

УДК 621.391.812.62

Є.О. Меленті

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В ТРОПОСФЕРНОМУ ХВИЛЕВОДІ З ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

В роботі представлені результати розрахунку висотних перерізів електромагнітного поля в тропосферному хвилеводі за допомогою методу криволінійних координат для різних довжин хвиль. Проведено порівняння результатів розрахунків з експериментально отриманими перерізами поля, типовими для Азово-Чорноморського басейну. Порівняльний аналіз експериментальних даних з результатами розрахунку доводить адекватність запропонованого методу. Запропонований метод може бути використаний для дослідження структури поля як на дальності прямої видимості, так і за її межами.

**Ключові слова:** електричний диполь, тропосферний хвилевод, електромагнітне поле.

### Вступ

#### Постановка проблеми та аналіз літератури.

На радіолокацію маловисотних об'єктів над поверхнею моря суттєво впливають умови розповсюдження радіохвиль (РРХ) в нижніх шарах тропосфери [1, 2]. В результаті різкої зміни метеорологічних параметрів (вологості та температури повітря, тиску) виникають аномальні флуктуації вертикального градієнту коефіцієнту заломлення повітря, що призводить до утворення неоднорідностей на трасі РРХ (янгולי-ехо, тропосферні хвилеводи) [2 – 5]. У ряді робіт [3, 4, 6] продемонстрована можливість використання тропосферних хвилеводів (ТХВ) для збільшення дальності виявлення радіолокаційними станціями (РЛС) над морем. Для заживлення ТХВ РЛС приморського базування повинна бути розташована на відстані, що не перевищує 1600 м від берегової лінії. При цьому, для підвищення точнісних характеристик радіотехнічних систем приморського базування необхідно досконало знати просторову структуру поля сигналів ультракоротких хвиль над морем. В роботах [7, 8] наведено експериментально отримані розподіли електромагнітного поля (ЕМП) у вертикальному перерізі над поверхнею моря в межах прямої видимості. Однак, для проектування РЛС, в яких з метою збільшення дальності виявлення використовується явище ТХВ, необхідно мати відповідний математичний апарат, з допомогою якого можна проводити розрахунки ЕМП на всій трасі РРХ.

В роботах [9, 10] запропоновано електродинамічний метод розрахунку ЕМП (метод криволінійних координат), що дозволяє дослідити структуру поля в ТХВ на всій трасі РРХ (як на дальності прямої видимості (ДПВ) так і за її межами).

Даний метод враховує сферичність Землі, електричні параметри середовища РРХ та поляризацію антени. Однак, необхідно підтвердити адекватність запропонованого методу.

В даній статті проведено порівняльний аналіз отриманих експериментально та розрахованих з допомогою запропонованого методу висотних перерізів ЕМП над морською поверхнею.

**Метою статті** є обґрунтування використання методу криволінійних координат для дослідження структури поля в межах ТХВ над морем.

### Основна частина

В 60 – 70-х роках минулого століття була проведена велика кількість експериментальних досліджень розповсюдження ультракоротких радіохвиль над морською поверхнею. Дослідження рефракції показали, що в сантиметровому та дециметровому діапазоні в приводному шарі тропосфери практично завжди існує приводний ТХВ [7], наявність якого дозволяє збільшити дальність дії радіозв'язку та радіолокації в декілька разів [1 – 6].

Багато робіт [1 – 7] було присвячено використанню ТХВ для збільшення дальності виявлення маловисотних цілей (МЦ) над морем. Проте, існують значні проблеми визначення координат цілей в ТХВ за межами ДПВ. Зокрема, при визначенні висоти польоту МЦ за межами ДПВ використання традиційних методів недоцільне, оскільки припустимі помилки вимірювання висоти збільшуються у декілька разів [11]. Для підвищення точності визначення висоти польоту МЦ в межах ТХВ на дальності, що перевищує ДПВ, необхідно знати структуру поля, збудженого передавальною антеною.

В роботах [9, 10] запропонований електродинамічний метод розрахунку поля в напівпровідникових шаруватих середовищах – метод криволінійних координат. Сутність методу полягає у представленні області РРХ у вигляді сферичного трьохшарового напівпровідникового середовища з різними електричними параметрами кожного з шарів (морська поверхня - ТХВ -стандартна тропосфера), що до певної міри дозволяє спростити систему рівнянь Максвелла.

У подальшому, на рівняння Максвелла були накладені граничні умови та сформована система лінійних алгебраїчних рівнянь, яка розв'язується методом найменших квадратів.

Для визначення напруженостей складових ЕМП у будь-якій точці другого шару багат шарового середовища, що розглядається, були отримані наступні співвідношення:

$$E_r^{(2)} = \frac{\partial^2 (ru_2)}{\partial r^2} - k_0^2 \epsilon_2 \mu_2 (ru_2); \quad (2)$$

$$E_\theta^{(2)} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 (ru_2)}{\partial r \partial \theta}; \quad (3)$$

$$E_\phi^{(2)} = \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial^2 (ru_2)}{\partial r \partial \phi}; \quad (4)$$

$$H_r^{(2)} = 0; \quad (5)$$

$$H_\theta^{(2)} = \frac{jk_0 \epsilon_2}{r \sin \theta} \frac{\partial (ru_2)}{\partial \phi}; \quad (6)$$

$$H_\phi^{(2)} = -\frac{jk_0 \epsilon_2}{r} \frac{\partial (ru_2)}{\partial \theta}; \quad (7)$$

де  $E_r^{(2)}$ ,  $E_\theta^{(2)}$ ,  $E_\phi^{(2)}$ ,  $H_r^{(2)}$ ,  $H_\theta^{(2)}$ ,  $H_\phi^{(2)}$  – складові електромагнітного поля другого шару багат шарового сферичного середовища;

$u_2$  – скалярний потенціал Дебая;

$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$  – хвильове число вакууму;

$\epsilon_2$ ,  $\mu_2$  – відносні діелектрична та магнітна проникності другого шару;

$j$  – уявна одиниця;

$r$  – відстань від центру сферичного середовища до точки спостереження.

В якості елементарного випромінювача, в методі використовується горизонтальний електричний диполь (диполь Герца), розташований в середньому шарі.

Особливістю методу є те, що він враховує сферичність та електричні параметри середовища РРХ і поляризацію передавальної антени.

Для обґрунтування адекватності результатів розрахунків розподілів поля по висоті в ТХВ, отриманих методом криволінійних координат [10], були використані результати експериментальних досліджень, які проводилися в Азово-Чорноморському басейні з метою дослідження структури надвисоко-частотного поля [7, 8].

На рис. 1 представлені експериментально отримані типові розподіли ЕМП над акваторією Азово-Чорноморського басейну [7] в межах прямої видимості для різних довжин хвиль.

З рис. 1, а видно, що ЕМП над морем має бага-

топелюсткову структуру за рахунок інтерференції прямого та відбитого від поверхні моря променів. «Пелюстки» мають однакову ширину та амплітуду. Такі розподіли відносять до розподілів «нормального» типу. Зі збільшенням довжини хвилі кількість інтерференційних максимумів (мінімумів) зменшується.

На рис. 1, б зображені розподіли «аномального» типу, які відповідають хвильоводному РРХ. При цьому пелюстки прижимаються до поверхні землі (моря), а їх амплітуда збільшується.

Для розрахунків структури поля над морем за допомогою методу криволінійних координат [9] були використані вихідні дані, які відповідають умовам проведення експерименту [7]. А саме:

відстань від передавача до точки спостереження ( $D$ ) становить 8 км;

довжини хвиль зондуючого сигналу ( $\lambda$ ) – 0,8 см, 4 см та 35 см;

діапазон висот вимірювання перерізів поля над поверхнею моря ( $h$ ) – 0-92 м;

електричні параметри морської води: відносна діелектрична проникність  $\epsilon=80$  та питома провідність  $\sigma=6$ .

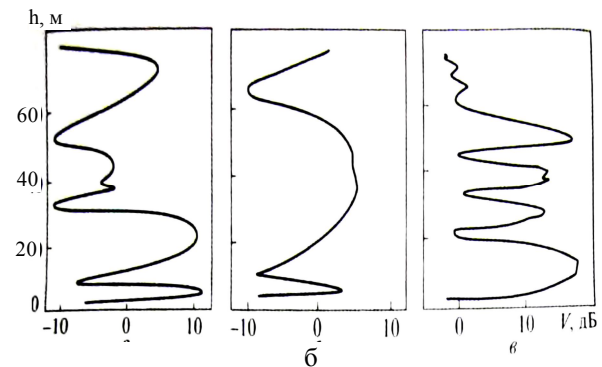
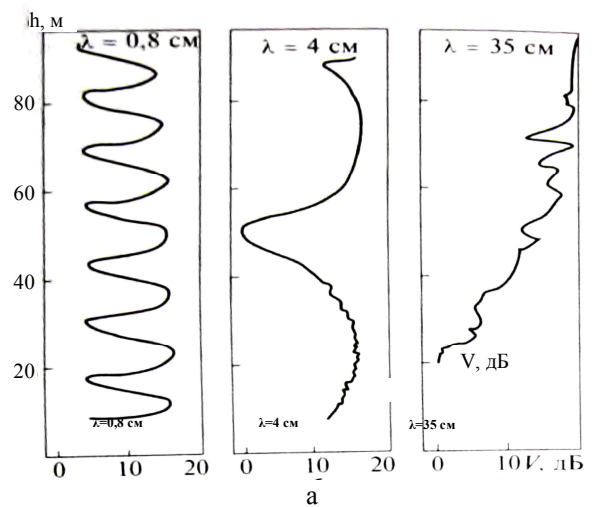


Рис. 1. Перерізи висотного ЕМП, отримані експериментально над поверхнею моря:  
а – нормального типу;  
б – аномального типу (хвильовдне РРХ)

На рис. 2 – 4 представлені результати розрахунку перерізів ЕМП за допомогою методу криволінійних координат для довжин хвиль  $\lambda=0,8$  см,  $\lambda=4$  см,  $\lambda=35$  см відповідно, при вищевказаних параметрах ТХВ.

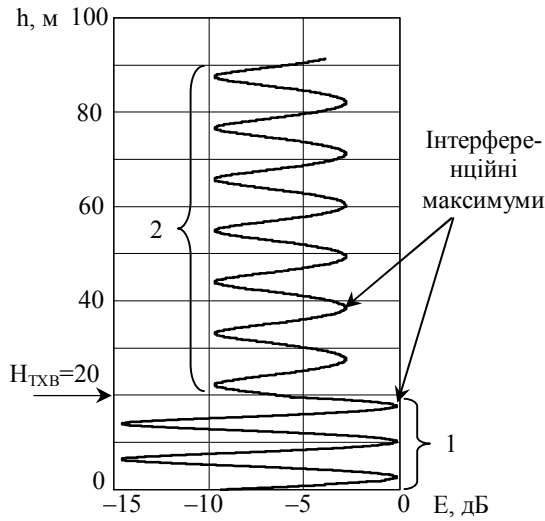


Рис. 2. Результати розрахунку висотного УКХ поля над морем на при існуванні приводного ТХВ ( $D=8$  км,  $\lambda=0,8$  см,  $h_a=10$  м):  
1 – переріз поля в ТХВ;  
2 – переріз поля над ТХВ

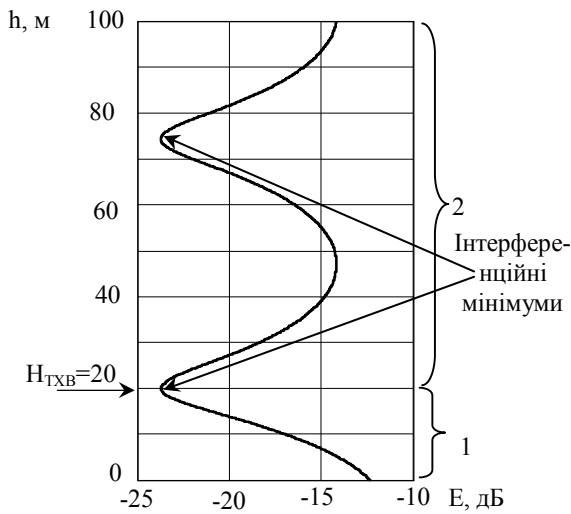


Рис. 3. Результати розрахунку висотного УКХ поля над морем на при існуванні приводного ТХВ ( $D=8$  км,  $\lambda=4$  см,  $h_a=10$  м):  
1 – переріз поля в ТХВ;  
2 – переріз поля над ТХВ

Порівняння експериментально отриманих вертикальних розподілів ЕМП з результатами розрахунків підтверджує адекватність запропонованого методу. А саме, розраховані вертикальні перерізи ЕМП над морем, як і експериментально отримані, мають багатопелюсткову структуру, при збільшен-

ні довжини хвилі їх кількість зменшується. При моделюванні ТХВ над морем з верхньою межею 20 м амплітуда пелюстків збільшується, а відстань між інтерференційними максимумами зменшується. Слід зауважити, що висотні перерізи аномального типу (експериментальні) змінювалися з інтервалом 2-10 хв (рис. 1 б). Амплітуда пелюстків при цьому довільно змінювалася за висотою. Це пояснюється аномальними змінами висоти ТХВ та вертикального градієнту індексу заломлення повітря в ТХВ, оскільки він є функцією не тільки висоти, а й часу  $g_N(h, t)$ .

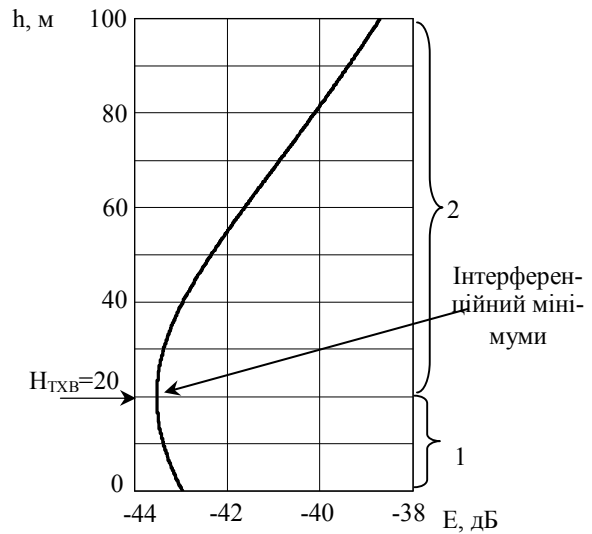


Рис. 4. Результати розрахунку висотного УКХ поля над морем при існуванні приводного ТХВ ( $D=8$  км,  $\lambda=35$  см,  $h_a=10$  м):  
1 – переріз поля в ТХВ;  
2 – переріз поля над ТХВ.

При розрахунках перерізів поля в межах ТХВ вибиралися усереднені значення  $g_N(h, t)$  для Чорноморського басейну, що не змінюється в ТХВ. Цей факт пояснює рівність амплітуд пелюстків поля в ТХВ. Різниця між інтерференційними максимумами та мінімумами може становити до 15 дБ.

З аналізу рис. 2, 3, 4 можна зробити висновок, що при збільшенні довжини хвилі випромінювання напруженість поля зменшується (що можна пояснити проходженням частини енергії крізь верхню «стінку» ТХВ), а пелюсткова структура висотного перерізу ЕМП зберігається.

Таким чином, порівняльний аналіз експериментальних даних з результатами розрахунку доводить адекватність запропонованого методу. Цей метод можна використовувати для дослідження структури поля над морем не тільки на ДПВ, а також і за її межами. При розрахунку поля за наявності ТХВ, метод дозволяє врахувати всі можливі перевідбиття між стінками приповерхневого ТХВ.

## Висновки

Приведено порівняльний аналіз експериментально отриманих перерізів ЕМП над морем з результатами розрахунків виконаних методом криволінійних координат для різних довжин хвиль. Результати аналізу свідчать про адекватність використання методу криволінійних координат для дослідження структури ЕМП в межах ТХВ на дальності прямої видимості та за її межами.

Встановлено, що зі збільшенням довжини хвилі передавальної антени, встановленої в межах ТХВ над морем, кількість інтерференційних максимумів (мінімумів) зменшується в визначеному діапазоні висот. Також встановлено, що при збільшенні довжини хвилі зменшується напруженість поля на при однаковій дальності до точки спостереження. Цей факт можна пояснити проходженням частини енергії крізь верхню «стінку» ТХВ.

Запропонований метод засновано на відносно простому математичному апараті, в порівнянні з аналогічними дозволяє врахувати сферичність та електричні параметри стінок ТХВ, поляризацію передавальної антени. Також особливістю методу є врахування всіх можливих шляхів РРХ в ТХВ при розрахунках складових ЕМП.

## Список літератури

1. Лобкова Л.М. *Распространение радиоволн над морской поверхностью* / Л.М. Лобкова. – М.: Радио и связь, 1991. – 255 с.
2. Михайлов Н.Ф. *Радиометеорологические исследования над морем* / Н.Ф. Михайлов, А.В. Рыжков, Г.Г. Шукин. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 208 с.
3. Черный Ф.Б. *Распространение радиоволн* / Ф.Б. Черный. – М.: Сов. радио, 1972. – 463 с.

4. *Дальнее тропосферное распространение ультракоротких радиоволн* / под ред. Б.А. Введенского. – М.: Сов. радио, 1965. – 415 с.

5. *Распространение ультракоротких радиоволн*: пер. с англ. / под ред. Б.А. Шиллерова. – М.: Сов. радио, 1954. – 564 с.

6. Ворона А.И. *Метод повышения точности измерения дальности до цели в условиях существования морского тропосферного волновода* / А.И. Ворона, В.Л. Мисайлов, О.А. Окунев // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2004. – Вып. 3(9). – С. 19-21.

7. *Диагностика условий распространения УКВ в тропосфере* / [Б.В. Жуков, В.А. Кабанов и др.]; под ред. Г.И. Хлопова. – К.: Наукова думка, 2010. – 264 с.

8. Михайлов Н.Ф. *Радиометеорологические исследования над морем* / Н.Ф. Михайлов, А.В. Рыжков, Г.Г. Шукин. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 208 с.

9. *Розрахунок поля електричного диполя в тропосферному хвилеводі* / Є.О. Меленті, О.І. Сухаревський, С.В. Кукобко, Є.С. Роцупкін // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*. – Х.: ХУПС – 2012. – Вип. 4(33). – С. 93-99.

10. *Особенности использования складовых электромагнитного поля при оцінці висоти польоту цілі в тропосферному хвилеводі* / В.Д. Карлов, С.В. Кукобко, Є.О. Меленті, М.М. Петрушенко // *Восьма наукова конф. Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба „Новітні технології – для захисту повітряного простору“: тези доповідей, 18 – 19 квітня 2012 року*. – Х.: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2011. – С. 291-292.

11. Patterson W.L. *Effective Use of the Electromagnetic Products of TESS and IREPS*./Technical Document 1369. – San Diego, 1988. – 138 p.

Надійшла до редколегії 20.06.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. О.І. Сухаревський, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТРОПОСФЕРНОМ ВОЛНОВОДЕ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Е.А. Меленті

*В работе представлены результаты расчета высотных разрезов электромагнитного поля в тропосферном волноводе полученные методом криволінійных координат для разных длин волн. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментально полученными разрезами поля, типичными для Азово-Черноморского бассейна. Сравнительный анализ экспериментальных данных с результатами расчета доказывает адекватность предложенного метода. Предложенный метод может быть использован для исследования структуры поля, как на дальности прямой видимости, так и за ее пределами.*

**Ключевые слова:** электрический диполь, тропосферный волновод, электромагнитное поле.

## COMPARISON OF RESULTS OF CALCULATION OF ELECTROMAGNETIC PAUL IN TROPOSPHERE DUCT WITH EXPERIMENTAL DATA

E.A. Melenty

*The results of calculation of pitch cuts of the electromagnetic field are in-process presented in a troposphere duct got the method of curvilinear coordinates for different lengths of waves. Comparing of results of calculation is conducted to the experimentally got cuts of the field, typical for the Azov-Black pool. The comparative analysis of experimental data with the results of calculation proves adequacy of an offer method. An offer method can be used for research of the field structure both on distance of line-of-sight and after her limits.*

**Keywords:** electrical dipole, troposphere duct, electromagnetic field.