

**І.В. Корнієнко**, канд. техн. наук

**С.П. Корнієнко**, канд. техн. наук

Чернігівський національний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

### **ДИСКРЕТИЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ**

**И.В. Корниенко**, канд. техн. наук

**С.П. Корниенко**, канд. техн. наук

Черниговский национальный технологический университет, г. Чернигов, Украина

### **ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

**Ihor Korniienko**, PhD in Technical Sciences

**Svitlana Korniienko**, PhD in Technical Sciences

Chernihiv National University of Technology, Chernihiv, Ukraine

### **THE GEOINFORMATION SPACE DISCRETIZATION IN THE SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC POLLUTION**

*Розглянуто проблему автоматизації моделювання і прогнозування електромагнітного забруднення довкілля в геоінформаційному середовищі, наведено способи дискретизації геоінформаційного простору залежно від сценарію моделювання, запропоновано модель комплексного оцінювання електромагнітного забруднення.*

***Ключові слова:** електромагнітне забруднення, дискретизація геоінформаційного простору, прогнозування напруженості електромагнітного поля.*

*Рассмотрена проблема автоматизации моделирования и прогнозирования электромагнитного загрязнения окружающей среды в геоинформационной среде, приведены способы дискретизации геоинформационного пространства в зависимости от сценария моделирования, предложена модель комплексной оценки электромагнитного загрязнения.*

***Ключевые слова:** электромагнитное загрязнение, дискретизация геоинформационного пространства, прогнозирование напряженности электромагнитного поля.*

*The problem of automating the modeling and prediction of electromagnetic pollution in GIS environment, given the sampling methods of geo-space, depending on the simulation scenario, the proposed model of integrated assessment of electromagnetic pollution.*

***Key words:** electromagnetic pollution, geoinformation space discretization, predict the electromagnetic field.*

**Постановка проблеми.** Одним із зручних інструментів аналізу і прогнозування електромагнітного забруднення довкілля є геоінформаційні системи. Моделювання здійснюється завдяки створенню (використанню) моделі довкілля, відтворенню джерел електромагнітного випромінювання (ДЕМВ) з їх характеристиками і, безпосередньо, моделюванню поширення електромагнітної енергії та оцінюванню електромагнітного забруднення у колі інтересів. Складність у цьому процесі полягає у проблемності відтворення геоінформаційного простору, адекватного реальному геопростору, в якому саме і відбувається електромагнітне забруднення (ЕМЗ). Модель геоінформаційного простору повинна містити множину тривимірних моделей дискретних і безперервних об'єктів, які можуть впливати на процес поширення електромагнітних хвиль, їх заганяння, відбиття, екранування, інтерференцію, дифракцію тощо. Процес створення подібної моделі стає надскладним через необхідність введення в комп'ютерне середовище великої кількості точних, актуальних, достовірних даних про множину об'єктів геопростору, які, здебільшого, є лише у відповідних галузевих кадастрових організаціях. Ситуацію ускладнює те, що для моделювання, крім геометричних характеристик об'єктів, необхідний опис їх електричних характеристик, яких кадастрові організації не мають. Крім того, при масштабному моделюванні обов'язково необхідним є максимальна автоматизація процесів і алгоритмів моделювання, тому питання автоматизованого відтворення геоінформаційного простору і його підготовка до прогнозування електромагнітного забруднення є актуальним і необхідним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням біологічного впливу електромагнітного випромінювання на організм людини та біосферу в цілому присвячено багато наукових праць зарубіжних, радянських, пострадянських і вітчизняних авторів, серед яких W. Adey, A. Sheppard, M. Blank, E. Goodman, V. Greenebaum, M. Magron, N. Simon, Ю.Д. Думанський, Н.Д. Дев'ятков, В.В. Антіпов, Б.І. Давидов, В.С. Тихончук, П.І. Госьков, В.Н. Беккер, Ю.А. Шапов, Н.Н. Грачов, В.І. Копанев, А.В. Шакула, А.С. Пресман, А.Ю. Сомов, В.З. Макаров, І.В. Прольоткін, А.Н. Чумаченко, Ю.Г. Григор'єв, О.А. Григор'єв, М.Б. Голант, О.В. Бецький, Є.І. Муратов, Ю.А. Холодов, Н.Н. Лебедева, Л.І. Хейфец та багато інших. Питання комп'ютерного моделювання та кількісного визначення впливу електромагнітного випромінювання досліджували у своїх роботах Г.О. Статюха, Т.В. Бойко, О.В. Вишнівський, М.А. Федонюк, А.А. Федонюк, В.О. Фесюк, С.Г. Панькевич, В.А. Глива, Л.О. Левченко та інші. Проблеми застосування ПС для розв'язування задач оцінювання електромагнітного забруднення територій висвітлювали у своїх роботах О.О. Потапов, В.Н. Довбиш, В.С. Сівков, Ю.М. Сподобаєв, А.Ю. Сомов, В.З. Макаров, І.В. Прольоткін, А.Н. Чумаченко та інші.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** У [1; 2] сформульовано підхід до геоінформаційного оцінювання електромагнітного забруднення довкілля, запропоновано алгоритм оцінювання електромагнітного забруднення від множини ДЕМВ. Актуальною проблемою при цьому є адекватне моделювання середовища поширення електромагнітних хвиль, яке відтворює реальний геопростір із заданою точністю, володіє властивостями актуальності та повноти опису та придатне до застосування автоматизованих процедур обчислення поширення електромагнітної енергії.

**Мета статті.** Розроблення підходу щодо отримання і підготовки актуальних та достовірних просторових даних для моделювання електромагнітного забруднення довкілля.

**Виклад основного матеріалу.** Досліджуваний геоінформаційний простір  $\Theta = \{(x, y, z); (x, y, z) \in R^3\}$ , де  $R^3$  – просторова декартова система координат, характеризується наявністю таких елементів: моделі рельєфу земної поверхні, заданого матрицею висот у дискретних точках простору  $\Theta_h = [h_{x,y}]$ ; множиною джерел електромагнітного випромінювання  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_{N^s}\}$ ; множиною об'єктів геопростору  $O_\Theta = \{o_1, o_2, \dots, o_j, \dots, o_{N^o}\}$ , яка здатна змінювати умови поширення електромагнітної енергії від ДЕМВ; множиною потенційних біологічних приймачів електромагнітної енергії (рецепторів)  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k, \dots, r_{N^r}\}$ , відносно яких оцінюється електромагнітна безпека досліджуваного простору.

Кожне  $s_i$ -те ДЕМВ має дві групи характеристик: просторові характеристики ДЕМВ в області  $\Theta$ :  $s_i^\Theta(x_i, y_i, z_i, \alpha_i, \beta_i)$ , де  $x_i, y_i, z_i$  – координати випромінювача (точкового об'єкта),  $\alpha_i$  – азимутальні характеристики спрямованості та  $\beta_i$  – нахил випромінювача (антени) ДЕМВ у просторі; і параметричні характеристики, які визначають рівень і характер випромінювання електромагнітної енергії  $s_i^E \in \{P_i, G_i, w_i, \theta_i, h_i, f_0, \Delta f_i, t_i\}$ , де  $P_i$  – потужність електромагнітної енергії, що підводиться до випромінювача (антени);  $G_i$  – коефіцієнт підсилення випромінювача (антени);  $w_i$  – специфічні параметри випромінювання (періодичність, гармонійність, модуляція, шпаруватість тощо);  $h_i$  – висота випромінювача (антени) над землею поверхнею;  $\theta_i$  – функція, що задає спрямовані характеристики випромінювача (діаграма спрямованості антени);  $f_0$  – центральна частота випромінювання;

$\Delta f_i$  – ширина спектра електромагнітного випромінювання;  $t_i$  – часові статистичні характеристики випромінювання.

Об'єкти геопростору  $O_j$  характеризуються місцем розташування у просторі  $x_j, y_j, z_j$  (для точкового об'єкта) і власними геометричними характеристиками  $O_j^{xyz}$ , модельованими в геоінформаційному середовищі тривимірними моделями. Двовимірні лінійні і полігональні «наземні»  $O_j$  моделюють об'єкти на поверхні землі (грунт, водойма, асфальт, бетон, трава тощо) і задаються набором полігонів або лінійних об'єктів, покладених на цифрову модель рельєфу. З погляду впливу на поширення електромагнітної енергії властивості  $O_j$  (відбиваючі, поглинаючі, дефрагувальні і розсіювальні) характеризуються двома параметрами, а саме діелектричною проникливістю  $\epsilon$  і провідністю  $\gamma$ . Під час поширення в межах  $O_j$  електромагнітна хвиля має коефіцієнт загасання електромагнітної енергії  $W_j$ , який визначається параметрами  $O_j$  та параметричними характеристиками ДЕМВ –  $s_i^E$ . Тривимірні об'єкти, що мають власну висоту  $h_j$  (лісові смуги або ареали різної щільності та типу дерев, житлові та промислові квартали різної етажності та щільності забудови тощо), можуть давати додаткове послаблення у разі поширення ЕМХ. Крім того,  $O_j$  можуть розцінюватися і як місце перебування людей в їх середині (будівлі, споруди тощо), за якого необхідне додаткове моделювання проникнення електромагнітної енергії ззовні та можливі резонансні характеристики приміщень.

Моделювання ЕМЗ у просторі передбачає в кінцевому результаті відображення оцінювання рівня небезпечності електромагнітного поля у просторі від кожного окремого джерела випромінювання або відображення комплексного оцінювання небезпечності за сукупністю електромагнітних полів [1; 2]. Формування оцінки небезпечності електромагнітного поля (ЕМП) від окремого ДЕМВ за відомими методиками скінченноелементних автоматизованих розрахунків, наприклад [3; 4], у загальному вигляді ґрунтується на математичному моделюванні характеристик електромагнітного поля в дискретних регулярних точках простору на основі вихідних даних, до яких входять енергетично-часові параметри випромінювача, характеристики середовища поширення електромагнітної хвилі (ЕМХ), а також відносні просторові характеристики ДЕМВ та оцінюваних точок простору. Крок дискретизації регулярної мережі GRID має обиратися з міркувань достатньої детальності та наявності обчислювальних ресурсів. Результат обчислення електромагнітного забруднення представляється у вигляді матриці в дискретних точках простору.

Схематично процес моделювання електромагнітного забруднення зображений на рис. 1. Для формування комплексного оцінювання електромагнітної забрудненості необхідно використовувати спосіб, який дозволяє враховувати сумарну шкоду біологічному організму, яка може бути заподіяна множиною просторово-розподілених ЕМП.

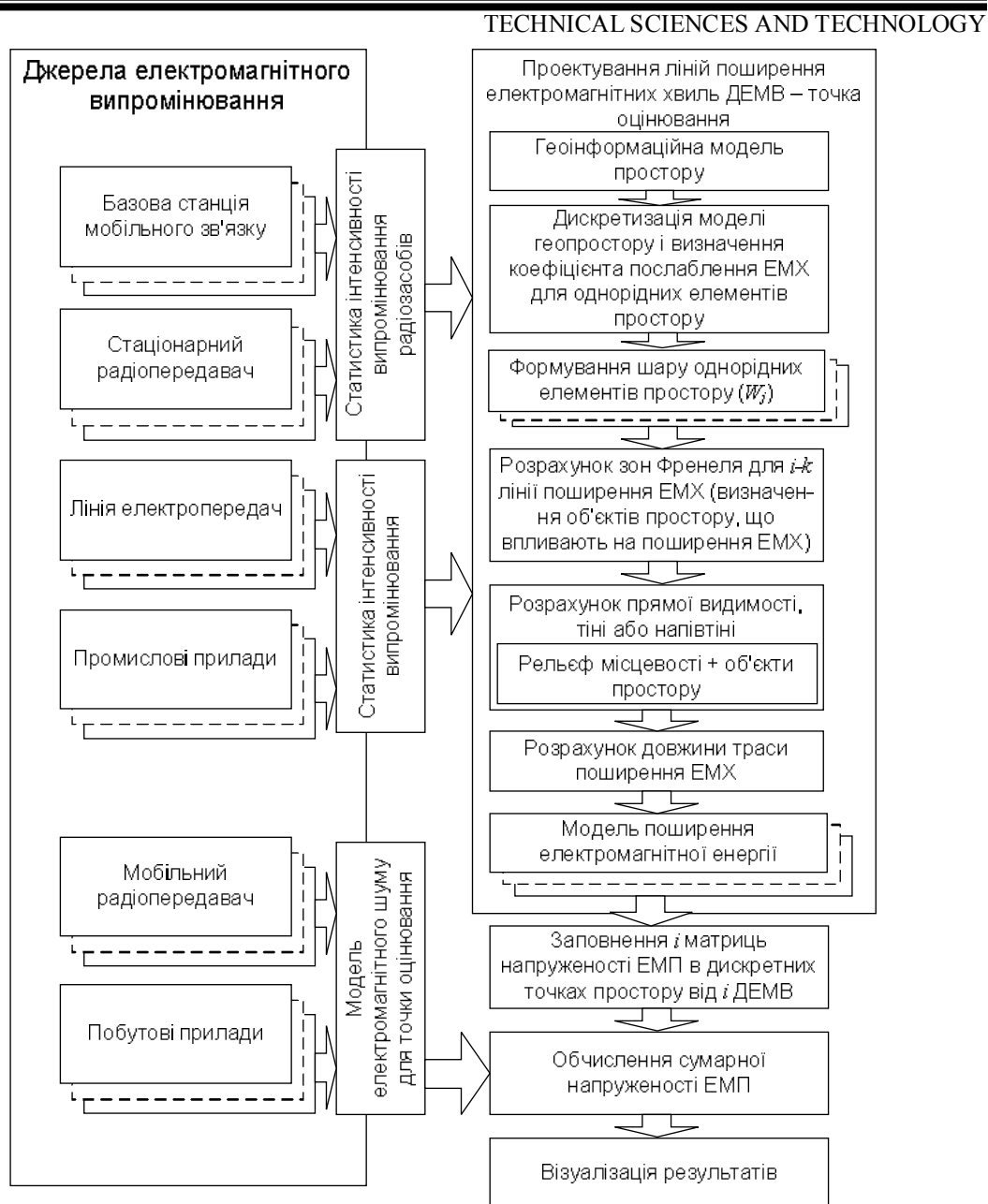


Рис. 1. Схема процесу моделювання електромагнітного забруднення

Кількісне оцінювання впливу електромагнітних полів на біологічні організми прийнято здійснювати за питомою поглиненою потужністю (SAR – specific absorption rate) – усереднена величина, що визначає кількість поглиненої електромагнітної енергії на одиницю маси (об'єму) тіла і вимірюється у Вт/кг (мВт/г) або Вт/м<sup>3</sup> (мВт/см<sup>3</sup>) [5]:

$$SAR = \int \frac{\sigma(r) E^2(r)}{\rho(r)} dr, \text{ де } \sigma - \text{провідність біологічного організму; } E - \text{напруженість}$$

електричного поля;  $\rho$  – щільність біологічного організму. На цей час не розроблено приладів, здатних виміряти поглинену електромагнітну енергію, тому оцінювання SAR виконують вимірюванням електричної  $E$  або магнітної  $H$  напруженості електромагнітного поля або щільності потоку енергії  $\omega$  у певних точках простору з наступним математичним моделюванням SAR. При одночасній дії декількох ДЕМВ існують декілька підходів щодо оцінювання сумарного значення параметрів ЕМП. Так, у [6] сумарна напруженість електричної складової декількох ЕМП визначається співвідношенням

$E_{\Sigma} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}$ , де  $E_1, E_2, \dots, E_n$  – напруженості електричних полів створюваних  $n$  ДЕМВ. Сумарна щільність потоку енергії  $\omega$  від  $n$  ДЕМВ  $\omega_{\Sigma} = \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n$ . При різних нормувальних характеристик ГДР і параметрів ЕМП для санітарно-захисних зон

$$\text{діє співвідношення: } \left( \frac{E_1}{E_{ГДР1}} \right)^2 + \dots + \left( \frac{E_n}{E_{ГДРn}} \right)^2 + \frac{\omega_1}{\omega_{ГДР1}} + \dots + \frac{\omega_m}{\omega_{ГДРm}} \leq 1.$$

В іншому підході [7] визначення результуючого загального поля від декількох ДЕМВ виконувалось квадратичним підсумовуванням ЕМП створюваних декількома ДЕМВ –  $E_0 = \sqrt{\sum_i \mu_i E_i}$ , де  $\mu_i$  – ваговий коефіцієнт залежності гігієнічних нормативів

від діапазону частот електромагнітного випромінювання (ЕМВ), що відповідає діючим санітарним нормам;  $E_i$  – напруженість ЕМП (щільність потоку енергії), створюваним у досліджуваній точці простору  $i$ -тим ДЕМВ. Є також інші підходи, але ця проблематика виходить за межі теми статті і буде розглядатися окремо, а поки що для нашої моделі приймемо підхід, рекомендований у [6].

Внаслідок, як правило, близького розташування ДЕМВ та/або рецепторів до земної поверхні мають місце явища відбиття ЕМХ від земної поверхні та інтерференції їх з прямими хвилями, втрат електромагнітної енергії внаслідок напівпровідникових властивостей земної поверхні, сферичності і нерівності земної поверхні, дифракції та розсіювання ЕМХ. Оцінювання цього впливу вимагає знання основних параметрів земної поверхні – діелектричної проникливості  $\epsilon$  і провідності  $\gamma$ , які безпосередньо залежать від структури, вологості, шаруватості, температури та частоти ЕМХ, які змінюються в доволі широких межах, що робить строге кількісне оцінювання складним. Під час теоретичного розгляду питання впливу земної поверхні дещо ідеалізують [8], що дозволяє одержати розв'язок у межах певної похибки, зменшення якої здобувається завдяки введенню поправок, які визначаються за умов поширення ЕМХ і властивостей земної поверхні. Володіючи детальною і достовірною інформацією про об'єкти геопростору, можна суттєво зменшити одержувану похибку ідеалізації. Складність тут полягає у відсутності первинної достовірної і детальної інформації про реальні об'єкти, великі трудовитрати точного модельного відтворення умов поширення ЕМХ і наявності відповідного середовища моделювання, але за умов запровадження в Україні Національної інфраструктури геопросторових даних питання одержання потрібної інформації у вигляді геоінформаційних моделей заданої якості буде знято.

З метою використання даних одержуваного геоінформаційного простору він потребуватиме попередньої підготовки до моделювання, яка полягає у його дискретизації та створенні нових об'єктів простору, що володітимуть індивідуальними властивостями і які здатні впливати на поширення ЕМХ. Для процесів моделювання поширення електромагнітної енергії можна розглядати такі основні випадки дискретизації геоінформаційного простору:

1. Дискретизація поверхні за електричними властивостями. На поширення електромагнітної енергії земною хвилею впливатимуть електричні параметри ґрунту  $\epsilon$  і  $\gamma$ , при цьому створюваними об'єктами є відкриті ділянки земної поверхні. Втрати в земній поверхні визначаються величиною тангенса кута втрат [9]:  $\text{tg}\varphi_{\epsilon} = \frac{\gamma}{\omega\epsilon_0\epsilon} = \frac{60\gamma\lambda}{\epsilon}$ , де  $\epsilon_0$  – діелектрична проникливість атмосфери. Відповідно множник послаблення електромаг-

нітних хвиль визначається як  $|W| \approx \frac{1}{\rho} = \frac{\lambda}{\pi D_{ik}} \sqrt{\varepsilon^2 + (60\gamma\lambda)^2}$ , де  $\rho$  – безрозмірний пара-

метр (чисельна відстань);  $D_{ik}$  – відстань між  $i$ -м ДЕМВ і  $k$ -м приймачем енергії. Очевидно, що значення цих параметрів залежно від пори року та метеорологічних умов коливатимуться в певних межах, і у практичних оцінках певної (достатньо великої) території важко мати точні електричні параметри ґрунту всього оцінюваного простору. Тому для практичних розрахунків справедливо припустити, що електричні параметри ґрунту мають носити імовірнісний характер, тоді  $|W| \approx \frac{1}{\rho} = \frac{\lambda}{\pi D_{ik}} \sqrt{(f(\varepsilon))^2 + (60\lambda f(\gamma))^2}$ ,

де  $f(\varepsilon)$  і  $f(\gamma)$  – функції щільності розподілу ймовірностей випадкових величин  $\varepsilon$  і  $\gamma$ . Джерелом даних електричних параметрів ґрунтів є просторові дані земельного кадастру про склад, шаруватість та інші властивості ґрунтів, а також середньостатистичні дані метеослужб, використання яких дозволить побутувати варіаційний ряд для набору типових ґрунтів досліджуваного простору.

Для випадків віддаленого розташування антен від земної поверхні потребуватиме обчислення коефіцієнт відбиття, який, здебільшого, визначається для відкритої траси за допомогою розгляду вкладу поодинокого відбитого променя від земної поверхні та векторного складання його з прямим променем. Для цього необхідно визначити точку відбиття на трасі, для якої кут падіння дорівнював куту відбиття.

У зв'язку зі складністю визначення точки, в якій кут падіння в точності дорівнював куту відбиття, допускається деяка кутова погрішність. При цьому комплексний коефіцієнт відбиття для вертикально поляризованої хвилі обчислюється згідно з виразом –

$$R_v = \frac{\varepsilon \cdot \sin \alpha - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \alpha}}{\varepsilon \cdot \sin \alpha + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \alpha}}, \text{ де } \alpha - \text{кут падіння, } ^\circ.$$

Для горизонтально поляризованої хвилі коефіцієнт відбиття дорівнює:

$$R_h = \frac{\sin \alpha - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \alpha}}{\sin \alpha + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \alpha}}. \text{ Тут комплексна діелектрична проникність обчислюється так:}$$

$\varepsilon = \varepsilon_r - j60\gamma\lambda$ , де  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична постійна поверхні, що відбиває;  $\gamma$  – провідність поверхні, що відбиває, Сіменс/метр.

У табл., для прикладу, наведено основні значення показників  $\varepsilon_r$  і  $\gamma$  для деяких типів підстилаючої поверхні.

Таблиця

Значення показників діелектричної постійної поверхні та провідності поверхні

Середовище	$\varepsilon_r$	$\gamma$
Вода морська	80	4
Вода прісна	80	0,001
Сільська місцевість	14	0,02
Місто	3	0,0001
Торф сухий	3	0,05
Торф вологий	6	0,1
Глина суха	2	0,03
Глина волога	24	0,6

Сформований таким чином шар дискретних об'єктів має являти собою шар полігональних об'єктів без проміжків і накладень.

2. Дискретизація простору за характерними типовими ознаками просторових ареалів. Існує чисельна кількість аналітичних моделей поширення ЕМХ, одержаних експе-

## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY

риментальним шляхом для того чи іншого типу місцевості. Такі моделі зазвичай рекомендовані до застосування протоколами Міжнародного союзу електров'язку. Відповідно до цих рекомендацій досліджуваний простір може класифікуватися за характером поверхні, як-то місця щільної забудови високоповерховими будівлями, передмістя, ліс, рідколісся тощо. Так, наприклад, для обчислення загасання сигналу засобів мобільного радіозв'язку використовується рекомендація ITU-R P.370, для умов міської місцевості та невеликих відстаней – рекомендація ITU-R P.529. Серед найбільш відомих моделей можна навести моделі Free space + RMD, FCC + RMD, CCIR + RMD, Okumura (Hata), Hata/Davidson/Epstein-Peterson Diffraction, TIREM-EDX, FCC – EDX, FCC – FCC, CCIR – EDX, COST 231 – Hata тощо, які застосовуються до частотно-територіального планування мобільного радіозв'язку, а відповідно і певного частотного діапазону. Отже, така дискретизація геоінформаційного простору вимагатиме, крім класифікації типу просторового об'єкта, і наявності реляційного зв'язку з відношенням типів ДЕМВ та їх частотного діапазону. Сформований таким чином шар дискретних об'єктів повинен являти собою шар полігональних об'єктів без проміжків і накладень.

3. Дискретизація та класифікація за індивідуальними властивостями об'єктів для моделювання явищ дифракції та інтерференції під час поширення ЕМХ. Часто об'єкти простору виконують роль направляючої структури, екрана або дзеркала-відбивача для об'єктів, що знаходяться у безпосередній близькості або у промені траси поширення хвилі. У цьому разі важливим є точна відповідність геометричних характеристик і орієнтування моделі у геоінформаційному просторі реальному об'єкту, а також атрибутивний опис електричних характеристик об'єкта, що ґрунтується на фізико-хімічній структурі об'єкта. В подальшому задача розв'язується методами геометричної оптики і фізичної та геометричної теорії дифракції. Сформований таким чином шар дискретних об'єктів має являти собою набір шарів тривимірних об'єктів із заданими електричними характеристиками. Між об'єктами можуть існувати проміжки, але накладення об'єктів не допускається.

4. Дискретизація поверхні землі за радіовидимістю інтервалу поширення ЕМХ. Дискретизація простору з урахуванням рельєфу і висотних характеристиках об'єктів геопростору по зонах відкритості, тіні та напівтіні має виконуватися, як і попередній випадок, безпосередньо у ході моделювання відносно ДЕМВ і регулярної множини рецепторів. Відкритою вважається траса поширення, для якої перша зона Френеля між ДЕМВ і рецептором не перекривається будь-якою перешкодою. За умови часткового перекриття першої зони Френеля, але не перекриття променю прямої видимості, інтервал траси є напіввідкритим, що відповідає умові поширення хвиль для напівтіні, і відповідно повністю закрыта перша зона Френеля характеризує зону тіні об'єкта. Для кожного типу ДЕМВ мають використовуватися відповідні моделі загасання. Наприклад, для радіопередавачів з частотами 30–40 000 МГц загасання енергії сигналів у цих зонах можна визначити так:

$$W = Z_0 + W_2 + W_3 \text{ при } D < D_{\text{ин}} < D_0;$$

$$W = Z_0 + W_0 + W'_1 + W_3 \text{ при } D_{\text{ин}} \leq D < D_0;$$

$$W = Z_0 + W_0 + W_1 + W_2 \text{ при } D_0 \leq D;$$

$$W = Z_0 + 2W_2 + W_4 \text{ при } D_0 < D, 100 \text{ км} < D < 900 \text{ км}, 30 \text{ МГц} < f < 6000 \text{ МГц},$$

де  $Z_0$  – послаблення радіохвиль у вільному просторі;  $W_2$  – послаблення радіохвиль за рахунок поглинання в атмосфері;  $W_3$  – посилення радіохвиль за рахунок інтерференції;  $D_{\text{ин}}$  – протяжність зони інтерференції;  $D_0$  – дальність прямої радіовидимості;  $W_0$  – послаблення радіохвиль на дальності прямої радіовидимості;  $W'_1$  – послаблення радіохвиль

у ближній зоні напівтіні;  $W_1$  – послаблення радіохвиль у дальній зоні напівтіні;  $W_4$  – послаблення радіохвиль за рахунок тропосферного розсіювання.

Протяжність зони інтерференції  $D_{\text{ін}}$  (у км) обчислюється згідно з виразом:

$$D_{\text{ін}} = 130 \left[ \sqrt{h_1 + \frac{1,2}{\sqrt[3]{f^2}}} + \sqrt{h_2 + \frac{1,2}{\sqrt[3]{f^2}}} \right] - \frac{286}{\sqrt[3]{f^2}},$$

де  $h_1, h_2$  – висоти підняття антени ДЕМВ та висота рецептора,  $f$  – частота хвилі.

Послаблення радіохвиль у вільному просторі  $Z_0$  (у дБ):

$$Z_0 = -71 - 10 \lg \left[ (h_1 + h_2)^2 + 1,6 \cdot 10^8 \left( 1 + \frac{h_1 + h_2}{6371} \right) \sin^2 \frac{D}{12742} \right].$$

Послаблення радіохвиль на дальності прямої видимості  $W_0$  (у дБ):

$$W_0 = -6 - 331 \left( \sqrt[6]{\frac{1}{f} \sqrt{\frac{D_0}{D_1 D_2}}} \right)^{1,4},$$

де  $D_1, D_2$  – радіогоризонти ДЕМВ і рецептора.

Послаблення радіохвиль у ближній зоні напівтіні  $W'_1$  ( $D_{\text{ін}} < D < D_0$ ) (у дБ):

$$W'_1 = \frac{W_0}{D_{\text{ін}} - D_0} (D_0 - D).$$

Послаблення радіохвиль у дальній зоні напівтіні  $W_1$  ( $D > D_0$ ) (у дБ):

$$W_1 = 9 \cdot 10^{-2} \sqrt[3]{f} (D_0 - D).$$

Послаблення радіохвиль за рахунок поглинання в атмосфері  $W_2$  (у дБ) для частот  $f < 500$  МГц приймається  $W_2 = 0$ , для  $f \geq 500$  МГц:

$$W_2 = -\gamma D_a,$$

де  $\gamma$  – питома загасання, дБ/км;  $D_a$  – протяжність ділянки траси в межах поглинаючого шару атмосфери, км:

$$D_a = \begin{cases} \sqrt{(6371 + h_a)^2 - (6371 + h_1)^2 \cos^2 \beta} - (6371 + h_1) \sin \beta & \text{при } h_1 < 4 \text{ км;} \\ 2\sqrt{6375^2 - (6371 + h_1)^2 \cos^2 \beta} & \text{при } h_1 > 4 \text{ км, } \beta < -\arccos \frac{6375}{6371 + h_1}; \\ 0 & \text{при } h_1 > 4 \text{ км, } \beta < -\arccos \frac{6375}{6371 + h_1}, \end{cases}$$

$$\beta = \arctg \left( \frac{h_2 - h_1}{12742 + h_1 + h_2} \operatorname{ctg} \frac{D}{12742} \right) - \frac{D}{12742}; \quad h_a = \begin{cases} h_2, & \text{якщо } h_2 < 4 \text{ км;} \\ 4 \text{ км,} & \text{якщо } h_2 \geq 4 \text{ км.} \end{cases}$$

Посилення радіохвиль за рахунок інтерференції  $W_3$  у зоні освітленості ( $D < D_{\text{ін}}$ ):

$$W_3 = \begin{cases} \frac{W_0}{D_{\text{ін}} - D_0} (D_{\text{ін}} - D); \\ 20 \lg \left\{ 1 + \exp \left[ -8,8 \cdot 10^{-4} (\Delta h f \sin \psi_c)^2 \right] \right\}, \end{cases}$$



де  $\psi_c$  – кут ковзання радіохвилі, відбитої від поверхні Землі, рад,

$$\psi_c = \frac{h_1 + h_2}{D} - 6 \cdot 10^{-5} D \frac{h_1^2 + h_2^2}{(h_1 + h_2)^2};$$

$\Delta h$  – середнє значення нерівності поверхні.

Послаблення радіохвиль за рахунок тропосферного розсіювання  $W_4$  (у дБ) визначається тільки для частот від 30 до 6000 МГц і дальностей  $D$  від 100 до 900 км  $W_4 = -20 - 10 \lg f - 0,06D$ .

Наявність перешкод у промені поширення достатньо просто визначається за допомогою модуля Spatial Analyst ArcGIS як для векторної, так і для растрової моделі геоданих. Для формування контурів зони напівтіні потрібно аналізувати перетин перешкодами першої зони френзеля, для чого вимагатиметься додаткова дія з побудови еліпсоїда обертання для інтервалу поширення ЕМХ (рис. 2).

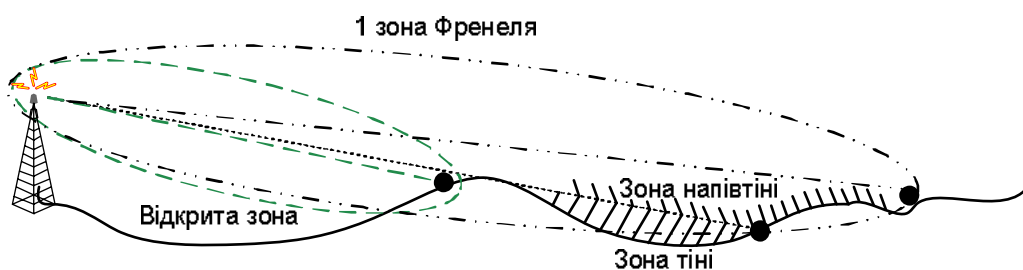


Рис. 2. Формування зон видимості, напівтіні і тіні

Результатом дискретизації простору є формування групи тематичних шарів, яка має використовуватись під час моделювання процесів поширення електромагнітних хвиль. За умови поширення електромагнітних хвиль через декілька дискретних об'єктів з різними електричними характеристиками загальне загасання радіохвиль  $W(D)$  на трасі поширення радіохвиль  $D$  можна визначити за набором однорідних трас, що в загальному вигляді має вигляд виразу [9]:

$$W(D) = y(s_0 D) + i \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sum_{j=1}^N \int_{x_{j-1}}^{x_j} y(s_0 (D - x')) \frac{(\sqrt{s_j} - \sqrt{s_0}) W(x') dx'}{\sqrt{x'(D - x')}}; s_j = \frac{i\omega}{2\epsilon_j^0 c},$$

де  $y(s_0 D)$  – деяка нормальна функція послаблення радіохвиль для вихідної діелектрично-однорідної ділянки;  $x_{j-1}$  і  $x_j$  – границі  $j$ -ї ділянки,  $x_0 = 0$ ,  $x_N \equiv D$ ;  $\omega$  – частота;  $\epsilon_j^0$  – діелектрична проникливість  $j$ -ї ділянки.

Інакше загасання поширення електромагнітних хвиль для неоднорідних трас можна одержати з виразу:

$$W = \frac{1}{2 \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_3}{d_1 d_3} (d_1 + d_2 + d_3)}},$$

де  $\rho_1, \rho_3$  – чисельна відстань ділянок радіотраси 1 і 3,  $d_1, d_2, d_3$  – протяжності однорідних ділянок радіотраси. Звідси видно, що на загальне загасання радіотраси впливають електричні параметри лише прилеглих однорідних ділянок.

**Висновки і пропозиції.** Використання пропонованої системи дискретизації геоінформаційного простору дозволить автоматизувати процедури розрахунку електромагнітних полів від множини джерел електромагнітного випромінювання. Автоматизація полягає в автоматичному виборі моделі поширення електромагнітної енергії залежно від джерела параметричних характеристик випромінювання та взаємного положення джерела та рецептора, обчисленні адекватного коефіцієнта загасання електромагнітної енергії, відповідного до умов поширення, створення і використання неоднорідних трас поширення електромагнітних хвиль. Крім того, подібна дискретизація простору може використовуватись під час планування і проектування систем радіозв'язку, контролю виконання умов електромагнітної сумісності, ефективного використання радіочастотного ресурсу з дотриманням вимог з електромагнітної безпеки.

Подальший розвиток досліджень пов'язаний з автоматизацією призначення електричних параметрів земній поверхні, основаних на даних щодо складу та якості земної поверхні і даних щодо її вологості, а також індивідуальних фізико-технічних властивостей об'єктів. Джерелом подібних даних є відповідні кадастрові організації, основними з яких є земельний, водний, лісовий, містобудівельний кадастри, інженерних мереж та інші.

#### Список використання джерел

1. Корнієнко І. В. Обґрунтування умов і сценаріїв геоінформаційного моделювання електромагнітного забруднення / І. В. Корнієнко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки» : науковий збірник. – 2012. – № 4 (61). – С. 213–218.
2. Корнієнко І. В. Алгоритм оцінювання електромагнітного забруднення територій / І. В. Корнієнко, С. П. Корнієнко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: Серія «Технічні науки» : науковий збірник. – 2013. – № 1 (63). – С. 205–209.
3. Воробьев Н. П. Использование компьютерного моделирования для оценки электромагнитных загрязнений / Н. П. Воробьев, А. А. Сошников // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – С. 31–33.
4. Корнієнко І. В. Методика побудови просторової структури транкінгової системи зв'язку з ексцентричним розташуванням базових станцій в умовах радіоелектронного впливу противника : дис. ... канд. техн. наук : спец. 20.02.12 «Військова кібернетика, системи управління та зв'язок» / І. В. Корнієнко. – К. : НАОУ, 2006. – 251 с.
5. ICNIRP Guidelines For Limiting Exposure To The Time-Varying Electric, Magnetic And Electromagnetic Fields (Up To 300 GHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. 1998. Retrieved 2013-12-12.
6. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля. – Введ. 1986-01-01. – М. : ИПК Издательство стандартов, 2002. – 12 с.
7. Макаров В. З. Эколого-географическое картографирование городов / В. З. Макаров, Б. А. Новаковский, А. Н. Чумаченко. – М. : Научный мир, 2002. – 140 с.
8. Черенкова Е. Л. Распространение радиоволн / Е. Л. Черенкова, О. В. Чернышов. – М. : Радио и связь, 1984. – 272 с.
9. Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / Е. Л. Фейнберг. – 2-е изд. – М. : Наука. Физматлит, 1999. – 496 с.