремумов выполняется следующее соотношение:

$$\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2 = 2\pi m, \quad (12)$$

где m – количество вариаций в амплитудном спектре между выбранными максимумами или минимумами.

Для определения искомым параметров r и h решается обратная задача на основе метода наименьших квадратов путем минимизации следующего функционала:

$$F(r, h) = \sum_{i=1}^{l-1} \sum_{j=i+1}^l \{ \Delta\phi(f_j) - \Delta\phi(f_i) - 2\pi(j-i) \}^2, \quad (13)$$

где l – количество минимумов или максимумов в рассматриваемом частотном диапазоне; f_i и f_j – частоты экстремумов, определяемые из измеренных спектров.

Примеры волновой формы и спектра мощности электрической компоненты твика представлены на рис. 2. Данная запись произве-

дена в точке с координатами 9,75° в. д., 21,1° ю. ш., 22 января 1991 г. в 2 ч 2 мин 6 с универсального времени. Вертикальными линиями отмечены положения максимумов и минимумов, полученные при решении обратной задачи, расположение которых на оси частот отвечает следующим параметрам: $h = 90$ км ($f_{c1} = 1,667$ кГц); $r = 2070$ км.

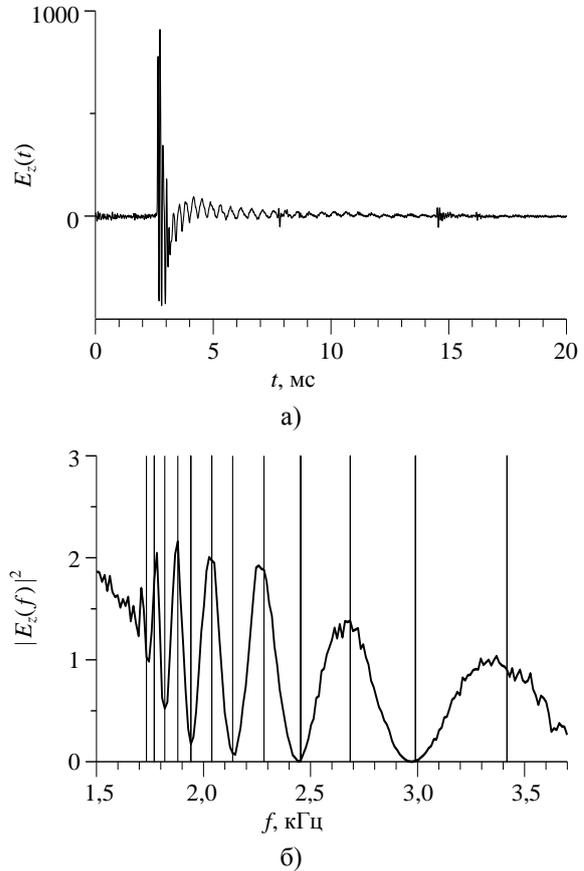


Рис. 2. Волновая форма вертикальной электрической компоненты твика (а) и ее спектр мощности (б)

2. Аппаратура и условия проведения измерений. Записи вертикальной электрической и двух взаимно ортогональных горизонтальных магнитных компонент проводились в акваториях Индийского и Атлантического океанов на борту научно-исследовательского судна (НИС) «Академик Вернадский» в течение 42-го рейса с февраля по апрель 1991 г. Пункты маршрута, в которых были сделаны записи волновых форм атмосфериков, приведены на рис. 3.

Вертикальная электрическая компонента поля принималась с помощью «шаровой» антенны [20]. Для приема горизонтальных магнитных компонент использовались воздушные экранированные рамочные антенны, ориентированные таким образом, что компонента H_y была направлена в сторону носа, а H_x – в сторону правого борта судна. Антенные усилители обеспечивали

плоские амплитудно-частотные и линейные фазо-частотные передаточные характеристики по полю как для электрического, так и для магнитных каналов. С этой целью для усиления сигнала с магнитной антенны использовался усилитель тока [11], что позволило получить на его выходе напряжение, прямо пропорциональное напряженности падающего поля в рабочей полосе частот.

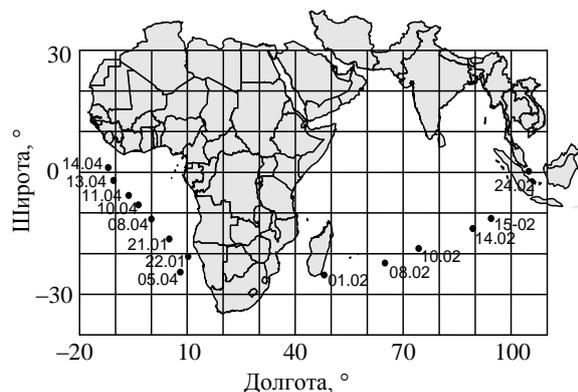


Рис. 3. Пункты маршрута НИС «Академик Вернадский», в которых проводились записи волновых форм атмосфериков в январе, феврале и апреле 1991 г.

Сигналы трех компонент с выхода антенных усилителей фильтровались в полосе 0,3...13 кГц и затем синхронно оцифровывались 12-разрядными аналого-цифровыми преобразователями с частотой дискретизации 100 кГц. Волновые формы длительностью 40,96 мс, записанные в цифровое буферное устройство, после визуальной оценки оператором передавали через параллельный порт в память компьютера «Электроника-85» и сохраняли в виде файлов данных на жестком диске [11]. Банк данных состоит из цифровых записей волновых форм твиков, выполненных в основном в ночное время в различных точках маршрута судна. Каждая серия наблюдений включала 16 волновых форм трех компонент поля, записанных в течение 5–10-мин интервала. После отбора подходящих для анализа записей полное количество реализаций составило 220 в 19 сериях измерений.

3. Вариации высоты ионосферы, полученные по измерениям твиков. Поскольку измерения проводились отдельными сериями в течение почти трех месяцев, весь ансамбль данных был разбит на две основные группы. Первая группа включает записи, выполненные в течение летних (для южного полушария) месяцев с 21 января по 24 февраля 1991 г. Соответствующий участок маршрута судна протянулся от юго-западного побережья Африки до Яванского моря. Вторая группа записей была получена в Гвиней-

ском заливе с 6 по 14 апреля (см. рис. 3), что соответствует периоду равноденствия.

Вариации высоты отражения от нижней ионосферы (далее – высоты ионосферы) в зависимости от солнечного зенитного угла Z в ночных условиях, полученные на основе результатов анализа ансамбля записей твиков, представлены на рис. 4.

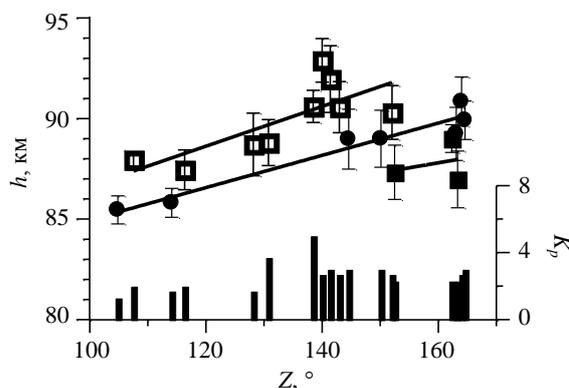


Рис. 4. Вариации высоты нижней ионосферы в течение ночи: полые квадраты – летний (21 января – 15 февраля) сезон; кружки – осенний (6–14 апреля); черные квадраты – 24 февраля

Как видно из графика, для обоих периодов измерений наблюдается положительный тренд высоты ионосферы в течение ночи при увеличении солнечного зенитного угла. В диапазоне изменения солнечного зенитного угла от 105° до 167° вариации высоты составляют около 4 км, что можно оценить по линейным регрессиям, рассчитанным для соответствующих групп данных. Мы видим также, что сохраняя положительный тренд в обоих случаях, в течение летних месяцев нижняя граница ионосферы находится выше, чем в период, близкий к равноденствию. Эта разница в среднем составляет 2...2,5 км. Три точки на графике, показанные черными квадратами, выпадают из общей тенденции и выделены в отдельную группу. Все они соответствуют измерениям, выполненным в течение одной ночи (24 февраля) в Яванском море вблизи островных территорий с гористым ландшафтом, что может частично объяснить уменьшение эффективного поперечного размера волновода на трассах, проходящих через горы.

Анализ геомагнитной ситуации показал, что измерения выполнялись в относительно спокойных условиях. Как можно видеть на рис. 4, 3-ч планетарный K_p -индекс, значения которого, соответствующие моментам измерений, приведены в нижней части графика, не превышал 4, за исключением одного случая.

Для проверки значимости полученных зависимостей высоты ионосферы от солнечного зе-

нитного угла мы протестировали две другие возможные причины возникновения вариаций высоты ионосферы, измеряемой по сигналам твиков, — зависимости высоты от азимута прихода твиков и от дистанции до источника. Первая причина может быть связана с вариациями высоты, в зависимости от ориентации трассы распространения по отношению к линии терминатора. Вторая может быть вызвана систематической ошибкой метода.

Взаимное влияние определяемых параметров, таких как высота отражения и дистанция до источника, может быть оценено из следующих соображений. При движении от частоты отсечки в сторону увеличения частоты из выражений (3), (5) следует, что разность фаз, используемая для решения обратной задачи, определяется только отношением искомых параметров r/h^2 :

$$\Delta\phi \cong -\frac{\pi c}{4f} \frac{r}{h^2}, \quad f^2 \gg f_{cl}^2. \quad (14)$$

Из этого следует важность наличия в сигнале компонент с частотами вблизи частоты отсечки волновода, что наблюдается в твиках. В дневных условиях за счет увеличения затухания в спектрах атмосфериков отсутствуют составляющие вблизи частоты отсечки. Исключение составляют атмосферики от ближних молний на расстояниях до нескольких десятков километров, для которых можно наблюдать резонансные пики в спектре [21]. Это обстоятельство делает невозможным раздельное определение высоты отражения и дистанции с помощью методик, основанных на дисперсионных свойствах атмосфериков.

Статистические зависимости высоты отражения от дистанции и азимута приведены на рис. 5, а, б. Наклоны линий линейной регрессии, найденные по этим данным, равны соответственно $-0,003 \text{ км/}^\circ$ и $1,0 \text{ км/Мм}$.

Полные диапазоны изменений азимутов и дистанций для ансамбля записей твиков можно оценить из их статистических зависимостей от солнечного зенитного угла, представленных на рис. 5, в, г, по величине полного размаха трендов на полном диапазоне изменения Z . По этим графикам можно определить, что эти диапазоны составляют 40° и $0,6 \text{ Мм}$ соответственно. Таким образом, максимальные изменения высоты ионосферы в зависимости от азимута и дистанции до источника могут составлять $0,12$ и $0,6 \text{ км}$, что существенно меньше вариаций, зависящих от солнечного зенитного угла.

Для сравнения полученных из анализа твиков вариаций параметров нижней ионосферы с данными, предсказываемыми известными моделями ионосферы, используем оценки электронной плотности в области отражения ОНЧ-волн, полу-

ченные в работах [15, 16]. Электронная концентрация на высоте отражения левополяризованных волн, формирующих «хвостовую» часть твика, вблизи первой частоты отсечки волновода Земля-ионосфера имеет величину около $3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, которая возрастает на порядок на высотном масштабе около 2 км .

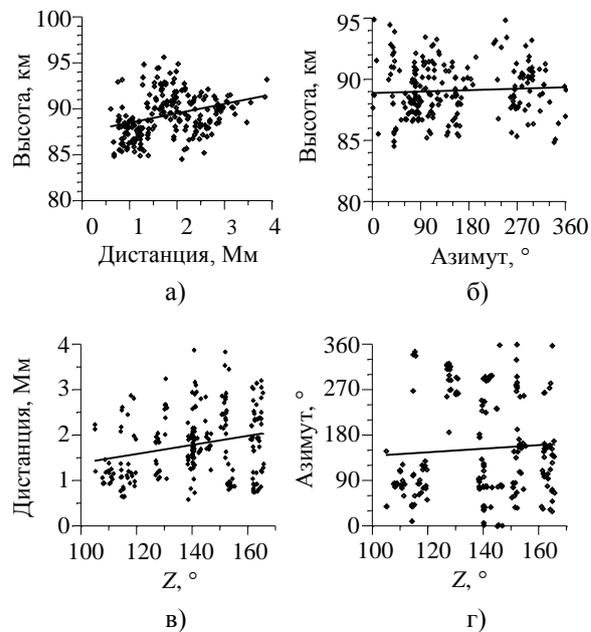


Рис. 5. Статистические зависимости, определяющие возможные систематические ошибки метода

Результаты сравнения с моделью *IRI-95* приведены на рис. 6, а, где штриховыми линиями показаны участки экспоненциальных профилей, которые получены из анализа многомодовых твиков для моментов времени, близких к полуночи и к заходу Солнца.

Как можно видеть в модели *IRI-95*, высота, соответствующая плотности электронов $3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$, изменяется в течение ночи приблизительно на $4 \dots 5 \text{ км}$, что находится в согласии с нашими результатами, однако средняя высота для данной концентрации в модели значительно ниже.

Подобное несоответствие отмечалось в работе [22], в которой были предложены коррекции модели *IRI-95 (FIRI)* на основе измерений фарадеевского вращения радиосигналов КВ-передатчиков, установленных на ракетах, а также в работе [23] по результатам анализа распространения ОНЧ-сигналов навигационных станций.

Предложенные в упомянутых работах коррекции модели *IRI* предполагают, что уровень с электронной плотностью порядка $3 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3}$ находится на высоте 86 км , что достаточно близко к нашим оценкам, вместо высоты 80 км , прогнозируемой моделью *IRI-95* (рис. 6, б).

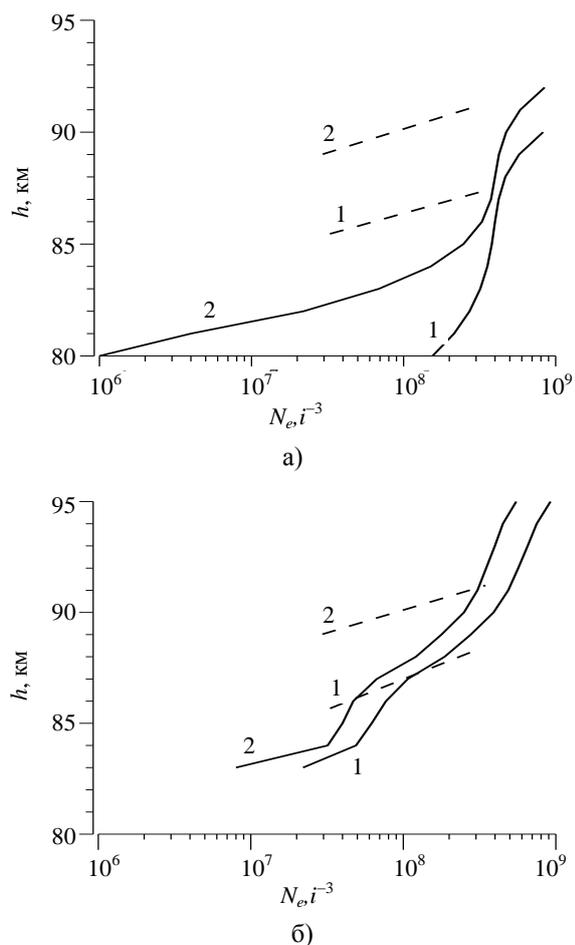


Рис. 6. Вариации электронной плотности для солнечного зенитного угла Z от 105° (линия 1) до 170° (линия 2), полученные из анализа твиков (---), и профили, прогнозируемые моделями ионосферы (—) *IRI-95* (а) и *FIRI* (б)

4. Распределение высот отражения от нижней ионосферы. По результатам локации молний с одновременным определением эффективной высоты волновода по серии записей твиков, сделанных за достаточно малый промежуток времени, можно построить пространственное распределение высот отражения в нижней ионосфере.

Построение такого распределения показано далее на примере серии из 14 записей твиков, выполненных в южной оконечности Гвинейского залива 22 января 1991 г. за период с 1 ч 57 мин до 2 ч 7 мин универсального времени. Координаты приемника $9,8^\circ$ в. д., $21,1^\circ$ ю. ш. По описанной выше методике определялись координаты источника (молниевое разряда) и средняя высота волновода вдоль трассы распространения твик-атмосферика. Значения высот волновода приписывались точкам середины трассы для каждого твика. По полученным данным построена карта распределения высот волновода (рис. 7), где треугольниками отмечены координаты середин трасс

распространения и приведены линии постоянных значений солнечного зенитного угла в градусах. Вариации высоты показаны градуировкой серого цвета.

Выводы. Разработана модификация «харьковской» методики оценки высоты нижней границы ионосферы и дистанции до источника излучения, которая основана на явлении модовой интерференции в спектрах твик-атмосфериков.

На основе анализа твик-атмосфериков показано, что в ночное время при изменении зенитного угла Солнца в пределах $105^\circ \dots 167^\circ$ (суточные вариации) высота нижней ионосферы увеличивается на $4 \dots 5$ км. Сравнение данных, полученных в летнее время и в период, близкий к осеннему равноденствию (сезонные вариации), показало повышение нижней границы ионосферы в летнее время в среднем на 2 км.

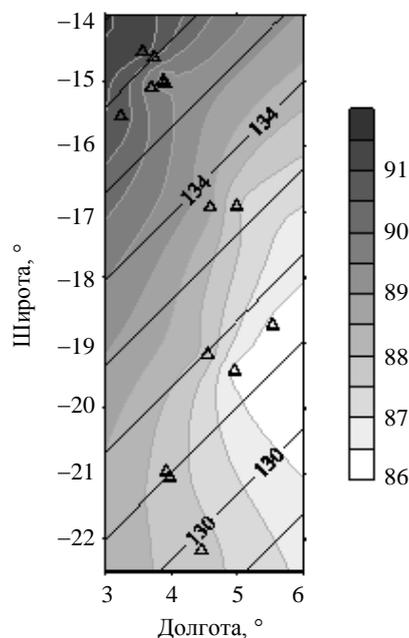


Рис. 7. Вариации высоты ионосферы, вычисленные по серии записей твик-атмосфериков

Полученные результаты в основном согласуются с эффектами суточных и сезонных изменений, прогнозируемых современными моделями нижней ионосферы. Наши оценки показали, что высота, соответствующая уровню электронной концентрации $\sim 3 \cdot 10^7 \dots 3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, выше на $5 \dots 6$ км по сравнению с моделью *IRI-95* и близка к высоте, предсказываемой усовершенствованной моделью нижней ионосферы *FIRI*.

Продемонстрирована возможность получения пространственных распределений высот отражения СНЧ-радиоволн от нижней ионосферы при помощи анализа твик-атмосфериков.

1. *Ohtsu J.* Numerical study of tweeks based on wave-guide mode theory / *J. Ohtsu* // *Proc. Res. Inst. Atmos. Nagoya Univ.* – 1960. – 7. – P. 58–71.
2. *Cummer S. A.* Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics: Ph. D. dissertation / *S. A. Cummer*; Department Electrical Engineering of Stanford University. – Stanford, 1997. – 127 p.
3. *Cummer S. A.* Ionospheric D-region remote sensing using VLF radio atmospherics / *S. A. Cummer, U. S. Inan, T. F. Bell* // *Radio Science.* – 1998. – 33, N 6. – P. 1781–1792.
4. *Cummer S. A.* Modelling electromagnetic propagation in the Earth-ionosphere waveguide / *S. A. Cummer* // *IEEE Trans. Ant. Prop.* – 2000. – 48, N 9. – P. 1420–1429.
5. *Recent findings on VLF/ELF spherics* / *M. Hayakawa, K. Ohta, S. Shimakura, K. Baba* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1995. – 57, N 5. – P. 467–477.
6. *Yamashita M.* Some consideration of the polarization error in direction finding of atmospherics-I. Effect of the Earth's magnetic field / *M. Yamashita, K. Sao* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1974. – 36. – P. 1623–1632.
7. *Yano S.* Wave-form analysis of tweek atmospherics / *S. Yano, T. Ogawa, H. Hagino* // *Res. Lett. Atmos. Electr.* – 1989. – 9. – P. 31–42.
8. *Yano S.* Dispersion Characteristics and Waveform Analysis of Tweek Atmospherics / *S. Yano, T. Ogawa, H. Hagino* // *Environmental and Space Electromagnetics* / ed. by *H. Kikuchi.* – Tokyo: Springer-Verlag, 1991. – P. 227–236.
9. *Experimental investigation of the tweek field structure* / *D. Ye. Yedemsky, B. S. Ryabov, A. Yu. Shchokotov, V. S. Yarotsky* // *Adv. Space Res.* – 1992. – 12, N 6. – P. 251–254.
10. *Рафальский В. А.* Резонансные явления в поперечном сечении промежутка Земля-ионосфера и их влияние на возбуждение и распространение радиоволн: дис. ...канд. физ.-мат. наук / *В. А. Рафальский*; РИАН Украины. – Х., 1991. – 112 с.
11. *Швец А. В.* Экспериментальное исследование распространения СНЧ-СДВ атмосфериков и динамика мировой грозовой активности: дис. ...канд. физ.-мат. наук / *А. В. Швець*; ХГУ. – Х., 1994. – 153 с.
12. *Михайлова Г. А.* Тонкая частотно-временная структура атмосфериков типа «твики» и ОНЧ диагностика параметров ночной нижней ионосферы / *Г. А. Михайлова, О. В. Капустина* // *Геоматизм и Аэрономия.* – 1988. – 28, № 6. – С. 1015–1018.
13. *Yamashita M.* Propagation of tweek atmospherics / *M. Yamashita* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1978. – 40. – P. 151–156.
14. *Hayakawa M.* Wave characteristics of tweek atmospherics deduced from the direction-finding measurement and theoretical interpretation / *M. Hayakawa, K. Ohta, K. Baba* // *J. Geophys. Res.* – 1995. – 99, N D5. – P. 10733–10743.
15. *Shvets A. V.* Polarization effects for tweek propagation / *A. V. Shvets, M. Hayakawa* // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1998. – 60, N 4. – P. 461–469.
16. *Швец А. В.* О поляризационных свойствах твиков / *А. В. Швець* // *Радиофизика и электрон.: сб. научн. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* – Х., 1997. – 2, № 2. – С. 101–106.
17. *A time domain direction finding technique for locating wide band atmospherics* / *A. P. Nickolaenko, V. A. Rafalsky, A. V. Shvets, M. A. Hayakawa* // *J. Atmos. Electricity.* – 1994. – 14, N 1. – P. 97–107.
18. *Rafalsky V. A.* One-site distance-finding technique for locating lightning discharges / *V. A. Rafalsky, A. V. Shvets, M. Hayakawa* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1995. – 57, N 11. – P. 1255–1761.
19. *Brundell J. B.* Validation of single station lightning location technique / *J. B. Brundell, C. J. Rodger, R. L. Dowden* // *Radio Sci.* – 2002. – 37, N 4. – P. 1059–1067.
20. *Observations of natural ELF and VLF electromagnetic noises by using the ball antennas* / *T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura, M. Yasuhara* // *J. Geomagnet. Geoelectricity.* – 1966. – 18, N 4. – P. 443–454.
21. *Shvets A. V.* Characteristics of Nearby Discharges Observed at Singapore / *A. V. Shvets, A. P. Nickolaenko, M. Hayakawa* // *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* – 1997. – 59, N 14. – P. 1717–1726.
22. *Friedrich M.* FIRI: A semiempirical model of the lower ionosphere / *M. Friedrich, K. M. Torkar* // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106, N A10. – P. 21 409–21 418.
23. *Иванов И. В.* Некоторые результаты корректировки моделей нижней ионосферы по результатам экспериментальных исследований / *И. В. Иванов, В. Н. Кузнецов* // *Распространение радиоволн километрового диапазона / под ред. М. И. Белоглазова – Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, 1987. – С. 5–7.*

A TECHNIQUE FOR LIGHTNING LOCATION AND ESTIMATION OF THE LOWER IONOSPHERE PARAMETERS USING TWEAK-ATMOSPHERICS

A. V. Shvets, Yu. V. Gorishnya

A technique for distance finding to the source of pulse radiation (lightning discharge) and the height of the Earth-ionosphere waveguide is described. The technique is based on the phenomenon of interference between waveguide modes in spectra of tweek-atmospherics (tweeks), which are observed at night. Using the proposed technique we have defined distances to sources (in the range from 500 to 4 000 km) for an ensemble of experimental records, performed in the Atlantic and Indian oceans. The obtained from the analysis the ionosphere height variations were 5–6 km overnight and 2–3 km on the seasonal time scale.

Keywords: lightning location, Earth-ionosphere waveguide, lower ionosphere monitoring.

МЕТОД ЛОКАЦІЇ БЛИСКАВОК І ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ ЗА ДОПОМОГОЮ ТВІК-АТМОСФЕРИКІВ

О. В. Швець, Ю. В. Горішня

Наведено метод визначення дистанції до джерела випромінювання (блискавки) та середньої висоти нижньої межі іоносфери вздовж траси поширення в навколосемному хвилеводі Земля-іоносфера. Метод ґрунтується на явищі інтерференції між модами у спектрах твік-атмосфериків (твіків), що спостерігаються у нічний час. За допомогою запропонованого методу визначено дистанції до джерел (у діапазоні від 500 до 4 000 км) за ансамблем експериментальних записів твіків, які були зроблені в Атлантичному та Індійському океанах. Одержано оцінки варіацій висоти нижньої межі іоносфери, які склали 5–6 км впродовж ночі та 2–3 км на сезонному масштабі часу.

Ключові слова: локація блискавок, хвилевід Земля-іоносфера, моніторинг нижньої іоносфери.

Рукопись постуила 12 января 2010 г.