

А. В. Швець, А. П. Кривонос*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: alexander_shvets@ukr.net***ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ТВИК-АТМОСФЕРИКОВ**

Высотный диапазон и низкая концентрация заряженных частиц в нижней ионосфере ограничивают возможности ее исследования с применением радиозондов, аэростатов, ракет, спутников. Для исследований нижней ионосферы в данной работе используются твик-атмосферики (твики) – СНЧ–ОНЧ-радиоволны, возбуждаемые разрядами молний в волноводе Земля–ионосфера. Авторами предложен метод автоматической идентификации и анализа этих явлений. На основе анализа твиков, зарегистрированных в августе 2014 г., исследована связь регулярных вариаций высоты ионосферы с изменением солнечного зенитного угла, который определяет основной источник ионизации – излучение геокороны в ночное время. Показано, что при увеличении высоты нижней границы ионосферы увеличивается поток твиков, что связано с уменьшением потерь в ионосфере. Обнаружен эффект подъема нижней границы ионосферы во время геомагнитной бури умеренной интенсивности. Таким образом, в работе продемонстрированы диагностические возможности предложенного метода, который позволяет проводить локацию грозовых очагов и выявлять вариации высоты волновода Земля–ионосфера вдоль трасс распространения ОНЧ-радиоволн, возбуждаемых разрядами молний из различных очагов. Ил. 6. Библиогр.: 32 назв.

Ключевые слова: локация молний, нижняя ионосфера, СНЧ–ОНЧ-радиоволны, твик-атмосферик, волновод Земля–ионосфера, геокорона, магнитная буря.

В настоящее время наименее изученной является нижняя ионосфера, высотный диапазон и низкая концентрация заряженных частиц в которой ограничивают возможности ее изучения с применением радиозондов, аэростатов, ракет, спутников. Для исследований ионосферы на высотах 60...100 км с низкой концентрацией электронов ($1...1\ 000\ \text{см}^{-3}$) традиционно используется метод радиопросвечивания полости Земля–ионосфера электромагнитными волнами в диапазонах сверхнизких частот (СНЧ, 3...3 000 Гц) и очень низких частот (ОНЧ, 3...30 кГц). Источниками зондирующего излучения служат радиопередатчики навигационных и связных систем. В ОНЧ-диапазоне на трассах длиной менее 3 000 км за счет уменьшения затухания в ионосфере в ночное время, кроме основной нормальной волны (моды), значительный вклад в поле вносят волны высших типов. Это обстоятельство существенно затрудняет решение обратной задачи определения параметров ионосферной границы по сигналам узкополосных радиостанций [1].

В последнее время возобновляется интерес к использованию «бесплатных» источников СНЧ–ОНЧ-излучения – разрядов молний для исследования нижней ионосферы, о чем свидетельствует рост количества публикаций, посвященных данной тематике [2–15].

Особый интерес в качестве средства диагностики представляют твик-атмосферики (твики) [16] – электромагнитные волны звуковых частот, которые являются откликом волновода Земля–ионосфера на импульсное возбуждение разрядами молний. Благодаря слабому затуханию в ионосфере в ночное время, в спектре таких сиг-

налов появляются составляющие вблизи частот отсечки волновода Земля–ионосфера. Твики распространяются на расстояния, достигающие нескольких тысяч километров, и несут информацию о свойствах нижней ионосферы вдоль пути распространения между молнией и наблюдателем.

Анализ твиков позволяет получать оценки дальности до молнии, определять среднюю эффективную высоту волновода вдоль трассы распространения твика. Традиционно такая задача решается путем измерения временной задержки между волнами разных частот, относящихся к одному и тому же твику, которая возникает из-за частотной дисперсии в волноводе [10]. В «харьковском» методе [18, 19] используется фазовый спектр продольной составляющей магнитного поля твика. Эта составляющая поля в диапазоне между частотами отсечки нормальных волн 1-го и 2-го порядков формируется единственной нормальной волной 1-го порядка, а ее фазовый спектр определяется высотой и дальностью. Для получения географических координат разрядов молний методы определения дальности сочетаются с методикой пеленгования, например, основанной на измерении вектора Умова–Пойнтинга [20], которая требует измерения двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент на поверхности Земли.

Для повышения надежности получаемых оценок высоты нижней ионосферы и выявления эффектов воздействия на нее явлений различной природы нами была разработана методика автоматической идентификации и анализа твиков, позволяющая проводить мониторинг в режиме реального времени [21].

В данной работе представлены предварительные результаты обработки атмосфериков, зарегистрированных в течение 16-ти суток в августе 2014 г., с целью оценки диагностических возможностей предложенного нами метода автоматической идентификации и анализа твиков.

1. Аппаратура и программное обеспечение для регистрации твиков. Для записи атмосфериков был создан аппаратно-программный комплекс [22]. Он включает в себя датчики трех компонент электромагнитного поля, аналоговую часть, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и программное обеспечение для предварительной обработки и записи сигналов. В качестве датчиков поля используются две воздушные экранированные магнитные рамки для приема двух горизонтальных взаимно ортогональных магнитных компонент и стержневая емкостная антенна для приема вертикальной электрической компоненты. Аналоговая часть включает антенные усилители, которые обеспечивают плоскую частотную характеристику в полосе частот от 300 Гц до 20 кГц, а также основные усилители, предназначенные для согласования сигналов с выходов антенных усилителей и соединительного кабеля длиной 30 м со входами АЦП. В качестве АЦП используется четырехканальная звуковая карта МАУА44. Она работает на частоте дискретизации 48 кГц.

В течение 2014–2015 гг. были проведены серии регистрации атмосфериков. Антенны были установлены на крыше здания Института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины (г. Харьков, 50,046300° с. ш., 36,290668° в. д.) и ориентированы в географических направлениях юг–север и запад–восток. Измерительный комплекс работал в круглосуточном режиме.

2. Методика обработки твиков. Твики можно легко идентифицировать визуально по волновой форме или спектрограмме, или при прослушивании сигнала через громкоговоритель. В то время как типичные спектры атмосфериков в дневное время имеют широкий минимум в диапазоне частот от 1 до 4 кГц, спектральные компоненты вблизи частот отсечки волновода Земли-ионосфера появляются в твиках. Сильная частотная дисперсия, наблюдаемая в сигнале твика, связана с резким уменьшением групповой скорости распространения радиоволн в волноводе Земли-ионосфера, когда частота сигнала приближается к частоте отсечки волновода. Из-за сильной частотной дисперсии вблизи частот отсечки в спектрограммах твиков наблюдаются специфические L-образные структуры с короткой «вертикальной» частью и «почти горизонтальной» частью длительностью 10...100 мс.

В зависимости от дальности до источника и потерь, главным образом в ионосфере, «го-

ризонгальная» часть твика содержит от одной до восьми-десяти гармоник, которые соответствуют волновым модам основного и более высокого порядков [16].

Пример зарегистрированной волновой формы поперечной магнитной компоненты твика с предысторией (время t отсчитывается от начала записи) приведен на рис. 1, а. Спектрограмма данного твика (время τ отсчитывается от момента прихода сигнала в пункт наблюдения) представлена на рис. 1, б.

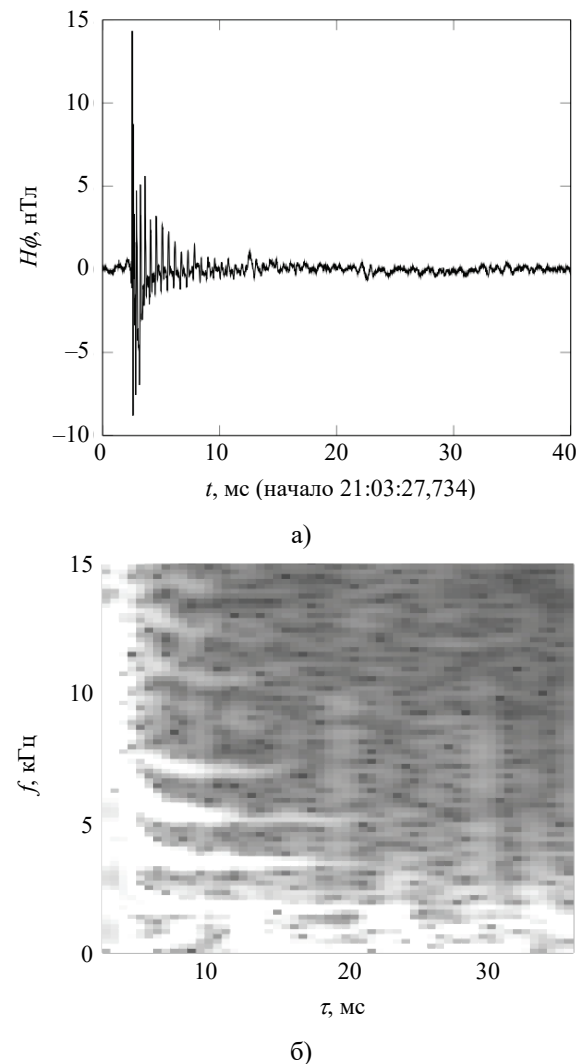


Рис. 1. Волновая форма (а), спектрограмма (б) твика, зарегистрированного 18 августа 2014 г.

Положения спектральных пиков, определенных по спектрограмме твика (рис. 1, б), приведены на рис. 2. На графике кружками обозначены пики, группирующиеся в отдельные гармоники, частота которых уменьшается со временем, а также пики, соответствующие шумовой компоненте в сигнале.

Зависимость мгновенной частоты в гармонике твика от времени в модели бесконечного плоского волновода с идеально проводящими стенками определяется следующим образом:

$$f_n(\tau) = \frac{f_{cn}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{\rho + c\tau}\right)^2}}, \quad (1)$$

где n – номер моды; f_{cn} – частота отсечки n -й моды; ρ – дальность до молнии; τ – время относительно начала твика.

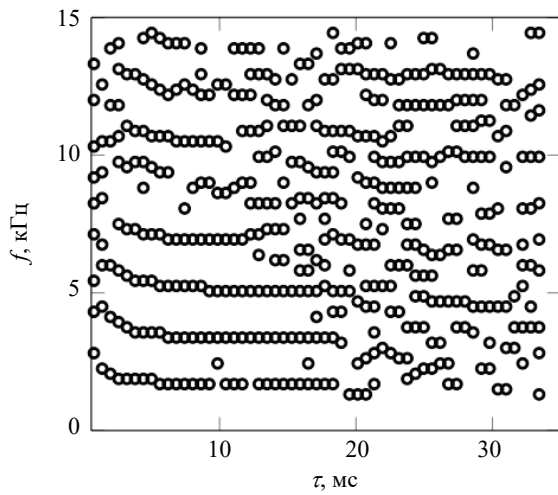


Рис. 2. Положения спектральных пиков, определенных по спектрограмме твика (рис. 1)

Для оценки дальности до разряда молнии и частот отсечки волноводных мод используем метод, предложенный в работах [13–15]. С этой целью пересчитаем частоты спектральных пиков (рис. 2), инвертируя формулу (1) относительно f_{cn} :

$$f_c(\tau) = f(\tau) \sqrt{1 - \left(\frac{\rho}{\rho + c\tau}\right)^2}. \quad (2)$$

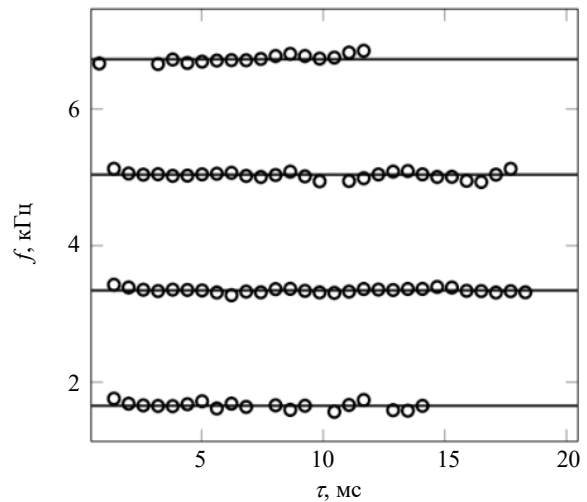
Здесь $f(\tau)$ – измеренные положения спектральных пиков на спектрограмме. Очевидно, что если дальность ρ близка к истинному значению, пересчитанные частоты $f_c(\tau)$ в (2), соответствующие гармоникам твика, будут сгруппированы в окрестности горизонтальных линий, положения которых соответствуют частотам отсечки волновода. Результат такой операции после фильтрации шумовой компоненты показан на рис. 3, а.

Здесь компенсация частотной дисперсии гармоник твика была достигнута при дальности до молнии $\rho = 750$ км.

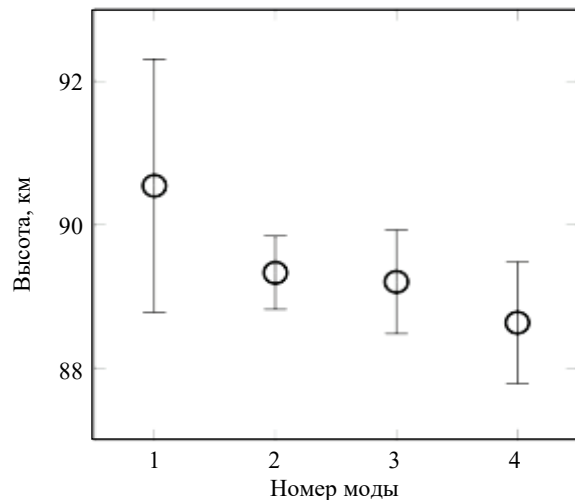
Оценки частот отсечки получаются усреднением по точкам для всех обнаруженных гармоник одновременно с определением дальности.

Соответствующие различным модам эффективные высоты волновода $h = nc / 2f_c$ (кружки с планками погрешностей) показаны на рис. 3, б.

В данном исследовании используется разработанный в соответствии с описанной выше методикой алгоритм автоматической идентификации и анализа твиков [21].



а)



б)

Рис. 3. Выделенные гармоники твика (а) и соответствующие эффективные высоты волновода для первых четырех мод (б), полученные с применением разработанной автоматической процедуры анализа

3. Локация грозных очагов и вариации высоты ионосферы. Предложенный автоматический метод апробирован на реальных данных, полученных в ночь с 18 на 19 августа 2014 г. при высокой грозовой активности в Европе. Для исследований был выбран период от заката до восхода солнца в точке наблюдения, когда обычно наблюдаются твики.

На карте (рис. 4) положения ударов молний, определенных по твикам, нанесены точками; пункт наблюдения в Харькове обозначен звездочкой. Линии сетки показаны пунктирными линиями. Шаг сетки по азимуту составляет 30° , по дальности – 500 км, с центром в точке наблюдения.

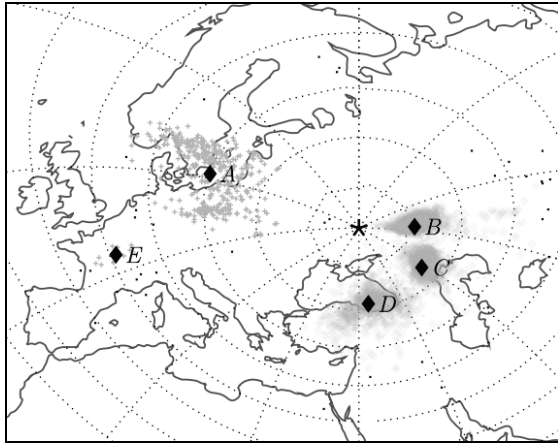


Рис. 4. Распределение молний, определенное по твикам, зарегистрированным в ночное время 18–19 августа 2014 г.

Алгоритм кластеризации *DBSCAN* [23] применялся для выделения грозовых очагов в соответствии с данными локации по твикам. Результат кластеризации показан на рис. 4, где буквами *A–E* обозначены выделенные очаги. Общее количество зарегистрированных твиков соответственно по очагам составляет: *A* – 379, *B* – 2 035, *C* – 1 053, *D* – 1 105, *E* – 10. На карте ромбами обозначены «центры тяжести» данных очагов.

Вариации высоты ионосферы, определенные для кластеров *A–D* на рис. 4, показаны на рис. 5. Высоты, определенные для каждого твика (точки), и часовые медианные значения высоты с планками погрешностей приведены на каждом графике.

Среднее за ночь значение высоты для каждого очага показано горизонтальной линией. Буквенные обозначения на графиках соответствуют маркировке грозовых очагов на рис. 4.

На графиках рис. 5 видно ступенчатое увеличение высоты приблизительно на 1...2 км вблизи локальной полуночи (21,35 мирового времени), а вариации слегка меняются для ближайших кластеров *B–D*.

Вариация высоты для кластера *A* демонстрирует совершенно другое поведение, она имеет широкий максимум вокруг локальной полуночи. Найденная разница в вариациях высоты для разных очагов, вероятно, связана с динамикой локальных неоднородностей ионосферы.

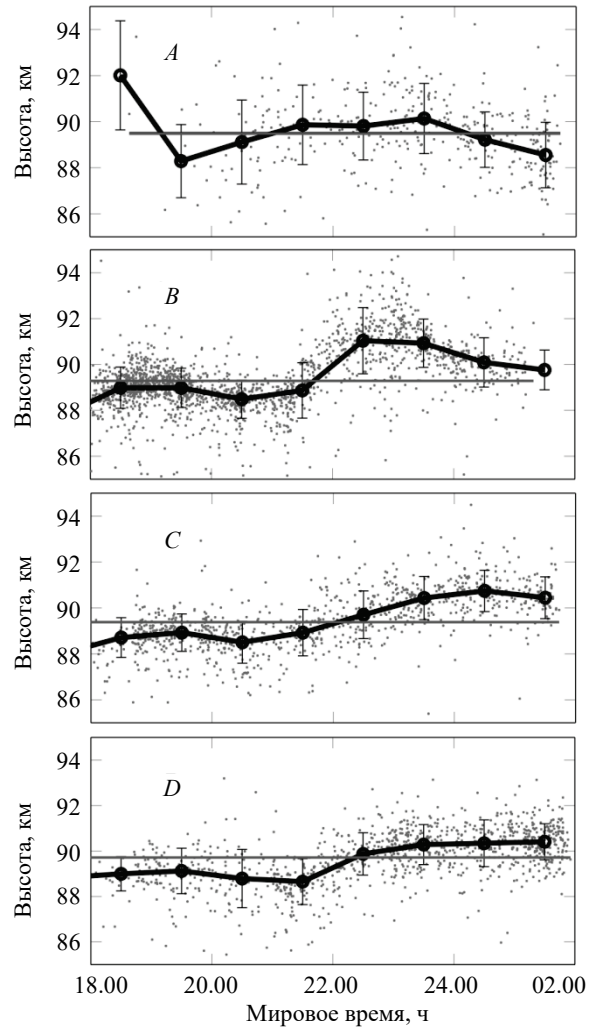


Рис. 5. Вариации высоты нижней ионосферы, определенные по твикам, для грозовых очагов *A–D* (рис. 4)

4. Связь вариаций высоты ионосферы и солнечного зенитного угла. Основным источником земной ионосферы является ионизирующее излучение Солнца, поэтому солнечная активность изменяет ионосферную плазму и влияет на характеристики распространения радиоволн в широком диапазоне частот. Механизмы воздействия Солнца на ионосферу разнообразны и сложны. Жесткая электромагнитная радиация ионизирует воздух и создает на освещенной стороне Земли сравнительно плотную плазму. Ионосфера продолжает существовать и на ночной стороне планеты. Механизмы формирования ночной ионосферы мало изучены. Основными источниками, поддерживающими ионизацию, считаются рассеянное в геокороне излучение на линиях Лайман-альфа (ионизация молекул NO) и Лайман-бета (ионизация молекул O_2). Сопоставимым по скорости образования ионов источником на высотах нижней ионосферы считаются галактические космические лучи [1].

Высота отражения ОНЧ-радиоволн от ионосферы, измеренная на основе анализа излучения разрядов молний, демонстрирует различные зависимости от локального времени в течение ночи (рис. 5). Существенные различия вариаций высоты от ночи к ночи отмечались в работе [3]. По-видимому, это явление связано с динамикой неоднородностей в нижней ионосфере на трассе распространения между молниями и наблюдателем.

Для выявления регулярной компоненты в вариациях высоты нижней границы ионосферы использовалось усреднение в течение месяца или сезона. В работах [12, 16] по результатам анализа твиков, зарегистрированных в приэкваториальных районах, был отмечен рост высоты нижней ионосферы от момента захода Солнца до полуночи в пункте наблюдения приблизительно на 3 км. После полуночи разброс оценок высоты увеличился, перекрывая почти весь диапазон первоначального тренда в летний период. В период равенства положительный тренд, однако с меньшей крутизной нарастания, продолжался и после полуночи. Похожее поведение показывает анализ данных измерений твиков в низких широтах [7, 9, 11]. В работе [8] суточный тренд высоты нижней ионосферы по измерениям твиков не наблюдался.

В данной работе проанализированы записи 300 078 атмосфериков, зарегистрированных в ночное время за 16 суток с 8-го по 26-е августа 2014 г. Из общего количества 38 375 атмосфериков были идентифицированы как твики, и для каждого твика были определены географические координаты молнии и высота волновода вдоль соответствующего пути распространения. На рис. 6, а представлены высоты, определенные по твикам, зарегистрированным в течение данного периода измерений. Точки на графике соответствуют отдельным твикам, а их положение вдоль горизонтальной оси определяет момент регистрации на суточном масштабе времени. Из анализа была исключена незначительная часть твиков, для которых автоматическая процедура обработки определяла дальность менее 200 и более 5 000 км, а также высоты менее 85 и более 95 км. Такие параметры, как правило, соответствуют ложным срабатываниям автоматической процедуры вследствие помех в сигнале. В результате данной фильтрации из 38 375 твиков осталось 34 609. Кружки с вертикальными планками погрешностей показывают средние значения высоты и среднеквадратические отклонения за получасовые интервалы в течение ночи.

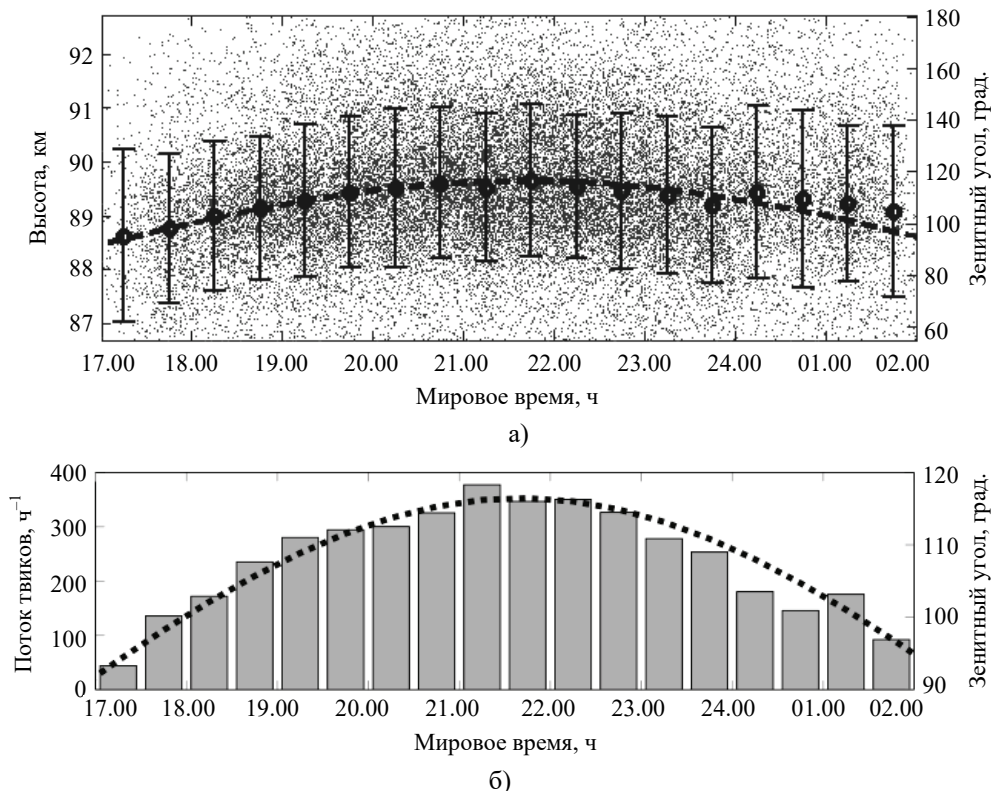


Рис. 6. Средние изменения высоты отражения твиков от ионосферы в течение ночи показаны медианными получасовыми значениями (кружки) с планками погрешностей, построенными относительно оси ординат слева (а). (Высоты для каждого из 34 600 твиков, зарегистрированных за 16 суток с 8-го по 26-е августа 2014 г., показаны точками.) Средние изменения потока твиков в течение ночи (б). Штриховая линия, построенная относительно правой оси ординат на обоих графиках, представляет вариацию солнечного зенитного угла в пункте наблюдения (г. Харьков) и рассчитана для середины интервала измерений (17 августа 2014 г.)

На графике (рис. 6, а) штриховой линией относительно правой вертикальной оси построена также зависимость солнечного зенитного угла от времени, рассчитанная для пункта наблюдения в Харькове для 17-го августа – середины интервала измерений. Можно отметить достаточно хорошую корреляцию средних изменений высоты с величиной солнечного зенитного угла, что, по-видимому, связано с механизмом ионизации ночной ионосферы через излучение геокороны. Можно также отметить, что пропорциональность сохраняется в период от захода Солнца до локальной полуночи в пункте наблюдения (21,35 мирового времени). После полуночи рассогласование постепенно увеличивается, достигая максимальной величины в предутренние часы, когда также увеличивается дисперсия оценок высоты.

Исследовались также средние вариации потока твиков в течение ночи за соответствующий период. На рис. 6, б приведена зависимость потока твиков от времени суток. Пунктирной линией показано расчетное изменение солнечного зенитного угла. Как и в предыдущем случае, можно видеть его достаточно хорошее соответствие изменению потока твиков, что объясняется улучшением условий распространения в волноводе Земля–ионосфера. Данный факт, по-видимому, связан с тем, что с увеличением высоты

отражения ОНЧ-радиоволн снижаются потери в ионосфере за счет уменьшения частоты столкновений свободных электронов с нейтральными частицами на больших высотах и формируются более благоприятные условия для формирования твиков.

5. Эффект геомагнитной бури в вариациях высоты ионосферы по результатам анализа твиков. В течение анализируемого интервала времени 19–20 августа 2014 г. наблюдалась геомагнитная буря умеренной интенсивности, Kp -индекс геомагнитной активности 4, характеризующаяся внезапным началом (*World Data Center for Geomagnetism Kyoto*, [24]). Для обнаружения возможного влияния данного возмущения на нижнюю ионосферу мы сравнили результаты анализа твиков с ap -индексом. На рис. 7, а представлены высоты, определенные для каждого твика (точки), и среднесуточные значения (кружки) с соответствующими планками погрешностей за период 8–26 августа 2014 г. В ночь 19–20 августа наблюдалось увеличение эффективной высоты волновода в среднем приблизительно на 2...2,5 км. Соответствующие изменения ap -индекса представлены на рис. 7, б, где мы видим совпадение моментов усиления планетарной геомагнитной активности и эффекта повышения высоты по результату анализа твиков.

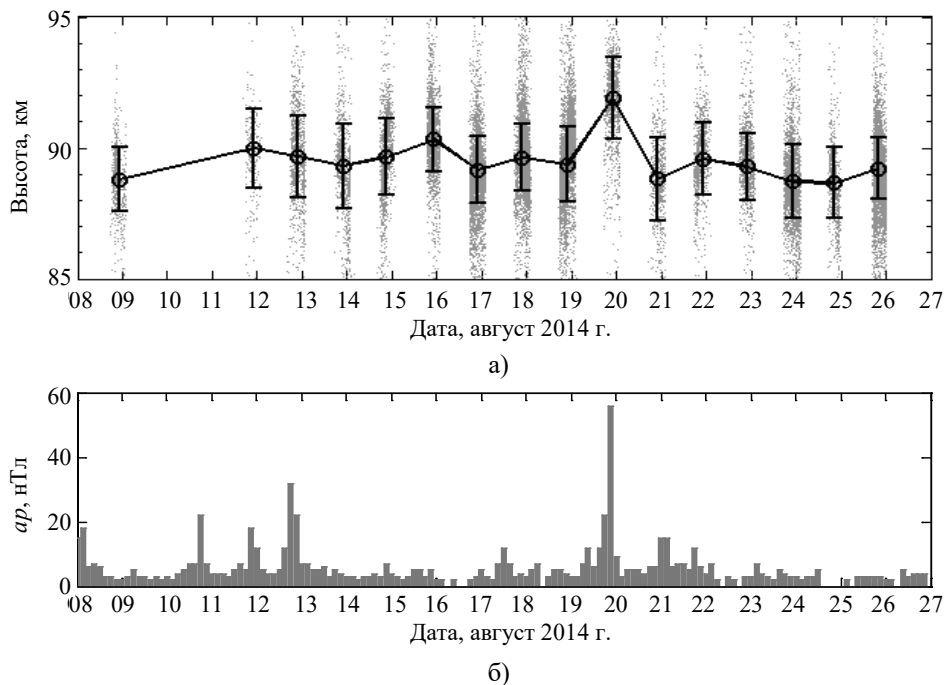


Рис. 7. Вариации высоты волновода Земля–ионосфера по результатам анализа твиков, зарегистрированных 8–26 августа 2014 г. (а) и вариации планетарного ap -индекса геомагнитной активности за тот же период по данным [24] (б)

В работе [25] была обнаружена статистическая связь пиковой частоты первой моды твиков с геомагнитной активностью. Так, было пока-

зано, что пиковая частота твиков увеличивается приблизительно на 150 Гц при увеличении локального K -индекса геомагнитной активности

с 2-х до 5-ти. Авторы связывают данный эффект с увеличением ионизации нижних слоев ионосферы при усилении геомагнитной активности и соответствующем снижении высоты нижней границы волновода.

По сравнению с работой [25] фактически мы имеем противоположный результат – в нашем случае усиление геомагнитного возмущения приводит к увеличению высоты области отражения ОНЧ-радиоволн. В то же время результаты анализа многолетних записей твиков [11] демонстрируют положительную корреляцию вариаций высоты отражения твиков и солнечной активности в рамках 11-летнего цикла.

Вспышка на Солнце приводит к выбросу солнечной массы и повышению скорости солнечного ветра. Этот фактор снижает уровень галактического фона и ионизацию на ночной стороне Земли, что обнаруживается как ослабление или исчезновение слоя С ионосферы. Явление «выметания» солнечным ветром галактического фона из Солнечной системы называют Форбуш-понижением [26, 27]. Таким образом, одна и та же солнечная вспышка может снизить дневную ионосферу благодаря возрастанию потока жестких квантов и одновременно приподнять нижнюю границу плазмы на ночной стороне планеты благодаря Форбуш-понижению ионизации галактическими космическими лучами.

За счет Форбуш-понижения можно было бы объяснить эффект увеличения высоты волновода, наблюдаемый в нашем случае. Однако, по данным измерений наземных нейтронных мониторов, регистрирующих интенсивность галактических космических лучей, за анализируемый период данный эффект не наблюдался. Таким образом, для объяснения наблюдаемой положительной корреляции изменений высоты волновода и геомагнитной активности требуется дополнительный анализ и уточнение механизмов солнечно-земных связей.

Выводы. В работе приведены результаты анализа твик-атмосфериков, зарегистрированных в течение августа 2014 г. Для обработки применялся метод автоматической идентификации и анализа, разработанный авторами. Продемонстрированы диагностические возможности предложенного метода, который позволяет проводить локацию грозových очагов и выявлять вариации высоты волновода Земля–ионосфера вдоль трасс распространения ОНЧ-радиоволн, возбуждаемых разрядами молний из различных очагов. Исследована связь регулярных вариаций высоты ионосферы с изменением солнечного зенитного угла, который определяет основной источник ионизации – излучение геокороны в ночное время. Показано, что при увеличении высоты нижней границы ионосферы увеличивается поток твиков,

что связано с уменьшением потерь в ионосфере. Обнаружен эффект подъема нижней границы ионосферы во время геомагнитной бури умеренной интенсивности 19–20 августа 2014 г., сопровождавшейся внезапным началом.

Применение алгоритма кластеризации позволило определить изменения эффективной высоты нижней ионосферы вдоль различных трасс распространения, что представляется полезным для изучения динамики ионосферных неоднородностей как во времени, так и в пространстве.

Библиографический список

1. Thomson N. R., Clilverd M. A., McRae W. M. Nighttime ionospheric D region parameters from VLF amplitude and phase. *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, Iss. A7. A07304 (14 p.). DOI:10.1029/2007JA012271
2. Cummer S. A., Inan U. S., Bell T. F. Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics. *Radio Science.* 1998. Vol. 33, N 6. P. 1781–1792.
3. Han F., Cummer S. A. Midlatitude nighttime D region ionosphere variability on hourly to monthly time scales. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 115, Iss. A10. A09323 (12 p.).
4. Cheng Z., Cummer S. A. Broadband VLF measurements of lightning-induced ionospheric perturbations. *Geophys. Res. Lett.* 2005. Vol. 32, Iss. 8. L08804 (4 p.).
5. Cheng Z., Cummer S. A., Su H.-T., Hsu R.-R. Broadband very low frequency measurement of D region ionospheric perturbations caused by lightning electromagnetic pulses, *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112, Iss. A6. A06318 (8 p.).
6. Shao X.-M., Lay E.H., Jacobson A.R. Reduction of electron density in the night-time lower ionosphere in response to a thunderstorm, *Nature Geoscience.* 2013. Vol. 6. P. 29–33.
7. Maurya A. K., Veenadhari B., Singh R, Kumar S., Cohen M. B., Selvakumaran R., Gokani S., Pant P., Singh A. K., Inan U. S. Nighttime D region electron density measurements from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, Iss. A11. A11308 (13 p.). DOI:10.1029/2012JA017876
8. Tan L. M. Investigation of the morphology and Wait's parameter variations of the low-latitude D region ionosphere using the multiple harmonics of tweeks. *Adv. in Space Res.* 2016. Vol. 57, Iss. 12. P. 2444–2451. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.030>
9. Kumar S., Kishore A., Ramachandran V. Higher harmonic tweek sferics observed at low latitude: estimation of VLF reflection heights and tweek propagation distance. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26. P. 1451–1459.
10. Ohya H., Shiokawa K., Miyoshi Y. Development of an automatic procedure to estimate the reflection height of tweek atmospherics. *Earth Planets Space.* 2008. Vol. 60, Iss. 8. P. 837–843.
11. Ohya H., Shiokawa K., Miyoshi Y. Long-term variations in tweek reflection height in the D and lower E regions of the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116, Iss. A10. A10322 (13 p.). DOI:10.1029/2011JA016800
12. Швец А. В., Горишня Я. В. Метод локации молний и оценки параметров нижней ионосферы с помощью твик-атмосфериков. *Радиофизика и электроника.* 2010. Т. 1(15), № 2. С. 63–70.
13. Швец А. В., Кривонос А. П., Сердюк Т. Н., Горишня Я. В. Обратная задача восстановления параметров волновода Земля–ионосфера, возбуждаемого разрядом молнии. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил.* 2013. Вип. 3(36). С. 84–90.
14. Швец А. В., Сердюк Т. Н., Кривонос А. П., Горишня Я. В. Оценка параметров профиля проводимости нижней ионо-

- сферы на основе анализа твек-атмосфериков. *Радиофизика и электроника*. 2015. Т. 6(20), № 1. С. 40–47.
15. Shvets A. V., Serdiuk T. M., Gorishnyaya Y. V., Hobara Y., Hayakawa M. Estimating the lower ionosphere height and lightning location using multimode "tweek"-atmospherics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2014. Vol. 108. P. 1–9.
 16. Горишняя Ю. В. Оценка концентрации электронов и высоты нижней границы ионосферы по данным анализа многомодовых твек-атмосфериков. *Радиофизика и электроника*. 2014. Т. 5(19), № 1. С. 20–28.
 17. Burton E. T., Boardman E. M. Audio-frequency atmospherics. *Proc. IRE*. 1933. Vol. 21. P. 1476–1494.
 18. Rafalsky V. A., Shvets A. V., Hayakawa M. One-site distance-finding technique for locating lightning discharges. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. Vol. 57, N 11. P. 1255–1261.
 19. Brundell J. B., Rodger C. J., Dowden R. L. Validation of single station lightning location technique. *Radio Sci.* 2002. Vol. 37, N 4. P. 1059–1067.
 20. Rafalsky V. A., Nickolaenko A. P., Shvets A. V., Hayakawa M. Location of lightning discharges from a single station. *J. Geophys. Res.* 1995. Vol. 100, ND10. P. 20,829–20,838.
 21. Shvets A. V., Krivonos A. P., Serdiuk T. N., Hayakawa M. A Technique for Automatic Monitoring the Lower Ionosphere and Lightning Location by Tweek-Atmospherics. *Int. J. Electronics and Applied Res. (IJEAR)*. 2017. Vol. 4, N 1. Accepted to be published.
 22. Швец А. В., Кривonos А. П., Иванов В. К. Комплекс для многокомпонентных измерений СНЧ–ОНЧ электромагнитных полей. *Радиофизика и электроника*. 2016. Т. 7(21), № 4. С. 49–55.
 23. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *KDD-96 Proc. of 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining* (Portland, Oregon, August 02–04, 1996) 1996. P. 226–231.
 24. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. URL: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
 25. Yedemsky D. Ye., Ryabov B. S., Shchokotov A. Yu., Yarotsky V. S. Experimental investigation of the tweek field structure. *Adv. Space Res.* 1992. Vol. 12, N 6. P. 251–254.
 26. Данилов А. Д. Популярная аэрoномия. Ленинград: Гидрометеoиздат, 1989. 227 с.
 27. Современный методы исследования динамических процессов в ионосфере. Под ред. В. Д. Гусева. Кишинев: Штиинца, 1991. 286 с.
- from ELF-VLF tweek radio atmospherics recorded at low latitudes. *J. Geophys. Res.*, **117**(A11), A11308 (13 p.). DOI:10.1029/2012JA017876
8. Tan, L. M., 2016. Investigation of the morphology and Wait's parameter variations of the low-latitude D region ionosphere using the multiple harmonics of tweeks. *Adv. in Space Res.* [online], **57**(12), pp. 2444–2451. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.030>
 9. Kumar, S., Kishore, A., Ramachandran, V., 2008. Higher harmonic tweek sferics observed at low latitude: estimation of VLF reflection heights and tweek propagation distance. *Ann. Geophys.*, **26**, pp. 1451–1459.
 10. Ohya, H., Shiokawa, K., Miyoshi, Y., 2008. Development of an automatic procedure to estimate the reflection height of tweek atmospherics. *Earth Planets Space*, **60**(8), pp. 837–843.
 11. Ohya, H., Shiokawa, K., Miyoshi, Y., 2011. Long-term variations in tweek reflection height in the D and lower E regions of the ionosphere. *J. Geophys. Res.*, **116**(A10), A10322 (13 p.). DOI:10.1029/2011JA016800
 12. Shvets, A. V., Gorishnyaya, Y. V., 2010. A technique for lightning location and estimation of the lower ionosphere parameters using tweek-atmospherics. *Radiofizika i elektronika*. **1**(15)(2), pp. 63–70 (in Russian).
 13. Shvets, A. V., Krivonos, A. P., Serdiuk, T. N., Gorishnyaya, Y. V., 2013. An inverse problem of recovering parameters of the Earth-ionosphere waveguide excited by a lightning discharge. *Zbirnik naukovykh prats' Kharkivskogo universitetu Povitrianykh sil*, **3**(36), pp. 84–90 (in Russian).
 14. Shvets, A. V., Serdiuk, T. N., Krivonos, A. P., Gorishnyaya, Y. V., 2015. Evaluating parameters of conductivity profile of the lower ionosphere by tweek-atmospherics. *Radiofizika i elektronika*, **6**(20)(1), pp. 40–47 (in Russian).
 15. Shvets, A. V., Serdiuk, T. M., Gorishnyaya, Y. V., Hobara, Y., Hayakawa, M., 2014. Estimating the lower ionosphere height and lightning location using multimode "tweek"-atmospherics. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, **108**, pp. 1–9.
 16. Gorishnyaya, Y. V., 2014. Electron density and lower ionosphere height estimations by results of analysis of multimodal tweek-atmospherics. *Radiofizika i elektronika*, **5**(19)(1), pp. 20–28 (in Russian).
 17. Burton, E. T., Boardman, E. M., 1933. Audio-frequency atmospherics. *Proc. IRE*, **21**, pp. 1476–1494.
 18. Rafalsky, V. A., Shvets, A. V., Hayakawa, M., 1995. One-site distance-finding technique for locating lightning discharges. *J. Atmos. Terr. Phys.*, **57**(11), pp. 1255–1261.
 19. Brundell, J. B., Rodger, C. J., Dowden, R. L., 2002. Validation of single station lightning location technique. *Radio Sci.*, **37**(4), pp. 1059–1067.
 20. Rafalsky, V. A., Nickolaenko, A. P., Shvets, A. V., Hayakawa, M., 1995. Location of lightning discharges from a single station. *J. Geophys. Res.*, **100**(N D10), pp. 20,829–20,838.
 21. Shvets, A. V., Krivonos, A. P., Serdiuk, T. N., Hayakawa, M., 2017. A Technique for Automatic Monitoring the Lower Ionosphere and Lightning Location by Tweek-Atmospherics. *Int. J. of Electronics and Applied Res. (IJEAR)*, **4**(1). Accepted for publication Accepted to be published.
 22. Shvets, A. V., Krivonos, A. P., Ivanov, V. K., 2016. A complex for multicomponent measurements of ELF–VLF electromagnetic fields. *Radiofizika i elektronika*., **7**(21)(4), pp. 49–55 (in Russian).
 23. Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J., Xu, X., 1996. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. In: *Proc. 2nd Int. Conf. Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. Portland, Oregon, August 02–04, 1996. Pp. 226–231.
 24. World Data Center for Geomagnetism, Kyoto. [online]. Available from: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>
 25. Yedemsky, D. Ye., Ryabov, B. S., Shchokotov, A. Yu., Yarotsky, V. S., 1992. Experimental investigation of the tweek field structure. *Adv. Space Res.*, **12**(6), pp. 251–254.
 26. Данилов, А. Д., 1989. *Popular aeronomy*. Ленинград: Гидрометеoиздат (in Russian).

REFERENCES

27. Gusev, V. D., ed. 1991. *Contemporary methods of studying dynamic processes in ionosphere*. Kishinev: Shtinitsa Publ. (in Russian).

Рукопись поступила 03.07.2017.

A. V. Shvets, A. P. Kryvonos

PRELIMINARY RESULTS OF MONITORING THE LOWER IONOSPHERE BASED ON THE ANALYSIS OF TWEAK-ATMOSPHERICS

At present, the lower ionosphere is the least studied region of the ionosphere. The altitude range and the low concentration of charged particles limit the possibilities of its investigation using radiosondes, balloons, rockets, and satellites. For studies of the lower ionosphere, tweek-atmospherics (tweeks) – ELF–VLF radio waves excited by lightning discharges in the Earth-ionosphere waveguide are used in this work. The authors proposed a method of automatic identification and analysis of tweeks. On the basis of analysis of tweeks recorded in August 2014, the relationship between the regular variations in the height of the ionosphere with the change in the solar zenith angle, which determines the main source of ionization - the radiation of the geocorona at night, was investigated. It is shown that with an increase in the height of the lower boundary of the ionosphere, the rate of tweeks increases, which is associated with a decrease in losses in the ionosphere. The effect of the rise of the lower boundary of the ionosphere during a geomagnetic storm of moderate intensity was detected. Thus, the diagnostic capabilities of the proposed method are demonstrated, which makes it possible to locate thunderstorm foci and to reveal variations in the height of the Earth-ionosphere waveguide along the propagation paths of VLF radio waves excited by lightning discharges from different foci.

Key words: lightning location, lower ionosphere, ELF-VLF radio waves, tweek-atmospherics, Earth-ionosphere waveguide, geocorona, geomagnetic storm.

О. В. Швець, О. П. Кривонос

ПОПЕРЕДНІ РЕЗУЛЬТАТИ МОНІТОРИНГУ НИЖНЬОЇ ІОНОСФЕРИ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ТВІК-АТМОСФЕРИКІВ

Висотний діапазон і низька концентрація заряджених частинок у нижній іоносфері обмежують можливості її дослідження із застосуванням радіозондів, аеростатів, ракет, супутників. Для досліджень нижньої іоносфери у цій роботі використовуються твік-атмосферики (твіки) – ННЧ–ДНЧ-радіохвилі, порушені розрядами блискавок у хвилеводі Земля–іоносфера. Авторами запропонований метод автоматичної ідентифікації та аналізу твіків. На основі аналізу твіків, зареєстрованих у серпні 2014 р., досліджено зв'язок регулярних варіацій висоти іоносфери зі зміною сонячного зенітного кута, який визначає основне джерело іонізації – випромінювання геокорони вночі. Показано, що у разі збільшення висоти нижньої межі іоносфери збільшується потік твіків, що пов'язано зі зменшенням втрат в іоносфері. Виявлено ефект підйому нижньої межі іоносфери під час геомагнітної бурі помірної інтенсивності. Таким чином, у роботі продемонстровані діагностичні можливості запропонованого методу, який дозволяє проводити локацію грозових осередків і виявляти варіації висоти хвилеводу Земля–іоносфера уздовж трас поширення ДНЧ-радіохвиль, порушуваних розрядами блискавок з різних осередків.

Ключові слова: локація блискавок, нижня іоносфера, ННЧ–ДНЧ-радіохвилі, твік-атмосферик, хвилевід Земля–іоносфера, геокорона, магнітна буря.