

**Ю.В. Горишня**

Институт радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: yugorishnya@gmail.com

**Поляризация ночных СНЧ–ОНЧ  
атмосфериков: опыт применения  
критериев статистики**

***Предмет и цель работы.** Твик-атмосферики (ночные низкочастотные атмосферерики), наряду с радиопросвечиванием волнами радиостанций очень низких частот (ОНЧ), используются для изучения нижней ионосферы. Предсказания имеющейся аналитической теории относительно поляризации таких атмосфериков и накопленный экспериментальный материал описывают левую эллиптическую поляризацию как характерный признак твик-атмосфериков в их «хвостовой» части. Наличие горизонтальной составляющей геомагнитного поля в области отражения твик-атмосферика в нижней ионосфере должно приводить в рамках теории к невязимости распространения в направлениях «восток–запад» и «запад–восток». Цель работы состояла в том, чтобы определить поляризацию твик-атмосфериков по трехкомпонентным записям и статистически оценить нулевую гипотезу в отношении двух поляризационных параметров твик-атмосфериков.*

***Методы и методология работы.** На материале массива экспериментальных записей из ~300 твик-атмосфериков, достаточного по объему для статистической обработки, изучалась поляризация для различных участков временной формы атмосфериков.*

***Результаты работы.** Определены и проанализированы для первой (фундаментальной) гармоники две характеристики поляризации твик-атмосфериков, поляризационное отношение и разность фаз, в зависимости от параметра, тождественного углу падения излучения. Обнаружено различие между поляризационными отношениями по данным для околоэкваториальных трасс распространения твик-атмосфериков и для твик-атмосфериков, распространяющихся вне области геомагнитного экватора, где выполняется условие квазипродольного распространения излучения относительно геомагнитного поля.*

***Заключение.** Показано, что невязимость распространения твик-атмосфериков в направлениях «восток–запад» и «запад–восток» относительно геомагнитного меридиана проявляется статистически как значимые различия в величинах разности фаз при углах падения излучения 40...60°, что соотносится с областью перехода от головной части к телу атмосферика во временной форме твик-атмосфериков. Ил. 6. Библиогр.: 12 назв.*

***Ключевые слова:** сверхнизкие частоты (СНЧ), очень низкие частоты (ОНЧ), диагностика нижней ионосферы, СНЧ–ОНЧ радиоволны, твик-атмосферерики, локация молний.*

Электромагнитное импульсное излучение, возбуждаемое грозвыми разрядами, имеет максимум спектральной плотности в диапазонах сверхнизких (СНЧ, 3...3000 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-атмосферерики, или твики. Наряду с радиопросвечиванием волнами ОНЧ-радио-

станций, использование этих природных сигналов позволяет изучать область ионосферы на высотах 60...90 км с низкой концентрацией электронов ( $10^6 \dots 10^9 \text{ м}^{-3}$ ).

Твики отличаются от обычных атмосфериков, регистрируемых в дневное время, большей длительностью (100...150 мс). Амплитудный спектр твика имеет сложную структуру, обусловленную модальной интерференцией, особенно при дальности до источника менее

3000 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.

Анализ твиков можно привлечь для оценки электронной концентрации в окрестности слоя нижней атмосферы, где происходит их отражение; метод такой оценки по двум первым гармоникам твика приведен в [1, 2]. В [3, 4] эффективная высота волновода Земля–ионосфера вдоль трассы распространения и дальность до источника определялись на основе анализа нескольких гармоник твика, исследовалась зависимость числа наблюдаемых гармоник от дальности до источников. На основе анализа экспериментальных данных ранее нами были изучены вариации 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 [1] определения дальности до источника по экспериментальным записям твиков.

Данный алгоритм определения дальности до источника  $D$  и эффективной высоты отражения  $h$  был численно протестирован в [5] при помощи модельных твиков. Показано, что точность определения эффективных высот отражения (по уровню доверительной вероятности 95 %)  $\pm 0,8$  км, точность оценки дальности до источника твика при этом лежит по размеру в пределах нескольких процентов от дальности.

Распространение волн вблизи критических частот волновода, образующих «хвостовую» часть твика, было объяснено с учетом магнитоактивных свойств ионосферной плазмы [6]. Поляризация поля в «хвостовой» части твиков близка к левой круговой, что связано с анизотропией ионосферы [7]. Поляризация твика меняется от начала к концу его временной формы [8, 9]. Механизм отражения СНЧ–ОНЧ излучения в нижней ионосфере и величина затухания

в ионосферном слое оказывают влияние на поляризацию, а также на спектральный состав твика. Анализ этих данных, следовательно, может служить инструментом для решения обратной задачи по установлению параметров ионосферы, усредненных вдоль трассы твика. На экспериментальном материале была продемонстрирована невзаимность при распространении в направлениях «восток–запад» и «запад–восток» у поляризационных характеристик твиков [8]. Механизм, вызывающий такой эффект, был показан как результат наличия в геомагнитном поле горизонтальной составляющей на высотах отражения твик-атмосфериков [6]. Основная часть геоида охвачена разработанными ранее теориями распространения твика, однако в области около экватора не выполняется необходимое для этих теорий условие квазипродольного распространения волн. На материале достаточно крупного массива экспериментальных записей твиков изучалась поляризация для различных участков временной формы твика [9]. Был получен алгоритм определения поляризации, который позволяет сравнивать данные по твикам разной длительности, найдя для каждого пару значений  $[h, D]$ . Цели настоящей работы состояли в том, чтобы максимально полно представить этот материал и установить уровень достоверности выявленного эффекта невзаимности «восток–запад» и «запад–восток», статистически оценив нулевую гипотезу в отношении двух поляризационных параметров твиков с противоположными азимутами прихода.

**1. База данных и методы обработки.** Банк экспериментальных записей твиков был накоплен в январе – апреле 1991 г. на борту научно-исследовательского судна «Академик Вернадский» в акваториях Атлантического и Индийского океанов [7]. 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 от 10 до 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:

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

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

В результате анализа ансамбля данных были получены значения усредненных высот  $h$  (83...94 км) и  $D$  (330...4000 км). Полное число обработанных твиков составило 279 в 20-ти сериях измерений.

## 2. Поляризационный анализ поля твиков.

Теория формирования твика [10] разработана аналитически в приближении квазипродольного распространения радиоволн относительно геомагнитного поля, причем поле принималось как нормальное к земной поверхности. Она предсказывает левую круговую поляризацию «хвостовой» части твика и преобладание левой круговой поляризации на всем протяжении твика.

В квазилучевой трактовке формирования твика за счет многократного отражения от границ волновода начальная часть твика формируется так называемой «прямой волной», идущей вдоль земной поверхности (по дуге большого круга в приближении сферической Земли либо по прямой в приближении плоского волновода). Следующие моменты времени в волновой форме твика представлены излучением, испытанным 1, 2, 3, ...,  $n$  отражений от верхней границы волновода. Угол падения излучения на расположенный на земной поверхности приемник меняется от почти касательного к земной поверхности до почти вертикального падения.

Для области частот, к которой относится первая гармоника твика, в практическом смысле достаточно потребовать выполнения условия для углов и параметров нижней ионосферы

в области отражения твика:

$$\sin^2(\zeta) / 2 \cos(\zeta) \ll |(\omega^2 - \omega_0^2 - i\nu\omega) / \omega \cdot \omega_H|. \quad (2)$$

Здесь  $\zeta$  – угол между геомагнитным полем и вертикалью на высоте отражения (для твиков ~90 км),  $\omega$  – текущая угловая частота твика,  $\omega_H$  – гирочастота электронов, также взятая на высоте области отражения,  $\omega_0$  – плазменная частота, зависящая от концентрации свободных электронов на этой высоте,  $\nu$  – частота столкновений свободных электронов с нейтральными молекулами, в свою очередь являющаяся функцией концентрации электронов,  $i$  – мнимая единица.

Для ночных условий выполняются соотношения  $\omega \ll \nu \ll \omega_H$  – поскольку гирочастота электронов порядка 1 МГц, отношение  $\omega_H / \nu$  ночью на таких высотах равно 20...70, а основная частотная область твика находится на 1,5...20,0 кГц. В реальных ночных условиях соотношения плазменной частоты, гирочастоты и частоты поля твика приводят к величине показателя преломления 3...7 [10], отчего вышеуказанное условие (2) преобразуется к  $\sin^2(\zeta) / 2 \cos(\zeta) \ll 9...49$ .

Чтобы иметь возможность сопоставить твики разной длительности, мы соотнесли разные во времени участки записей с углом падения излучения  $\theta$  в точке приема. Это связывает примененный подход с используемым в методе модов [11] для волноводного распространения СНЧ–ОНЧ волн. В этой трактовке  $\theta$  есть действительная часть комплексного угла падения – специфической величины, характеризующей порядковый номер мода (геометрия задачи представлена на рис. 1). Тогда для  $n$ -го мода связь дальности до источника твика  $D$ , времени  $\tau_n$  задержки от начала твика и угла  $\theta_n$  выражают как  $\sin \theta_n = 1 / (1 + c\tau_n / D)$ , где  $c$  – скорость света в вакууме.

Рассмотрев соотношения параметров  $D$ ,  $\tau_n$  и  $\theta_n$  для сферического случая, мы можем получить аналогичную связь. Расчеты показали, для данного набора твиков различия формул связи  $\theta(\tau)$  и частотной дисперсии (1) заметны в начальной части твиков – при временах  $\tau_n$  менее 0,5...1,5 мс.

Учитывая, что последовательные лучи с углами  $\theta_n$  (рис. 1) приходят в достаточно узком диапазоне углов, мы рассматриваем выделенный

интервал сигнала от удаленного импульсно-го источника (молнии) как волну Бриллюэна с углом падения, соответствующим центральной части выбранного отрезка.

Сопоставим  $\theta$  с определенным моментом анализируемого отрезка твика. Для целей спектрального анализа необходим отрезок большой длины, охватывающий хотя бы несколько «лучей», но достаточно короткий для разрешения по углу. Как компромисс мы выбрали длину отрезка в 5 «лучей». Длительность данного отрезка  $\Delta T_5(\theta)$  составит

$$\Delta T_5(\theta) = \frac{D}{c} \times \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{\operatorname{tg}\theta} + \frac{6h}{D}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{1}{\operatorname{tg}\theta} - \frac{4h}{D}\right)^2 + 1} \right\}. \quad (3)$$

Зависимость параметров поляризации поля твика от угла падения мы рассчитали с шагом в  $5^\circ$ .

Предел снизу для  $\theta$  задает длина записей твика (в нашем случае 40 мс) и дальности до источников. Мы получали минимальные углы падения  $10...15^\circ$ . Верхний предел вытекает из (3) и равен  $\theta_{\max} = \operatorname{arctg}(D/4h)$ . Это значение не превосходит  $75^\circ$ . К отрезкам записи, сопоставленным искомому углу, применялась процедура умножения на окно Хэмминга и затем быстрое преобразование Фурье. На частоте, связанной с искомым углом как  $f(\theta) = c/2h \cos\theta$ , мы вычисляли поляризационные характеристики –  $r$  и разность фаз  $\Psi$ . Отметим, что первая из них – поляризационное отношение (или отношение амплитуд)  $r$  может быть меньше единицы, когда поперечная амплитуда меньше продольной и превращается в длину малой полуоси эллипса поляризации излучения. Когда же эллипс поляризации ориентирован поперек направления передачи энергии волной, заданного вектором Пойнтинга, мы видим  $r > 1$ . Как левополяризованную мы принимали моду, горизонтальные составляющие электрического и магнитного вектора которой вращаются вокруг геомагнитных силовых линий в том же направлении, что и положительно заряженные ионы. В системе координат, связанной с наблюдателем, это соответствует в южном полушарии правой, а в северном магнитном полушарии левой круговой поляризациям. Вычисленные

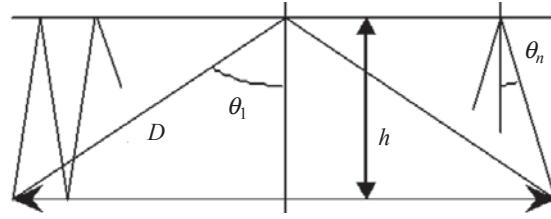


Рис. 1. Лучевая трактовка распространения поля в плоском волноводе Земля–ионосфера

значения отбраковывались, если для данного участка твика первая волновая мода на частоте отсечки волновода не превышала вдвое шум.

В начальной части твика вплоть до угла  $63,5^\circ$  [10] поляризация поля линейна, и излучение распространяется в виде квази-ТМ- и квази-ТЕ-мод волновода.

Поляризация моды 2-го порядка и более высокочастотных мод остается эллиптической с преобладанием левой круговой. Более подробное рассмотрение поляризации моды 1-го порядка приведено ниже.

Поляризация твиков имеет отличия для твиков, прошедших более 1,5 Мм от источника, и твиков с близких расстояний. Это может быть следствием различий в затухании мод твика левой и правой поляризации.

Результат вычислений представляет собой 280-строчную таблицу с 30 столбцами. Для иллюстрации на рис. 2 и 3 приведен ряд характерных примеров того, какие характеристики поляризации наблюдаются близ «хвоста» твика ( $\theta(\tau) = 15^\circ$ ), в области ярко выраженной левозэллиптической поляризации ( $\theta(\tau) = 25^\circ, 35^\circ$ ), в области сильных вариаций поляризации ( $\theta(\tau) = 45^\circ$ ) и в головной части твиков ( $\theta(\tau) = 55^\circ, 65^\circ$ ). Характеристики поляризации приведены в зависимости от геомагнитного азимута, который для каждого отдельного твика вычислялся через азимут трассы его распространения и направление геомагнитного поля в точке приема (местонахождения судна) на дату приема. Поляризационные отношения близки к 1 (случай левой круговой поляризации) для малых углов  $15...35^\circ$ , что соответствует «хвостовым» частям твиков. Так же для разности фаз на углах падения  $20...35^\circ$  значения близки между собой и находятся вблизи  $90^\circ$ . Вкупе с отклонениями разности фаз от прямого угла это описывает случай левой эллиптической поляризации в «хвостовой» части твика.

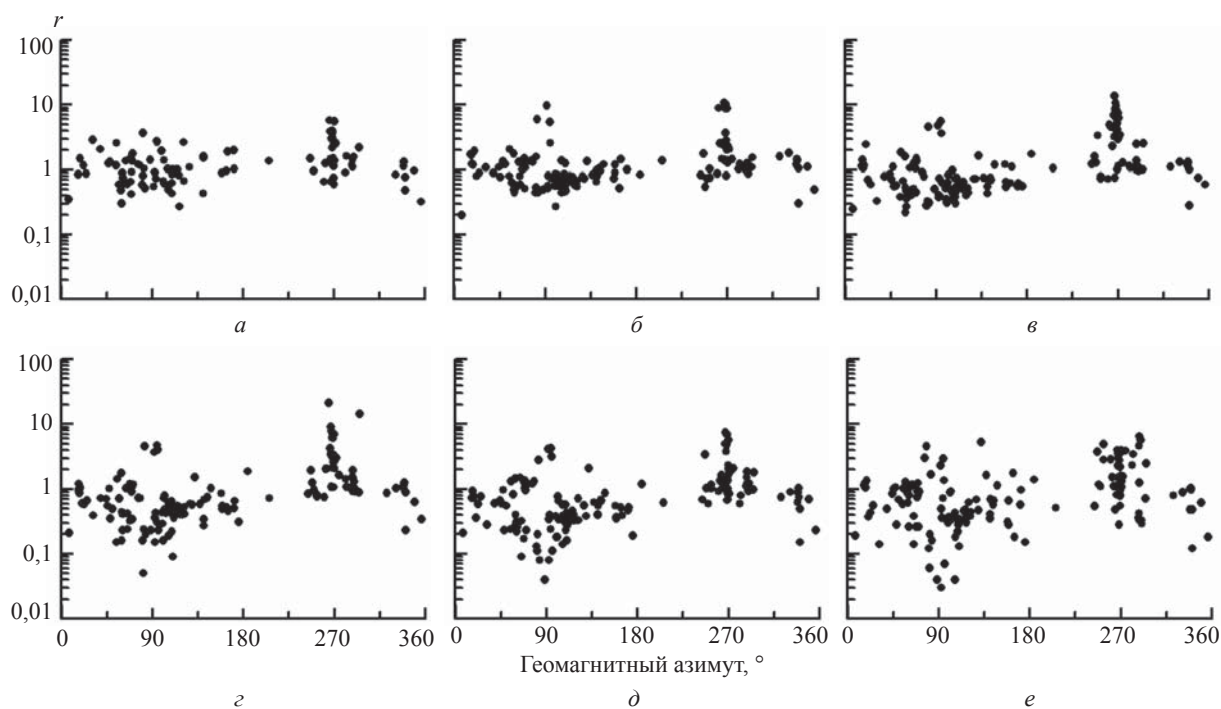


Рис. 2. Отношение амплитуд для твиков с дальностью источника >1,5 Мм для некоторых углов падения  $\theta$ : а – 15°; б – 25°; в – 35°; г – 45°; д – 55°; е – 65°

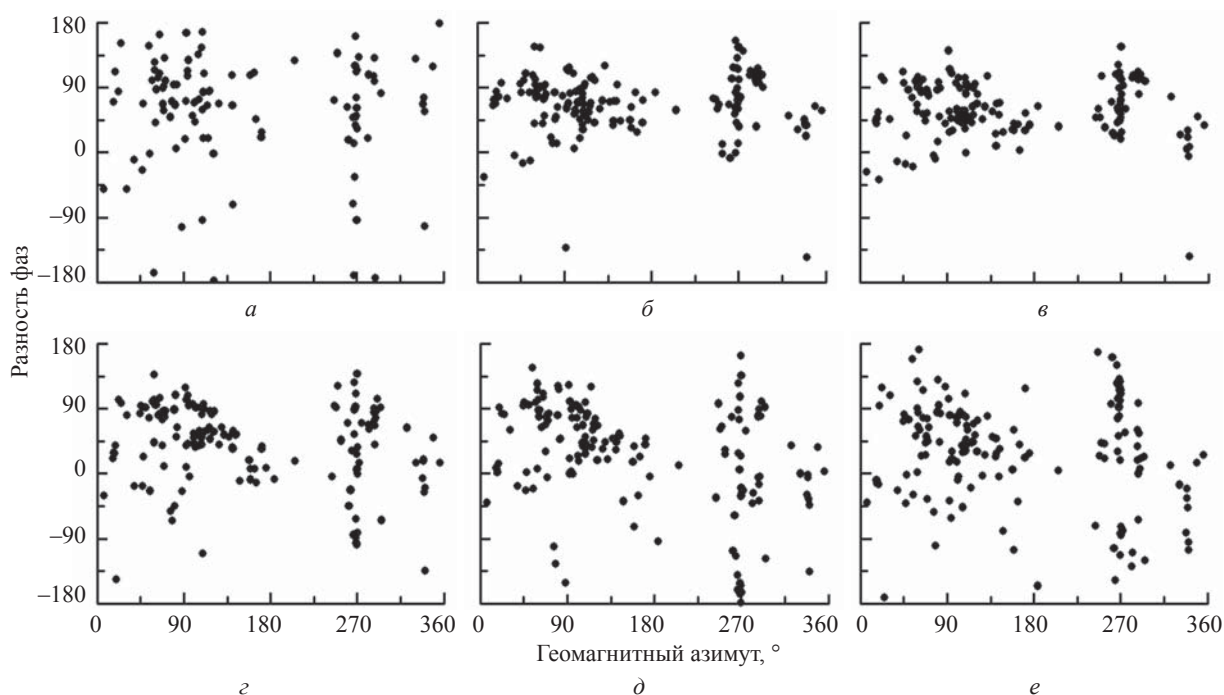


Рис. 3. Разность фаз для твиков с дальностью источника >1,5 Мм для некоторых углов падения  $\theta$ : а – 15°; б – 25°; в – 35°; г – 45°; д – 55°; е – 65°

На всех графиках обращают на себя внимание секторы азимутов вблизи направлений «восток–запад» и «запад–восток», особенно для углов падения 40...60°. Здесь сосредоточены

твики с заметно отличающимися параметрами поляризации. Право- и левополяризованные круговые волны присутствуют в 1-й моде твика в различных соотношениях. У части тви-

ков с дальностями до источников более 1,5 Мм на участке позади головной части 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). Отношение амплитуд близко единице, а разность фаз тогда близка к  $-90^\circ$ . Если привести на аналогичных графиках полный ансамбль твиков, картина будет сходной, однако участков с резко выраженной линейной поляризацией у «близких» твиков практически нет.

**3. Тестирование статистических гипотез на материале параметров поляризации СНЧ–ОНЧ поля твиков.** Для прояснения картины поляризации обратимся к соотношению (2). Весь массив данных был разделен на твики приэкваториальной зоны и твики, место приема которых лежало вне экваториальных геомагнитных широт. Точнее, учитывалось, выполняется ли условие квазипродольного распространения на высотах отражения (примерно 90 км). Околополярные и средние геомагнитные широты охватываются таким приближением. В случае приэкваториальной зоны, когда угол между силовыми линиями магнитного поля Земли и вертикалью  $>75^\circ$ , приближение квазипродольного распространения не выполняется. Поляризационные отношения приведены на рис. 4 и 5, где вновь выбраны характерные случаи для ряда углов падения. Графики для разности фаз опущены, так как они не вносят дополнительных деталей.

Наблюдаются три заметных особенности. Отношения амплитуд в среднем близки к 1. Однако исключение составляют два узких сектора близ  $90^\circ$  и  $270^\circ$ , каждый из которых не превышает  $\pm 10^\circ$ . В них наблюдается ряд твиков с резко выраженным наличием правой круговой поляризации в составе сигнала – с поляризацией, нередкоходящей до почти линейной на всем протяжении. В областях вне окрестностей геомагнитного экватора добавляется третья характерная особенность: широкий ( $\pm 30^\circ$ ) сектор вокруг азимута  $90^\circ$ , где, напротив, наблюдаются твики с отношением амплитуд менее 1, причем этот эффект проявляется тем сильнее, чем ближе азимут к  $90^\circ$ . В области углов падения  $55\dots 65^\circ$  отношение амплитуд в среднем дости-

гает 0,4...0,5. При этом разность фаз остается положительной. Вдали от источников твиков частотная дисперсия проявляется на достаточно длительном отрезке временной формы твика и эффекты поддаются разрешению. Можно предположить, что эффект, выраженный иным отличием от «стандартной» картины распространения и поляризации твиков, вызван иным механизмом, специфическим для области средних геомагнитных широт, либо общим для всех областей, где излучение «хвостовой» части твика можно считать квазипродольным к силовым линиям.

Выполним проверку нулевой гипотезы, т. е. гипотезы о том, что статистические распределения одинаковы для поляризационных характеристик твиков вне зависимости от направления распространения.

Для сравнения из общего массива отобраны твики в двух секторах геомагнитного азимута прихода – восточного ( $60\dots 120^\circ$ ) и западного ( $240\dots 300^\circ$ ). Для поляризационного отношения и разности фаз на углах падения излучения  $10\dots 75^\circ$  вычислены величины  $t$ -критерия Стьюдента с соответствующим числом степеней свободы  $N_1 + N_2 - 2$ . Для этого были определены средние значения  $m$  и стандартные отклонения  $s$  для двух наборов твиков каждого сектора, где число образцов  $N_i$  различно на разных углах и, как правило, больше 20, но нигде не превышает 65. Доверительные пределы для средних значений  $r$  и  $\Psi$  определяются через выборочные значения как  $m_i \pm t_p s_i / \sqrt{N_i - 1}$ , где  $t_p$  –  $p$ -процентное значение  $t$ -распределения Стьюдента со степенью свободы  $N_i$ , тогда 5%-е доверительные интервалы составят  $]m_i - 2s_i / \sqrt{N_i - 1}; m_i + 2s_i / \sqrt{N_i - 1}[$ . Так как  $N_i$  невелики, используются несмещенные оценки. В то же время число  $N_i$  недостаточно ( $<100$ ) для получения надежных оценок дисперсий  $\sigma^2$  по выборочным значениям  $s^2$ . Поэтому полезно воспользоваться  $t$ -распределением Стьюдента для проверки нулевой гипотезы о совпадении математических ожиданий  $\langle r \rangle$  и  $\langle \Psi \rangle$  для восточного и западного секторов азимута, как более точным методом в этих условиях, чем метод стандартных ошибок. Выборки можно считать независимыми. Результаты показаны на рис. 6. Здесь же сплошной линией приведены значе-

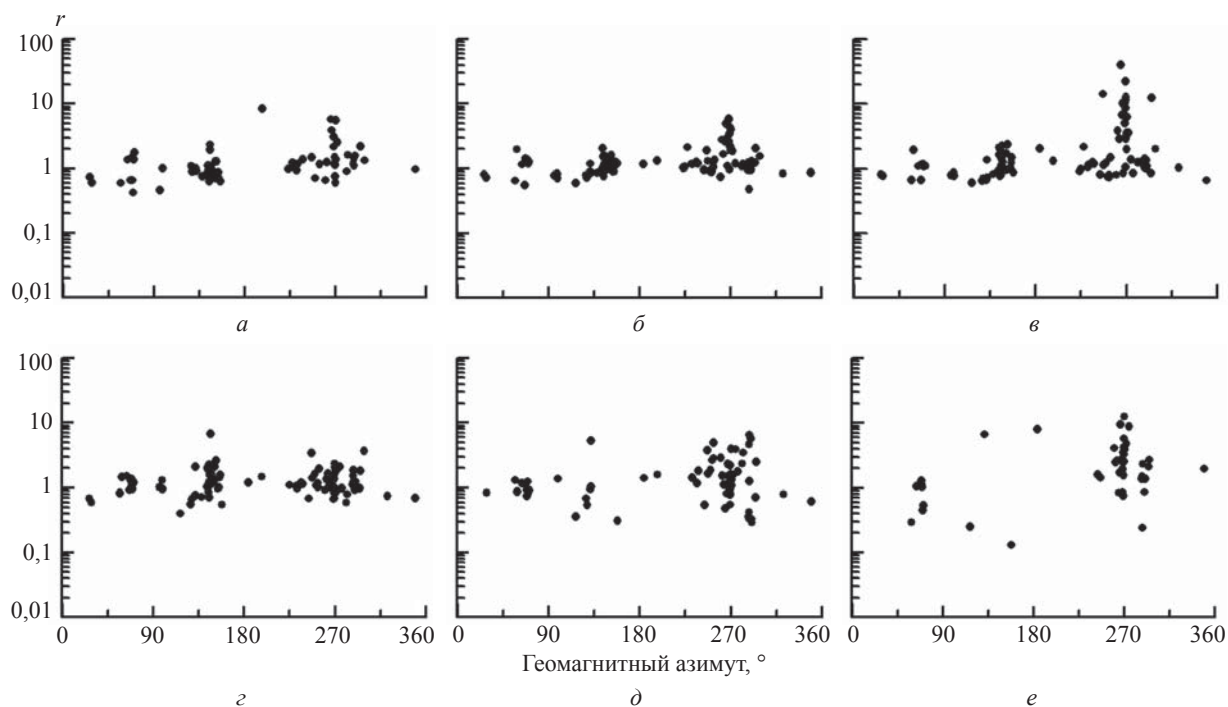


Рис. 4. Отношения амплитуд для твиков, распространяющихся в приэкваториальной геомагнитной области, для некоторых углов падения  $\theta$ : а – 15°; б – 30°; в – 40°; г – 55°; д – 65°; е – 75°

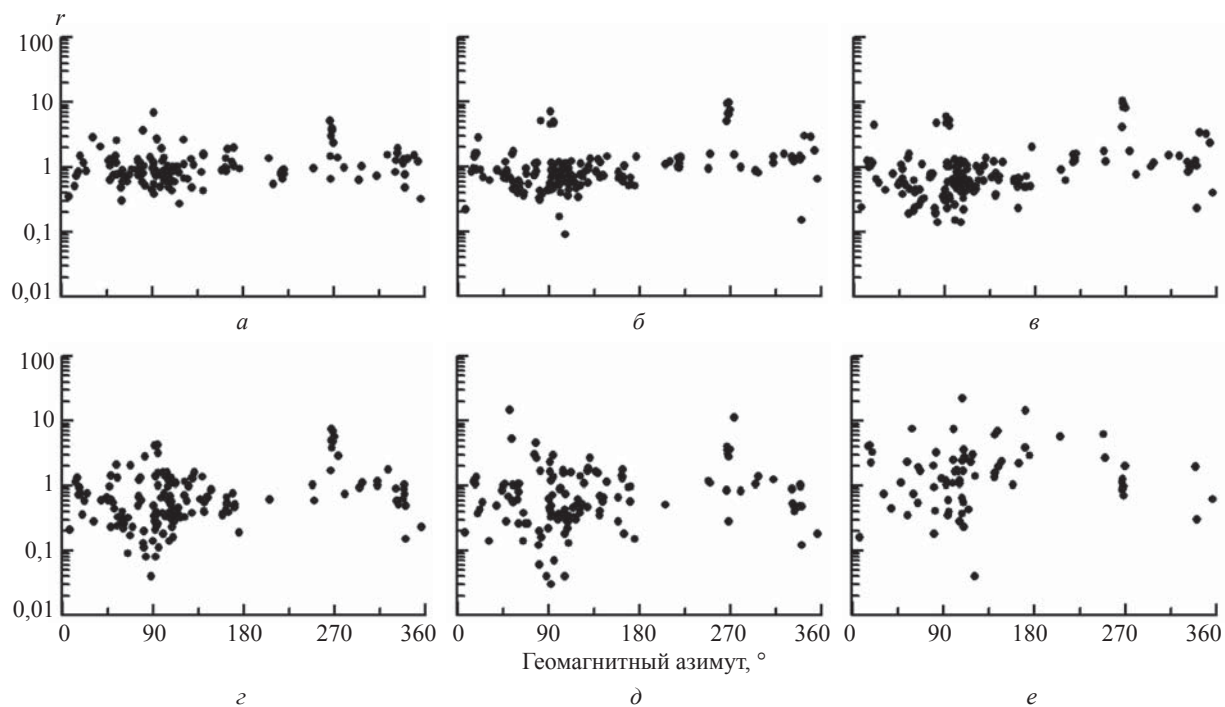
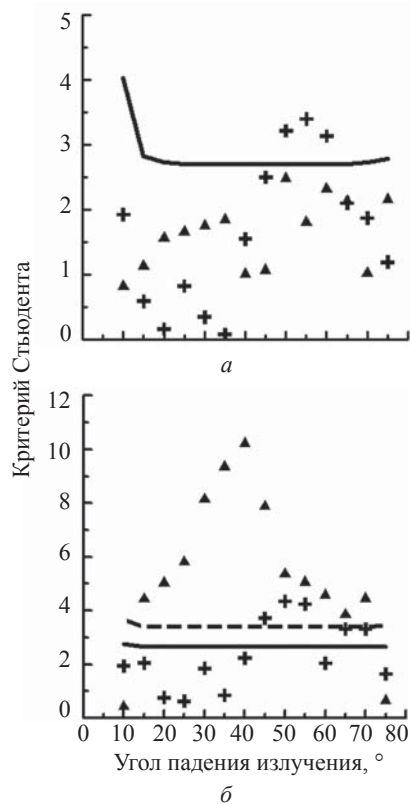


Рис. 5. Отношения амплитуд для твиков вне экваториальной зоны геомагнитных широт, для некоторых углов падения  $\theta$ : а – 15°; б – 30°; в – 40°; г – 55°; д – 65°; е – 75°

ния данного критерия для 1%-го уровня значимости (значимые различия), штриховая линия – для 0,1%-го уровня значимости (высокозначимые различия).

Для внеэкваториальной области высокосзначимые различия наблюдаются для поляризационного отношения при углах 10...75°, т. е. практически на всем протяжении твиков.



**Рис. 6.** Значения  $t$ -критерия Стьюдента для секторов геомагнитного азимута твиков – восточного ( $60...120^\circ$ ) и западного ( $240...300^\circ$ ) – вблизи геомагнитного экватора (а) и вне геомагнитного экватора (б). Треугольники – поляризационное отношение, кресты – разность фаз

Обращает на себя внимание иной характер статистических различий для разности фаз. Как в области экватора, так и вне ее только в узком диапазоне углов падения  $45...60^\circ$  наблюдаются значимые или даже высокозначимые различия (на краях диапазона они могут быть так называемыми почти значимыми, с 5%-м уровнем значимости). Это проявляется присутствием ряда твиков, на протяжении временной формы которых разность фаз меняет знак для первой гармоники и в начальной части которых она, как правило, отрицательна. Характерные эффективные углы падения  $45...50^\circ$  можно сопоставить со случаем полного внутреннего отражения. Сопоставив с теоретическими предсказаниями поляризации твиков [10], можно предположить, что в данном эффекте проявляется влияние горизонтальной составляющей геомагнитного поля.

Во всех областях ориентации геомагнитного поля среди твиков можно обнаружить также записи, как правило, произведенные в мо-

мент, близкий заре по местному времени и при крайне низкой эффективной высоте отражения ( $83...86$  км). В них наблюдается левая эллиптическая поляризация первой моды с крайне вытянутым эллипсом поляризации, т. е. приближающаяся к линейной. Эти записи могут соответствовать картине перестройки ионосферы от дневной к ночной структуре и смеси механизмов отражения, присущих ночи (за счет геомагнитного поля) и дню (за счет высоких коэффициентов потерь в области отражения СНЧ–ОНЧ радиоволн). Достаточно большая длина и высокая доля спектральной энергии, сосредоточенной в нескольких гармониках, сближают данные СНЧ–ОНЧ атмосферерики с твиками, так что они классифицируются как твик-атмосферерики. Строго говоря, такая группа представляет не собственно твики, являясь переходным случаем от дневных атмосферериков к твикам, наподобие ситуации, которая появляется при солнечных затмениях [12]. Возможно, их присутствие осложняет выявление поляризационной невзаимности в общей картине ночных твиков.

Механизм, вызывающий высокозначимые различия в величинах поляризационного отношения  $r$ , имеет, видимо, иную природу и должен быть рассмотрен особо.

Представленные в этом подразделе наблюдения над особенностями поляризации твиков в разных областях могут помочь в дальнейшем при разработке теории распространения твиков в околоэкваториальных районах, где не соблюдается условие квазипродольного распространения радиоволн.

**Выводы.** Исследована поляризация СНЧ–ОНЧ сигналов в волноводе Земля–ионосфера с помощью трехкомпонентных записей твиков для первой гармоники (соответствующей моде 1-го порядка) вдоль всей временной формы сигнала, для чего определялись поляризационное отношение (отношение амплитуд поперечной и продольной магнитной компоненты сигнала) и их разность фаз. На углах падения  $15...35^\circ$  наблюдается левая эллиптическая поляризация твика, что хорошо согласуется с теорией, описывающей особенности распространения атмосферерики при ночном профиле ионосферы под анизотропной нижней ионосферой. Показано, что эффект невзаимности



при распространении «восток–запад» и «запад–восток» относительно геомагнитного меридиана наблюдается как значимые и даже высокочисленные различия в разности фаз при углах падения излучения 40...60°. Для твиков вне области геомагнитного экватора также обнаружены иные особенности, а именно при геомагнитных азимутах распространения примерно 60...120° величины поляризационного

отношения составляют  $r = 0,3 \dots 0,7$ , что приводит к высокочисленным различиям для направлений «запад–восток» и «восток–запад», при углах падения 15...70°. Поляризация твиков различается в окрестности геомагнитного экватора и в средних геомагнитных широтах, на которых выполняется условие квазипродольного распространения излучения твиков вдоль геомагнитного поля.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горишня Ю.В. Оценка концентрации электронов и высоты нижней границы ионосферы по данным анализа многомодовых твик-атмосфериков. *Радиофизика и электроника*. 2014. Т. 19, № 1. С. 20–28.
2. Gorishnya Yu.V. Plasma Density Evaluation in the Sharply-bounded Ionosphere Model by Tweaks. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*: conf. proc. (Kyiv, 29 May – 2 June 2017). Kyiv: KPI Publ., 2017. P. 94–97.
3. Шве́ц А.В., Горишня Ю.В. Локация молний и оценка высоты нижней ионосферы с использованием дисперсионных характеристик твик-атмосфериков. *Радиофізика та електроніка*. 2011. Т. 16, № 4. С. 53–59.
4. Gorishnya Y.V., Shvets A.V. Statistical study of multimodal tweek-atmospherics. *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Conf. on Math. Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2010)*. (Kyiv, 6–8 Sept. 2010). Kyiv: IEEE, 2010. P. 98–101.
5. Горишня Ю.В., Шве́ц А.В. Метод оценки параметров нижней ионосферы с помощью широкополосных сигналов твик-атмосфериков. *Electromagnetic Methods of Environmental Studies (EMES'2012)*: тез. докл. (Харьков, 25–27 сент. 2012). Харьков: РИ НАНУ, 2012. С. 289–291.
6. Yamashita M. Propagation of tweek atmospherics. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1978. Vol. 40, Iss. 2. P. 151–156. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(78)90019-3).
7. Shvets A.V., Hayakawa M. Polarization effects for tweek propagation. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1998. Vol. 60, N 4. P. 461–469. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00131-4).
8. Шве́ц А.В. О поляризационных свойствах твиков. *Радиофизика и электроника*: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. Харьков, 1997. Т. 2, № 2. С. 101–106.
9. Shvets A.V., Gorishnya Y.V. Polarization of atmospherics propagating under night-time ionosphere. *The 6<sup>th</sup> Int. Kharkov Symp. on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Technologies (MSMW'07)*: Proc. (Kharkov, Ukraine, 25–30 June 2007). Kharkov, 2007. Vol. 2. P. 763–765.
10. Ryabov B.S. Tweek formation peculiarities. *Geomagn. Aeronomy*. 1994. Vol. 34, N 1. P. 60–66.
11. Wait J.R. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. Oxford, New York: Pergamon Press, 1962. 372 p.
12. Reeve C.D., Rycroft M.J. The eclipsed lower ionosphere as investigated by natural very low frequency radio signals. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1972. Vol. 34, Iss. 4. P. 667–672. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(72\)90154-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(72)90154-7).

Стаття надійшла 31.01.2019

#### REFERENCES

1. Gorishnya, Y.V., 2014. Electron density and lower ionosphere height estimations by results of analysis of multimodal tweek-atmospherics. *Radiofiz. Electron.*, **5(19)**(1), pp. 20–28 (in Russian).
2. Gorishnya, Yu.V., 2017. Plasma Density Evaluation in the Sharply-bounded Ionosphere Model by Tweaks. In: *IEEE First Ukraine Conf. Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Conf. Proc. Kyiv, Ukraine, May 29 – June 2. Kyiv: KPI Publ., pp. 94–97.
3. Shvets, A.V., Gorishnya, Yu.V., 2011. Lightning location and estimation of the lower ionosphere effective height using dispersion properties of tweek-atmospherics. *Radiofiz. Electron.*, **16**(4), pp. 53–59 (in Russian).
4. Gorishnya, Y.V., Shvets, A.V., 2010. Statistical study of multimodal tweek-atmospherics. In: *13<sup>th</sup> Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2010)*. Proc. Kyiv, Ukraine, 6–8 Sept. Kyiv: IEEE, pp. 98–101.
5. Shvets, A.V., Gorishnya, Y.V., 2012. The Method for Estimating of Parameters of Lower Atmosphere through Broadcast Signals of Tweek-Atmospherics. In: *Electromagnetic Methods of Environmental Studies (EMES'2012)*. Proc. Kharkiv, Ukraine, 25–27 Sept. Kharkiv: RI NANU Publ., pp. 289–291 (in Russian).
6. Yamashita, M., 1978. Propagation of tweek atmospherics. *J. Atmos. Terr. Phys.* **40**(2), pp. 151–156. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0021-9169(78)90019-3).
7. Shvets, A.V., Hayakawa, M., 1998. Polarization effects for tweek propagation. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **60**(4), pp. 461–469. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(97\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(97)00131-4).
8. Shvets, A.V., 1997. On the polarization properties of tweaks. In: V.M. Yakovenko, ed. 1997. *Radiofizika i elektronika*. Kharkov: IRE NAS of Ukraine Publ. **2**(2), pp. 101–106 (in Russian).
9. Shvets, A.V., Gorishnya, Y.V., 2007. Polarization of atmospherics propagating under night-time ionosphere. In: *The 6<sup>th</sup> Int. Kharkov Symp. on Phys. and Eng. of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves and Workshop on Terahertz Techn. Symp. (MSMW'07)*. Proc. Kharkov, Ukraine, 25–30 June 2007. Kharkiv, IRE NAS of Ukraine Publ. Vol. 2, pp. 763–765.

10. Ryabov, B.S., 1994. Tweek formation peculiarities. *Geomagn. Aeronomy*, **34**(1), pp. 60–66.
11. Wait, J.R., 1962. *Electromagnetic Waves in Stratified Media*. Oxford, New York: Pergamon Press.
12. Reeve, C.D., Rycroft, M.J., 1972. The eclipsed lower ionosphere as investigated by natural very low frequency radio signals. *J. Atmos. Terr. Phys.* **34**(4), pp. 667–672. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(72\)90154-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(72)90154-7).

Received 31.01.2019

*Yu. V. Gorishnya*

O.Ya. Usikov IRE of NASU  
12, Acad. Proskura St., Kharkiv, 61085, Ukraine

#### POLARISATION OF NIGHT-TIME ELF–VLF ATMOSPHERICS AS STATISTICALLY APPROACHED

**Subject and Purpose.** The tweek-atmospherics (night-time low-frequency atmospheric) are used, along with the radioscopes by VLF radio stations, for studying the lower ionosphere. The available analytical theory regarding polarization of these atmospheric predicts that the left elliptical polarization is a characteristic feature of tweek-atmospherics in their “tail” section, which is supported by the previous experimental measurements. According to the theory, the horizontal geomagnetic field component in the reflection layer of the lower ionosphere can lead to non-reciprocity of the “east–west” and “west–east” propagation. The study aim is to determine the polarization of the tweek-atmospherics by three-component records and statistically estimate the null hypothesis regarding two polarization parameters of tweek-atmospherics.

**Methods and Methodology.** An array of about 300 experimental tweek-atmospheric records is available, which is large enough to secure statistical processing and enables studying polarization of various sections of time waveforms of atmospheric.

**Results.** For the first (fundamental) harmonic, the two polarization characteristics (polarization ratio and phase difference) of tweek-atmospherics were obtained and analyzed depending on the parameter identical to the incidence angle. A difference has been found in polarization ratio values of near-equatorial tweek-atmospherics and tweek-atmospherics propagating outside the geomagnetic equator area, where the quasi-longitudinal wave propagation with reference to the geomagnetic field takes place.

**Conclusion.** The non-reciprocity of the tweek-atmospheric propagation in the “east–west” and “west–east” directions with respect to the geomagnetic field shows itself in statistical terms as significant variations in the phase difference at the incidence angles within 40...60°.

**Key words:** extra low frequencies, very low frequencies, lower ionosphere diagnostics, ELF–VLF radio waves, tweek-atmospherics, lightning location.

*Ю.В. Горішня*

ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України  
12, вул. Акад. Проскури, Харків, 61085, Україна

#### ПОЛЯРИЗАЦІЯ НОЧНИХ СНЧ–ОНЧ АТМОСФЕРИКІВ: СПРОБА ВЖИТКУ КРИТЕРІЇВ СТАТИСТИКИ

**Предмет і мета роботи.** Твік-атмосферики (нічні низькочастотні атмосферики), поряд із радіопровідуванням хвилями радіостанцій дуже низьких частот (ДНЧ), використовуються для вивчення нижньої іоносфери. Передбачення наявної аналітичної теорії щодо поляризації таких атмосфериків і накопичений експериментальний матеріал описують ліву еліптичну поляризацію як характерну ознаку твік-атмосфериків в їх «хвостовій» частині. Наявність горизонтальної складової геомагнітного поля в області віддзеркалення твік-атмосфериків у нижній іоносфері повинна призводити в рамках теорії до невзаємності поширення у напрямках «схід–захід» та «захід–схід». Мета роботи полягала в тому, щоб визначити поляризацію твік-атмосфериків за трикомпонентними записами та статистично оцінити нульову гіпотезу щодо двох поляризаційних параметрів твік-атмосфериків.

**Методи і методологія роботи.** На матеріалі масиву експериментальних записів, що містить близько 300 твік-атмосфериків і є досить великим для статистичної обробки, вивчалася поляризація для різних ділянок часової форми атмосфериків.

**Результати роботи.** Були визначені та проаналізовані для першої (фундаментальної) гармоніки дві характеристики поляризації твік-атмосфериків, поляризаційне відношення і різниця фаз, в залежності від параметра, тотожного куту падіння випромінювання. Виявлено відмінність між поляризаційними відношеннями стосовно даних для навколоекваторіальних трас поширення твік-атмосфериків і для твік-атмосфериків, що поширюються поза областю геомагнітного екватора, де виконується умова квазіпоздовжнього поширення випромінювання щодо геомагнітного поля.

**Висновок.** Показано, що невзаємність поширення твік-атмосфериків у напрямках «схід–захід» і «захід–схід» щодо геомагнітного меридіана виявляється статистично як значущі відмінності у величинах різниці фаз при кутах падіння випромінювання 40...60°, які мають місце між головною частиною та тілом твік-атмосфериків.

**Ключові слова:** наднизькі частоти (ННЧ), дуже низькі частоти (ДНЧ), твік-атмосферики, ННЧ–ДНЧ радіохвилі, діагностика нижньої іоносфери, локація блискавок.