

Ю. В. Горишня*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины**12, ул. Ак. Проскуры, Харьков 61085, Украина*E-mail: gorishnya@ire.kharkov.ua**ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА МНОГОМОДОВЫХ ТВИК-АТМОСФЕРИКОВ**

Твик-атмосферики (твики), наряду с радиопросвечиванием волнами ОНЧ-радиостанций, используются для изучения нижней ионосферы. В рамках существующих моделей их распространения вблизи частот отсечки волновода Земля–ионосфера прогнозируется как убывание, так и рост эффективной высоты отражения с ростом порядка волноводной моды. Поэтому представляет интерес анализ экспериментальных данных на основе усовершенствованной методики, позволяющей получить более точные оценки высоты отражения от ионосферы. По экспериментальным записям твик-атмосфериков (твиков) определены дальности до их источников и эффективные высоты отражения от ионосферы, соответствующие модам первого и высшего порядков волновода Земля–ионосфера. Исследовалось количество наблюдаемых гармоник в твиках в зависимости от дальности до источника, локального времени, и эффективной высоты отражения от ионосферы. Показано, что эффективная высота отражения твиков растет в течение ночи. В диапазоне высот отражения 87...89 км наблюдается рост относительного количества твиков с высшими гармониками. Наибольшее число гармоник в твиках наблюдается в период 20...24 часа локального времени. Показано, что эффективная высота отражения для первой моды больше на 1,4 км высоты для второй моды, что в рамках анизотропной модели ионосферы позволило оценить плотность электронов в области высоты отражения. Результаты исследования позволяют выбрать адекватную модель распространения твиков и оценки параметров нижней ионосферы. Ил. 4. Табл. 3. Библиогр.: 31 назв.

Ключевые слова: диагностика нижней ионосферы, СНЧ-ОНЧ-радиоволны, твик-атмосферики, локация молний.

Электромагнитное импульсное излучение, возбуждаемое грозовыми разрядами, имеет максимум спектральной плотности в диапазонах сверхнизких (СНЧ, 3...3 000 Гц) и очень низких частот (ОНЧ, 3...30 кГц). Полость Земля–ионосфера служит волноводом для электромагнитных волн в данных частотных диапазонах. В ночное время часто наблюдаются так называемые твик-атмосферики, или твики. Наряду с радиопросвечиванием волнами ОНЧ-радиостанций использование этих природных сигналов позволяет изучать область ионосферы на высотах 60...90 км с низкой концентрацией электронов ($10^6...10^9 \text{ м}^{-3}$) [1–12].

Твики отличаются от обычных атмосфериков, регистрируемых в дневное время, большей длительностью (10...150 мс). В то время как амплитудный спектр твика имеет сложную структуру, обусловленную широким спектром излучения разряда молнии и модальной интерференцией, особенно при дальности до источника менее 3 000 км, на спектрограмме твика можно наблюдать ряд отдельных гармоник, мгновенные частоты которых спадают от начала сигнала, асимптотически приближаясь к предельным частотам. Эти предельные частоты соответствуют частотам отсечки волновода для фундаментальной моды (первого порядка) и мод высшего порядка. Частотная дисперсия гармоник твика связана с уменьшением групповой скорости распространения при приближении частоты волны к частоте отсечки волновода.

Распространение волн вблизи критических частот волновода, образующих «хвостовую» часть твика, было объяснено с учетом магнитоактивных свойств ионосферной плазмы [13]. В работах [9, 14–16] было показано, что поляри-

зация поля в «хвостовой» части твиков близка к левой круговой, что связано с анизотропией ионосферы. В работе [15] по результатам анализа твиков получены оценки электронной концентрации в окрестности высоты, где выполняется условие полного отражения для необыкновенной левополяризованной волны. В работах [17–19] эффективная высота волновода Земля–ионосфера вдоль трассы распространения и дальность до источника определялись с помощью анализа нескольких гармоник твика, исследовалась зависимость числа наблюдаемых гармоник от дальности до источников.

Анализ гармоник твика, наблюдаемых в спектрограмме, применяется для определения дальности до источника и высоты волновода [1, 7, 8]. Требования получения одновременно высокого разрешения по частоте и по времени ограничивают точность определения параметров трассы распространения. В работах [20, 21] предложен метод определения дальности до источника и высоты волновода («харьковский» метод [22]) по фазовому спектру продольной магнитной компоненты поля для 1-й моды, полученному по результатам трехкомпонентных измерений твиков. Это позволило получить ошибку определения дальности до источника приблизительно 5 % [22]. Использовался также метод, основанный на свойствах интерференции 0-й и 1-й мод в амплитудном спектре твика [23], с помощью которого по результатам анализа экспериментальных записей исследовались вариации высоты нижней ионосферы в течение ночи.

В рамках существующих моделей распространения вблизи частот отсечки волновода Земля–ионосфера прогнозируется как убывание

[24–26], так и рост [16] эффективной высоты отражения с ростом порядка волноводной моды, что подтверждается в некоторых экспериментальных работах (например [27]). В связи с этим, для выбора адекватной модели представляет интерес анализ экспериментальных данных для выявления соотношения эффективных высот волновода, соответствующих разным модам. Таким образом, целью настоящей работы является изучение вариаций эффективной высоты отражения для разных мод и количества наблюдаемых гармоник, характеризующих затухание в ионосфере, а также их зависимость от локального времени ночи на основе усовершенствованного однопозиционного метода определения дальности до источника по экспериментальным записям твиков.

1. Данные и методы обработки. Банк экспериментальных записей твиков был накоплен на борту научно-исследовательского судна «Академик Вернадский» в январе–апреле 1991 г. в акваториях Атлантического и Индийского океанов [15]. Сигналы трех компонент поля (две горизонтальные магнитные и вертикальная электрическая) с выхода антенных усилителей подавались на фильтры с полосой пропускания 0,3...13 кГц по уровню –3 дБ и с ослаблением –36 дБ на октаву за пределами рабочей полосы частот. После фильтрации сигналы синхронно оцифровывались 12-разрядными аналого-цифровыми преобразователями с частотой дискретизации 100 кГц. Волновые формы длительностью 40,96 мс накапливались на жестком диске компьютера. Каждая серия измерений включала 10–16 записей, принятых в течение 10...15-минутного промежутка времени.

В плоском бесконечном волноводе с идеально проводящими границами зависимость мгновенной частоты $f_p(\tau)$ p -й гармоники от времени описывается следующим соотношением [7]:

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

где время τ отсчитывается от момента прихода атмосферика в точку наблюдения; D – дальность до источника; критическая частота p -й моды ($p = 1, 2, 3...$) определяется эффективной высотой волновода h : $f_{cp} = cp/2h$; c – скорость света в вакууме.

Для анализа гармоник твиков применялась методика [17], основанная на использовании выражения (1) и состоящая в следующем:

- с учетом азимута прихода относительно направления на север, определяемого с помощью вычисления вектора Умова-Пойнтинга [20], выполняется декомпозиция магнитного поля твика на продольную и поперечную компоненты; определение параметров выполняется по продольной магнитной компоненте, чтобы исключить влияние 0-й моды;

- определяются начальные оценки частоты отсечки f_{cp} и дальности D , как описано в [17];

- для каждой гармоники твика строится «коридор» шириной $\pm 0,4$ кГц вокруг зависимости (1), полученной по начальным оценкам D и f_{cp} , и строится зависимость мгновенной частоты от времени $f_p(\tau_k)$, где k – номер отсчета в динамическом спектре, отсчеты которой попадают внутрь «коридора»;

- по начальной оценке частоты отсечки волновода вычисляются оценки дальности для каждой гармоники из формулы (1)

$$D_k = \frac{c\tau_k}{\frac{1}{\sqrt{1 - f_{cp}^2/f_p^2(\tau_k)}} - 1}; \quad (2)$$

- вычисляются параметры линейной средней квадратической регрессии, построенной на оценках D_k ;

- подбором f_{cp} минимизируется абсолютное значение коэффициента наклона линии регрессии для каждой гармоники.

Данный метод сводит нахождение параметров D и f_{cp} к проблеме одномерной оптимизации.

На рис. 1 приведен пример обработки твика, запись которого сделана 11 апреля 1991 г. в точке с координатами 7°24' з. д., 5°42' ю. ш. Число гармоник в твиках, наблюдаемых в полосе пропускания приемника, варьируется от 2 до 9. В данном примере наблюдаются только 1-я и 2-я гармоники.

При построении динамического спектра для каждой отдельной записи вычислялся набор амплитудных спектров в диапазоне 1,5...20 кГц на интервалах времени длительностью 2,56...5,12 мс вдоль всего сигнала со сдвижкой 0,3 мс. Для уменьшения краевых эффектов в преобразовании Фурье интервал вмещал фиксированное число осцилляций на 1-й моде (в нашем случае 8 осцилляций). Кроме этого, использовалось временное окно Хэмминга. Для повышения точности оценки частоты спектрального пика при построении зависимости $f_p(\tau_k)$, вычислялось положение его центра тяжести по точке локального максимума и двум соседним отсчетам в амплитудном спектре. Линейная регрессия строилась, когда в гармонике твика содержалось 20 и более отсчетов, что соответствует минимальной длительности анализируемой реализации 6 мс.

На рис. 1 ромбами показаны значения дальности, вычисленные для первых двух гармоник по формуле (2). Для каждой гармоники выбирался интервал времени, в котором проводится прямая средней квадратической регрессии по оценкам дальности из (2). Начальные части (0...2 мс), а также хвостовые части были исключены вследствие роста дисперсии оценок дальности. Одним из

основных критериев для проведения границ такого интервала выбрано стандартное отклонение невязок, которое не должно превышать заданный порог (15 % от начальной оценки дальности). На графиках наблюдаются осцилляции, возникающие из-за краевых эффектов в алгоритме, с периодом, примерно равным отрезку времени, по которому определялся спектр. Их амплитуда растет при уменьшении дальности и номера моды твика, также она возрастает в хвостовой части, что связано с увеличением чувствительности формулы (2) к малым отклонениям мгновенной частоты при приближении к критической частоте волновода. В результате получены оценки высоты и дальности 86,4 км и 2,49 Мм по 1-й гармонике и 85,63 км и 2,38 Мм по 2-й гармонике. Стандартные отклонения оценок дальности составили 0,066 Мм и 0,128 Мм для 1-й и 2-й гармоник соответственно.

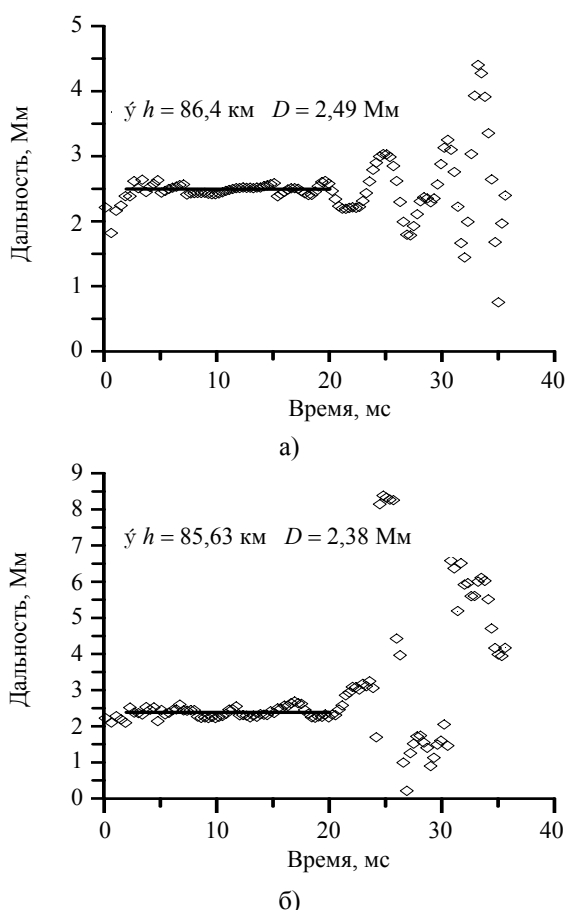


Рис. 1. Пример определения дальности до источника и эффективной высоты отражения по двум первым гармоникам твика: а) – 1-я гармоника; б) – 2-я гармоника

Данный алгоритм определения D и h был протестирован в [28] при помощи модельных твиков, временные формы которых синтезировались по спектрам поля, рассчитанным в соответствии с моделью СНЧ–ОНЧ распространения [29].

В результате численных исследований показано, что в присутствии случайного шума с отношением сигнал/шум 3 дБ и более при использовании данного алгоритма стандартное отклонение эффективной высоты составляет 0,4 км. Смещение оценок восстановленных высот отражения от модельных значений равнялось от 0,01 км до десятых долей километра, и не превышало стандартного отклонения, что соответствует точности определения высот (по уровню доверительной вероятности 95 %) ± 800 м. Для 1-й гармонике при дальности менее 1,5 Мм стандартное отклонение может достигать до 0,6 км. Точность оценки дальности до источника твика при этом лежит в пределах нескольких процентов [28].

В области высот, где в ночное время происходит отражение твиков (85...90 км), существенные изменения концентрации заряженных частиц наблюдаются на вертикальном масштабе в несколько километров.

Для оценки параметров $[h, D]$ в модели плоского идеального волновода все значения дальности до источников твика и эффективные средние высоты отражения по трассе, полученные из обработки гармоник одного твика, усреднялись. При этом были применены следующие методические правила:

- для твика, пришедшего с расстояния более 1,5 Мм, эффективная высота отражения определяется усреднением по всем гармоникам;
- при дальности менее 1,5 Мм для получения эффективной высоты отражения используются только данные по 2-й и более высоко-частотным гармоникам.

В результате анализа ансамбля данных получены значения усредненных высот h от 83 до 94 км и D от 330 до 4 000 км. Полное число обработанных твиков составило 279 в 21-й серии измерений.

2. Эффективная высота отражения и число наблюдаемых гармоник в твиках. Все данные разделены на два периода. Первый набор включает твики, записанные в летние месяцы с 21 января по 24 февраля 1991 г. Ему соответствует географический регион, покрывающий часть пути судна от юго-западного побережья Африки до Яванского моря. Данные, записанные в период 6–14 апреля (около равноденствия), получены в Гвинейском заливе.

Зависимости эффективных высот отражения от ионосферы, полученных по результатам обработки твиков, от локального времени, отсчитываемого от полуночи, показаны на рис. 2. Так как высота ионосферы, вычисляемая по твикам, является интегральной характеристикой ночной ионосферы вдоль всего пути распространения, для каждого твика локальное время определялось как среднее локальных астрономических времен,

соответствующих началу, концу, середине, первой и третьей четвертям трассы распространения.

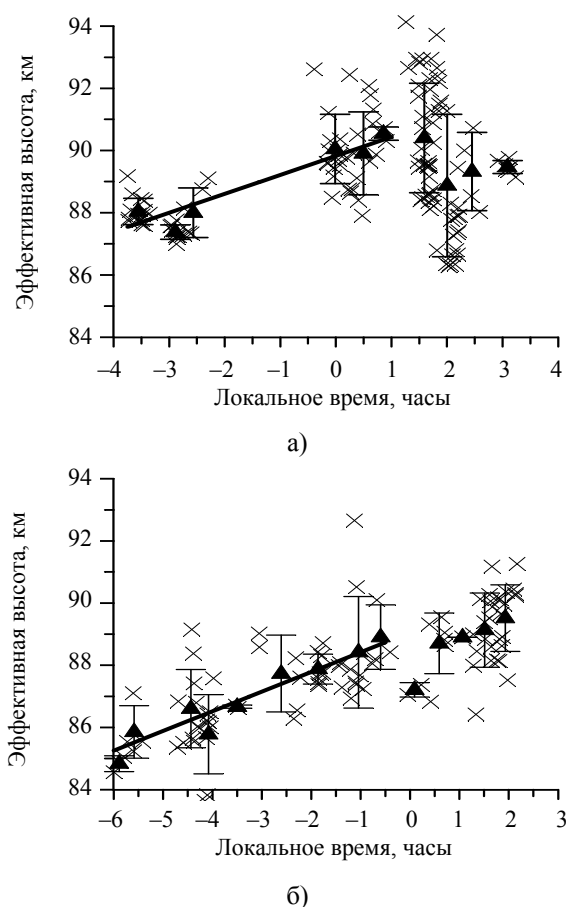


Рис. 2. Вариации эффективной высоты отражающего слоя ионосферы в течение ночи для разных сезонов: а) – лето; б) – равноденствие

Кресты на графиках обозначают высоту, определенную по отдельному твику. Треугольники с вертикальными «усами» показывают средние значения высоты $\langle h \rangle$ и стандартные отклонения за получасовые интервалы. Нанесены линии регрессии для времени до полуночи.

С возрастанием локального времени ночи наблюдается постепенный рост эффективной высоты отражения. В период равноденствия был выявлен существенный рост примерно на 5 км от $h = 85$ км в 6 часов до полуночи до 89,5 км в 2 часа после полуночи (рис. 2, б). В работе [30] рассмотрена аналогичная тенденция, которая распространяется также и на зимний период. На протяжении интервала времени $-0,5 \dots 2$ часа эффективная высота отражения изменяется незначительно. Для летнего времени рост эффективной высоты отражения составляет примерно 3 км для интервала $-4 \dots 1$ час (рис. 2, а). После полуночи наблюдается сильный разброс данных, и незначительное понижение средней высоты после 2 часов локального времени. Можно отметить, что в среднем линия регрессии, относящаяся к летнему времени, выше на 1,5...2 км линии регрессии,

относящейся к периоду равноденствия. В летнее время разброс эффективных высот отражения выше, чем в сезон равноденствия.

Затухание при распространении мод высшего порядка увеличивается с ростом номера моды и, соответственно, количество наблюдаемых гармоник в твике зависит от потерь в ионосфере и от дальности до источника. Ниже исследуется зависимость числа наблюдаемых гармоник в твиках от эффективной высоты отражения от ионосферы и от локального времени.

Данные, полученные за весь период наблюдений, были разделены на три диапазона дальностей: $D < 1$ Мм, $D = 1 \dots 1,5$ Мм и $D > 1,5$ Мм. На рис. 3 представлены гистограммы распределения твиков в этих диапазонах дальностей по количеству наблюдаемых гармоник, с интервалом по высоте 2 км (рис. 3, а) и 1 км (рис. 3, б, в). Числами на графиках обозначено общее число твиков, эффективная высота отражения которых заключена в таких интервалах.

Можно видеть, что при дальностях более 1,5 Мм наблюдаются 1–6 гармоник. Диапазон высот 87...89 км при дальностях $D > 1$ Мм характеризуется ростом количества твиков с большим (вплоть до 6–8) числом гармоник, хотя на самых больших дальностях относительная доля твиков с 4 и более гармониками убывает (рис. 3, в). В то же время при эффективной высоте $h \geq 90$ км наблюдаются 2–4 гармоник (рис. 3, б, в). При дальностях до источника меньше 1 Мм твики с числом гармоник 4 и более представлены для всех значений эффективной высоты отражения (рис. 3, а). Определенный рост доли твиков с высокочастотными гармониками для высот 87...89 км можно наблюдать и в этом случае.

По-видимому, в данном узком диапазоне высот реализуются физические условия для формирования вертикального профиля электронной концентрации с максимальной крутизной нарастания, что обеспечивает минимальное затухание при распространении мод высших порядков.

Чтобы рассмотреть зависимость наблюдаемого в твиках числа гармоник от локального времени ночи, разобьем данные на два диапазона дальностей до источников: $D < 1,5$ Мм и $D > 1,5$ Мм.

В табл. 1 показаны результаты усреднения количества гармоник по 2-часовым интервалам времени и приведены усредненные по соответствующим наборам твиков дальности. Число твиков в пределах таких интервалов составляло не менее 12. Значения локального времени относятся к середине трассы твика. Из таблицы видно, что средняя дальность в течение ночи почти не меняется, тогда как среднее число гармоник $\langle Q \rangle$ различается существенно. Можно показать, что их различие является значимым по критерию Стьюдента (с доверительной вероятностью более 99%). Во всем диапазоне дальностей среднее число гармоник твика максимально в период $-4 \dots 0$ часов.

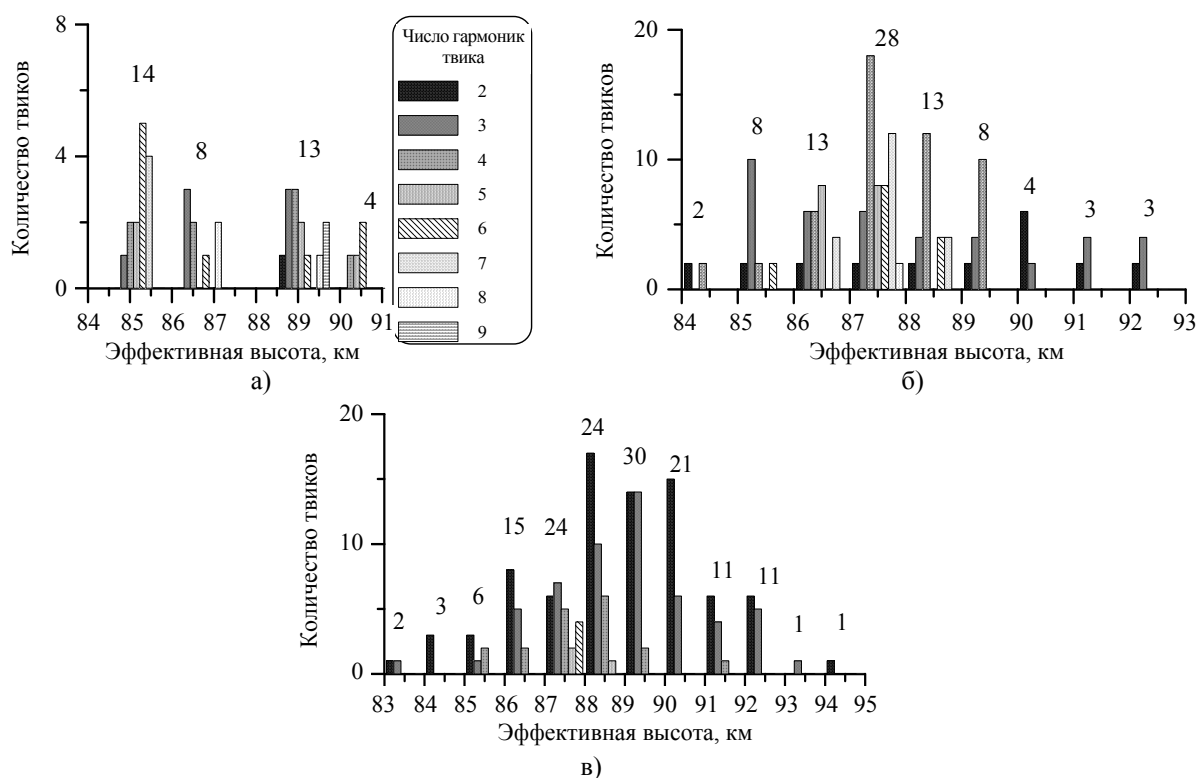


Рис. 3. Распределения количества гармоник в твиках при разных эффективных высотах волновода в трех диапазонах дальности до источника: а) – $D < 1$ Мм; б) – $D = 1...1,5$ Мм; в) – $D > 1,5$ Мм

Таблица 1

Среднее число гармоник в твиках в течение ночи

Время, ч	Дальность < 1,5 Мм			Дальность > 1,5 Мм		
	Число твиков	$\langle Q \rangle$	$\langle D \rangle$, Мм	Число твиков	$\langle Q \rangle$	$\langle D \rangle$, Мм
-6...-4	12	3,58	1,11	14	2,42	2,55
-4...-2	24	5,87	1,18	17	3,35	2,33
-2...0	36	5,08	0,99	27	3,18	2,55
0...2	36	3,47	1,15	82	2,43	2,38
2...4	12	4,25	1,28	19	3,10	2,21

Гистограммы на рис. 4 показывают относительное количество твиков с разным числом гармоник в 2-часовых интервалах локального

времени ночи для всего диапазона расстояний. Числами на графике указано полное количество твиков в ансамбле для каждого интервала времени.

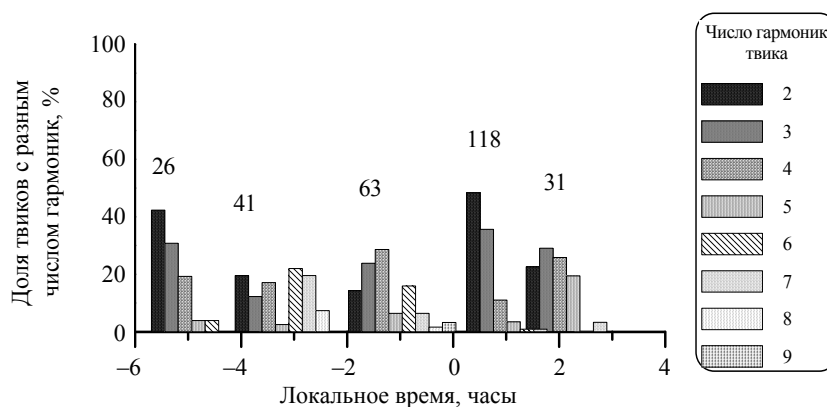


Рис. 4. Доля твиков с разным количеством гармоник для 2-часовых интервалов в течение ночи

Видно, что в период 0...2 часа доля твиков с 2–3 гармониками составляет более 80 %, в период после заката (–6...–4 часа) примерно равна 70 %, и для всех других интервалов составляет не более 50 %. Максимальная доля твиков с высокочастотными (4–9) гармониками наблюдается в период –4...0 часов.

3. Оценки критических частот волновода Земля–ионосфера для 1-й и 2-й мод. Около 75 % записей твиков (214 из 279) составляют группы с близкими трассами распространения. Каждый сеанс наблюдений охватывал 10...20 мин, поэтому можно предположить, что параметры трассы неизменны в течение этих относительно коротких промежутков времени, следовательно, полученные оценки эффективной высоты отражения можно считать статистически независи-

мыми. Так как алгоритм обработки дает более сильную погрешность оценок высоты по 1-й гармонике при дальности до источника меньше 1,5 Мм, были выделены 16 групп из 4-х и более твиков с дальностями, превосходящими эту величину. Некоторые из этих групп твиков записаны в разные периоды одной и той же ночи.

В табл. 2 представлены усредненные критические частоты $\langle f_1 \rangle$ и $\langle f_2 \rangle$ и средние эффективные высоты $\langle h_1 \rangle$ и $\langle h_2 \rangle$ (и их стандартные отклонения σ_1 , σ_2) определенные по 1-й и 2-й гармоникам твика, которые наблюдаются во всем рассматриваемом диапазоне дальностей. Стандартные отклонения оценок дальности до источников в каждой группе находятся в пределах 0,07...0,36 Мм, что составляет 5–12 % от средней дальности.

Таблица 2
Эффективные высоты отражения по 1-й и 2-й гармоникам твиков для разных трасс распространения

Дата	Число твиков	$\langle h_1 \rangle \pm \sigma_1$, км	$\langle h_2 \rangle \pm \sigma_2$, км	$\langle f_1 \rangle$, Гц	$\langle f_2/2 \rangle$, Гц	Азимут, °	Дальность, Мм
21.01	4	93,20±1,27	91,81±0,15	1609,73	1633,78	120,9±3,4	2,18±0,09
22.01	9	89,32±1,16	87,81±0,29	1679,64	1708,21	313,9±3,2	1,55±0,09
02.02	5	90,75±0,95	89,39±0,48	1653,07	1678,04	147,7±2,8	1,49±0,12
09.02	12	89,29±0,95	88,12±1,10	1680,02	1702,57	263,3±2,3	2,70±0,18
11.02	6	91,82±0,53	90,42±0,80	1633,70	1659,04	291,7±2,8	3,39±0,18
14.02	4	90,12±0,18	89,57±0,46	1664,51	1674,70	279,0±1,3	2,91±0,08
15.02	7	90,49±0,07	88,77±0,44	1657,68	1689,86	78,9±1,7	2,43±0,11
15.02	5	91,77±0,30	90,39±0,93	1634,57	1659,51	294,7±3,4	1,76±0,13
06.04	4	88,93±0,77	86,56±0,36	1686,73	1732,83	36,9±4,4	2,33±0,19
06.04	4	89,68±0,60	87,68±0,44	1672,73	1710,73	81,7±5,0	2,72±0,27
09.04	8	89,46±0,50	87,83±0,42	1676,79	1707,96	74,8±2,0	1,46±0,07
09.04	4	87,59±0,81	86,11±0,62	1712,56	1742,04	359,1±0,7	1,93±0,09
10.04	4	92,31±0,60	88,81±0,56	1625,09	1688,99	99,5±1,9	2,93±0,07
11.04	4	85,19±1,21	84,32±1,36	1761,06	1779,18	83,9±3,2	2,42±0,17
11.04	5	86,18±0,71	85,04±1,48	1740,62	1764,29	259,7±1,2	2,79±0,36
14.04	8	89,40±0,79	88,22±1,30	1677,95	1700,69	99,7±6,4	2,81±0,18

В большинстве групп твиков (12 из 16) высота $\langle h_1 \rangle$ превышает $\langle h_2 \rangle$ на величину от 1,2 км до 3,5 км. Используя выборочные значения σ^2 как оценки дисперсии, можно показать, что различие высот может считаться значимым по критерию Стьюдента почти для всех групп. В двух группах разности средних эффективных высот отражения являются незначимыми.

Анализ оценок по модам более высокого порядка показал, что в большинстве случаев между 2-й и последующими (вплоть до 9-й) модами высота отражения слабо убывает, и для ≈50 % записей их разность вплоть до последней моды лежит в пределах точности оценки высоты ($\pm 0,5...0,8$ км). В ряде случаев наблюдается рост высоты отражения для 5–9 мод в пределах 0,5...1,5 км. В 68 % случаев h_1 превосходит высо-

ту h_2 более чем на 0,7 км. В 4 % случаев h_1 ниже h_2 более чем на 0,7 км. В среднем разность $h_1 - h_2$ составляет $1,39 \pm 1,44$ км. Анализ твиков с дальностью распространения более 1,5 Мм для 1–4-й мод показывает аналогичные результаты. Так, при этом разность $h_1 - h_2$ меньше –0,7 км в 4 % случаев, больше 0,7 км в 66 % случаев, и в среднем равна $1,62 \pm 1,61$ км.

Для оценки параметров нижней ионосферы воспользуемся моделью [24]. Волновод Земля–ионосфера представлен в ней как идеально проводящая Земля, и расположенное выше уровня высоты h полупространство с однородной концентрацией электронов. Геомагнитное поле ортогонально границам волновода. В области частот отсечки волновода распространяющиеся моды могут быть описаны как лево- и правополяризованные квази- L и квази- R моды [9].

Согласно [24, 25] роль критических частот для таких мод в ионосферном волноводе с высотой h играют величины:

– для L - (левополяризованной) моды

$$\omega_{kp} = (cp\pi/h)(1 - 1/p\pi n_p); \quad (3)$$

– для R - (правополяризованной) моды,

$$\omega_{kp} = (cp\pi/h)(1 - s/2p\pi n_p), \quad (4)$$

где $n_p = \omega_0 / \sqrt{\omega\omega_H}$ – коэффициент преломления, который в ночных условиях на высоте 85...90 км примерно равен 3...7; ω_H – гирочастота электронов; ω_0 – плазменная частота электронов; $s = v/\omega_H$ – отношение частоты столкновений v электронов с нейтральными молекулами к гирочастоте электронов; индекс p ($p = 1, 2, 3...$) соответствует номеру моды.

Критическая частота для 1-й L -моды отличается от критической частоты идеального волновода на величину $\omega_{k1}/\pi n_1$, обусловленную конечной толщиной области отражения, равной глубине проникновения левополяризованных круговых волн в ионосферу $l \approx h/\pi n_1$. В ночных условиях для 1-й моды глубина проникновения равна 5...10 км. Данный вывод получен при условии, что магнитное поле ортогонально поверхности земли. Для более точного учета поправки на умеренных географических широтах, для целей дальнейших вычислений достаточно определить коэффициент преломления в плазме с учетом зависимости от направления магнитного поля как $n = \omega_0 / \sqrt{\omega\omega_H \cos(\zeta)}$, где угол ζ – отклонение магнитного поля от вертикали.

Поскольку $\omega_{kp} \approx p\omega_{k1}$ (отсюда показатели преломления вблизи критических частот для 1-й и p -й L -мод соотносятся как $n_p \approx n/\sqrt{p}$), выражение (3) означает, что разность ω_{kp} и критической частоты идеального волновода с ростом номера мод растет только как $\infty \approx \sqrt{p}$ для ночной ионосферы на высотах 80...95 км. Ввиду этого эффективная высота отражающего слоя, вычисляемая в предположении закона дисперсии идеального волновода, превышает h на величину $h/(\pi n\sqrt{p} - 1)$. При указанных параметрах ночной ионосферы эффективная высота отражения для 1-й моды оказывается выше эффективной высоты отражения для 2-й моды на 1,5...2,8 км за счет данного эффекта.

На высотах 85...96 км величина s равняется 1/10...1/55 в обычных ночных условиях. Это означает, что критические частоты (4) отличаются от значений для идеального волновода очень мало, а глубина проникновения для 1-й квази- R моды составляет лишь 0,25...0,5 км.

Определяющим признаком твиков является левая круговая и близкая к ней поляризация поля в хвостовой части. Эта часть соответствует углам падения $\theta = 10^\circ \dots 35^\circ$. В начальной части твика вплоть до угла $63,5^\circ$ [24] поляризация поля линейна, и излучение распространяется в виде квази- TM и квази- TE мод волновода.

Поляризация сигнала твика меняется на всей его протяженности [31]. Поляризация моды 2-го порядка и более высокочастотных мод остается эллиптической с преобладанием левой круговой. В начале твика при углах падения $40^\circ \dots 60^\circ$ право- и левополяризованные круговые волны присутствуют в 1-й моде твика в различных соотношениях. У части твиков с дальностями до источников более 1,5 Мм на начальном участке достигается почти линейная поляризация 1-й моды сигнала (т. е. доля право- и левополяризованных волн примерно равна). В ряде случаев наблюдается полное преобладание правой круговой поляризации (96 % по энергии). Участок, соответствующий таким углам падения, достаточно короткий (порядка 5 мс), однако он приходится на область сильных изменений мгновенной частоты, используемую в алгоритме оценки эффективной высоты и дальности, которая составляет обычно 7...15 мс (в ряде случаев до 20...30 мс). Так как критические частоты L - и R -волн различны (см. (3), (4)) и влияние участка со смешанной поляризацией учесть сложно, в дальнейшем из вычислений была исключена часть записей, для которых среднее отношение амплитуд L/R не превышало $\approx 1,4$.

Для анализа использовались пары/группы твиков от общего очага с близкими трассами распространения, для которых выполнялось условие квазипродольного приближения при распространении относительно магнитного поля, принятое в модели [24], а именно, в середине трассы:

$$\sin^2(\zeta) / 2 \cos(\zeta) \ll |(\omega^2 - \omega_0^2 - iv\omega) / (\omega\omega_H)|.$$

В табл. 3 приведены оценки, выполненные по наборам твиков, у которых в диапазоне углов падения $35^\circ \dots 65^\circ$ среднее отношение амплитуд лево- и правополяризованной круговых волн L/R составляло более 1,4 (преобладание левой поляризации), и дальность до источника превосходила 1,5 Мм. Вычисления выполнялись с использованием формулы (3) для волн круговой левой поляризации. По усредненным по группе твиков критическим частотам, определенным для 1-й и 2-й мод, вычислялись следующие параметры модели: высота нижней границы плазменного полупространства h и показатель преломления (и тем самым концентрация электронов N). Гирочастота электронов принималась равной 1,2 МГц. В таблице приведены также величины эффективной высоты отражения h_1 , вычисленные для наборов твиков по усредненной критической частоте 1-й моды.

Электронная концентрация и высота нижней границы волновода Земля–ионосфера, определенные для разных трасс распространения

Высота h_1 , км	Высота h , км	Концентрация электронов N , см ⁻³	Среднее отношение L/R при $\theta = 35^\circ \dots 65^\circ$
89,7	83,2	375	1,47
88,9	81,3	263	1,47
89,5	85,8	1168	1,48
92,9	84,9	283	1,55
92,3	81,4	121	1,75
93,2	88,7	818	2,4
87,5	84,5	1855	2,93
89,5	81,6	291	3,35

Полученные на основе анализа твиков в рамках модели [24] значения концентрации N достаточно хорошо согласуются с данными о ночной ионосфере на высотах 85...90 км.

Выводы. На основе анализа твик-атмосфериков продемонстрирована возможность мониторинга регулярных (суточных и сезонных) изменений состояния нижней ионосферы. Обнаружено, что в течение ночи эффективная высота отражающего слоя в нижней ионосфере постепенно увеличивается на 4...5 км на интервале 20...02 часа локального времени. Показано, что при дальности менее 1 Мм число высокочастотных гармоник в твике не зависит от эффективной высоты отражения от ионосферы. При дальности более 1 Мм, при эффективной высоте волновода Земля–ионосфера более 90 км число наблюдаемых гармоник не превышает 4. При эффективной высоте отражения 87...89 км наблюдается рост числа твиков с большим количеством гармоник (до 6–8) для всего диапазона дальностей до источника. По-видимому, это связано с тем, что в данном узком диапазоне высот реализуются физические условия для формирования вертикального профиля электронной концентрации с максимальной крутизной нарастания, что обеспечивает минимальное затухание при распространении мод высших порядков.

Доля твиков с гармониками высшего порядка максимальна в период 20...24 часа локального времени.

Показано, что в 66 % случаев эффективная высота волновода для 1-й моды оказывается выше эффективной высоты для 2-й моды более чем на 0,7 км, что согласуется с моделями [24, 25] и обусловлено конечной глубиной проникновения волн в ионосферу. По критическим частотам для 1-й и 2-й мод получены оценки концентрации электронов в плазме D -слоя нижней ионосферы, которые составили от 120 до 1 800 частиц в 1 см⁻³.

Библиографический список

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 / S. A. Cummer // Ph. D. dissertation, 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. Modeling 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. of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 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. of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1974. – 36, iss. 10. – P. 1623–1632.
7. Yano S. Wave-form analysis of tweek atmospherics / S. Yano, T. Ogawa, H. Hagino // Res. Lett. Atmos. Electr. – 1989. – 2. – 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. – X., 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. Швец. – X., 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 // Геомагнетизм и аэрономия. – 1988. – 28, № 6. – С. 1015–1018.
13. Yamashita M. Propagation of tweek atmospherics / M. Yamashita // J. Atmos. Terr. Phys. – 1978. – 40, iss. 2. – 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. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1998. – 60, N 4. – P. 461–469.
16. Швець А. В. О поляризаційних свойствах твіков // *Радиофизика и электрон.*: сб. научн. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 1997. – 2, № 2. – С. 101–106.
17. Швець А. В. Локація молний і оцінка висоти нижньої іоносфери з використанням дисперсійних характеристик твік-атмосфериків / А. В. Швець, Ю. В. Горишня // *Радиофизика и электрон.* – 2011. – 16, № 4. – С. 53–59.
18. Gorishnya Y. V. Statistical study of multimodal tweek-atmospherics / Y. V. Gorishnya, A. V. Shvets // *Proc. 2010 Intern. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET'2010)*. – Kyiv. – 2010. – P. 98–101.
19. Shvets A. V. Variations of the lower ionosphere height inferred from “tweek” records / A. V. Shvets, Y. V. Gorishnya // *Proc. 2nd Intern. Radio Electronic Forum (IREF'2005)*. – Kharkiv. – 2005. – Vol. II. – P. 457–459.
20. A time domain direction finding technique for locating wide band atmospherics / A. P. Nickolaenko, V. A. Rafalsky, A. V. Shvets, M. Hayakawa // *J. of Atmospheric Electricity*. – 1994. – 14, N 1. – P. 97–107.
21. Rafalsky V. A. One-site distance-finding technique for locating lightning discharges / V. A. Rafalsky, A. V. Shvets, M. Hayakawa // *J. of Atmospheric and Terrestrial Physics*. – 1995. – 57, N 11. – P. 1255–1261.
22. 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.
23. Швець А. В. Метод локації молний і оцінки параметрів нижньої іоносфери з допомогою твік-атмосфериків / А. В. Швець, Ю. В. Горишня // *Радиофизика и электрон.* – 2010. – 15, № 2. – С. 63–70.
24. Ryabov B. S. Tweek formation peculiarities / B. S. Ryabov // *Geomagnetism and Aeronomy (English Translation)*. – 1994. – 34, N 1. – P. 60–66.
25. Sukhorukov A. I. Approximate solution for the VLF eigenvalues near cut-off frequencies in the nocturnal inhomogeneous earth-ionosphere waveguide / A. I. Sukhorukov, S. Shimakura, M. Hayakawa // *Planetary and Space Science*. – 1992. – 40, N 10. – P. 1363–1369.
26. Porrat D. Modal Phenomena in the Natural Electromagnetic Spectrum Below 5 kHz / D. Porrat, P.R. Bannister, A. C. Fraser-Smith // *Radio Science*. – 2001. – 36, N 3. – P. 409–506.
27. Nighttime D-region electron density measurements from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes / A. K. Maurya, B. Veenadhari, R. Singh et al. // *J. Geophys. Res.* – 2012. – 117. – A11308 (13 p.).
28. Gorishnya Y. V. The method for estimating of parameters of lower atmosphere through broadcast signals of tweek-atmospherics / Y. V. Gorishnya, A. V. Shvets // *Proc. Electromagnetic Methods of Environmental Studies (EMES'2012)*. – Kharkiv. – 2012. – P. 289–291.
29. Greifinger C. Approximate method for determining ELF eigenvalues in the earth-ionosphere waveguide / C. Greifinger, Ph. Greifinger // *Radio Science*. – 1978. – 13, N 5. – P. 831–837.
30. Kumar S. Higher harmonic tweek sferics observed at low latitude: estimation of VLF reflection heights and tweek propagation distance / S. Kumar, A. Kishore, V. Ramachandran // *Ann. Geophys.* – 2008. – 26. – P. 1451–1459.
31. Gorishnya Y. V. Polarization of atmospherics propagating under night-time ionosphere / Y. V. Gorishnya, A. V. Shvets // *Proc. 6th Intern. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies (MSMW'07)*. – Kharkov. – 2007. – Vol. 2. – P. 763–765.

Рукопись поступила 27.09.2013.

Y. V. Gorishnya

ELECTRON DENSITY AND LOWER IONOSPHERE HEIGHT ESTIMATIONS BY RESULTS OF ANALYSIS OF MULTIMODAL TWEAK-ATMOSPHERICS

Tweek-atmospherics (tweeks) are used for low ionosphere investigation together with VHF-radio station's signals. Within the framework of existing tweek propagation models there is a projection of both decrease and increase of effective reflection height with mode index increasing. Therefore, the analysis of experimental data arouses interest and is based on improved method, which allow us to obtain the more detailed estimations of the ionosphere reflection height. For ensemble of experimental records of tweek-atmospherics (tweeks) the source ranges and effective reflection heights were determined, corresponding to Earth-ionosphere waveguide first-order modes and higher-order modes. The observable harmonic number in tweeks according to source range, local nighttime and effective ionosphere reflection height was investigated. The obtained results show the increase of effective reflection height in low ionosphere during the night. These data also demonstrate the increasing of percentage of tweeks with higher-order harmonics in case of effective ionosphere height 87...89 km. The maximum of average tweek harmonic quantity is observed in period of 20...24 hours of local time. The difference between effective reflecting height for the first and second tweek harmonics was observed, which is 1.4 km on the average. Within the framework of anisotropic ionosphere the electron density values were obtained by such measurements at altitudes of tweek reflection. The investigation results allow to select the adequate tweek propagation model and to estimate lower ionosphere parameters.

Key words: low ionosphere diagnostics, ELF-VLF radio waves, tweek-atmospherics, lightning location.

Ю. В. Горишня

ОЦІНКА КОНЦЕНТРАЦІЇ ЕЛЕКТРОНІВ І ВИСОТИ НИЖНЬОЇ МЕЖІ ІОНОСФЕРИ ЗА ДАНИМИ АНАЛІЗУ БАГАТОМОДОВИХ ТВІК-АТМОСФЕРИКІВ

Твік-атмосферики (твіки), разом з радіопросвічуванням хвилями ДНЧ-радіостанцій, використовуються для вивчення нижньої іоносфери. У рамках існуючих моделей їх поширення поблизу частот відсічення хвилеводу Земля-іоносфера прогнозується як спадання, так і зростання ефективної висоти відображення з ростом порядку хвилеводної моди. Тому становить інтерес аналіз експериментальних даних на основі удосконаленої методики, що дозволяє отримати більш точні оцінки висоти відбиття від іоносфери. За експериментальними записами твік-атмосфериків (твіків) визначено дальності до їх джерел та ефективні висоти відбиття від іоносфери, відповідні модам першого й вищого порядків хвилеводу Земля-іоносфера. Досліджено кількість спостережуваних гармонік в твіках залежно від дальності до джерела, локального часу та ефективної висоти відбиття від іоносфери. Показано, що ефективна висота віддзеркалення твіків росте протягом ночі. У діапазоні висот відображення 87...89 км спостерігається зростання відносної кількості твіків з вищими гармоніками. Найбільше число гармонік в твіках спостерігається в період 20...24 години локального часу. Показано, що ефективна висота віддзеркалення для першої моди більше на 1,4 км висоти для другої моди, що в рамках анізотропної моделі іоносфери дозволило оцінити щільність електронів в області висоти відображення. Результати дослідження дозволяють вибрати адекватну модель поширення твіків і оцінки параметрів нижньої іоносфери.

Ключові слова: діагностика нижньої іоносфери, ННЧ-ДНЧ-радіохвилі, твік-атмосферики, локація блискавок.