

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ КЛІТИННОЇ УРБАНІЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ФОРМИ ТУРИСТИЧНИХ ПОСЕЛЕНЬ

Research analysis in the field of cellular-automata simulation of the urban areas was conducted. The algorithm of receiving fractal structures of tourist settlements is considered on the basis of cellular urban model. The similarity degree calculation of the fractals and real objects from Google Maps is carried out with determination of area, perimeter and fractal dimensions of figures.

Keywords: *cellular automata, fractal, cellular urbanization, probability field.*

Проведено аналіз досліджень у сфері клітинно-автоматного моделювання урбанізованих територій. Розглянуто алгоритм отримання фрактальних структур туристичних поселень на основі моделі клітинної урбанізації. Здійснено розрахунок ступеня схожості фракталів і об'єктів Google Maps з визначенням площі, периметра і фрактальної розмірності фігур.

Ключові слова: *клітинні автомати, фрактал, клітинна урбанізація, поле ймовірності.*

Постановка задачі. Туристична індустрія є однією з найбільш динамічних і прибуткових галузей Карпатського регіону, розвиток якої залежить від ефективного і обґрунтованого прийняття управлінських, стратегічних та інвестиційних рішень. Прийняття рішень в умовах невизначеності, відсутність чітких вимог і “розмитість” бажань туристів вимагають всебічного дослідження туристичної галузі регіону. Ефективне керування такою складною системою зумовлює необхідність моделювання грошових, рекреаційних, транспортних, інформаційних потоків, прогнозування зростання туристичних містечок і розвитку їх внутрішньої інфраструктури. Це дасть змогу планувати розвиток відповідної інфраструктури з максимальною ефективністю.

Метою цієї роботи є симуляція динаміки розвитку типових туристичних містечок Карпатського регіону за допомогою моделі клітинної урбанізації Cellular Urban Model (CUM) і проведення аналізу, що дає змогу встановити ступінь точності отриманих результатів.

Актуальність дослідження полягає у розробленій методології прогнозування процесу розбудови туристичних поселень на базі методів фрактального росту кристалів у поєднанні з теорією нечіткої логіки та методів порівняння отриманих результатів з реальними даними.

Аналіз літератури. Одним з методів, що використовується для моделювання урбанізації території, є модель клітинної урбанізації cellular urban model (CUM). У статті [10] використовуються клітинні автомати (КА) для моделювання динаміки розвитку урбанізації китайського міста Шеньжень. Визначення нелінійних правил переходів для КА проводиться з допомогою методу опорних векторів. Для оцінки точності моделювання проводиться поклітинне порівняння отриманого фракталу і світлин з космосу (Landsat TM images). У статті [11] проведено розрахунок клітинних ідентифікаторів (периметр, фрактальна розмірність, площа та ін.) на основі обробки зображень. Апробація проводилась у процесі моделювання розвитку японського містечка Iwaki Newtown та виявила високий рівень адекватності. В статті [4] проведено моделювання міста Дублін за період 1968–1998 рр. Порівняння результатів моделювання з реальними даними проводилось за допомогою радіальної розмірності і поклітинного порівняння матриць. Методи обчислення клітинних ідентифікаторів подано в роботах [2, 5].

Огляд літератури виявив схожість методів розрахунку точності отриманих структур, в основі яких лежить визначення клітинних ідентифікаторів. Розглянуті підходи моделювання урбанізації базуються на лінійних методах побудови поля ймовірності і лише частково враховують нелінійність, що дає змогу отримати непогане узгодження форми периферії з експериментом. Для підвищення точності моделювання і врахування нелінійності у процесі побудови поля ймовірності урбанізації авторами запропоновано використовувати гібридні нейронні мережі.

Формалізація моделі. Модель SUM базується на теорії дискретної дифузійно-обмеженої агрегації та реалізована за допомогою асинхронних клітинних автоматів. Алгоритм Cellular Urban Model для розрахунку фрактальної структури населених пунктів складається з таких кроків:

Крок 1. Визначення вхідних параметрів.

В ізотропному середовищі розвиток населеного пункту відбувається симетрично [5]. В реальних умовах виникає деформація міста від сферичності, а основними факторами деформації є дороги та існуюча інфраструктура.

Як показано в роботах [7, 10], існує ряд ключових факторів, що визначають анізотропію міста. В роботі [10] для моделювання розвитку міста Шеньжень як змінні моделі беруться такі параметри: відстань до найближчого автобану, автодороги, центру міста, залізничної станції. В моделі [7] визначено сім параметрів, що тісно пов'язані з рушійними силами і обмежувальними факторами процесу урбанізації. Крім наведених вище змінних, модель охоплює: відстань до аеропорту, об'їзної дороги і метрополітену. Ці моделі використовують для відображення процесу урбанізації великих міст і враховують характерні особливості, що притаманні для їх розвитку і розширення.

Крок 2. Визначення поля ймовірності урбанізації.

Для побудови фрактальної структури реальних населених пунктів необхідно враховувати поле ймовірності урбанізації. В роботі [10] для визначення ймовірності урбанізації території використовувався метод опорних векторів, який є лінійним методом і базується на базі навчальної вибірки. Автори пропонують додатково враховувати нелінійність. Серед інших методів визначення поля ймовірності можна виділити такі: метод вагових матриць [12], модель SLEUTH [6], логістична регресія [13], нечіткі мережі [9], дерева рішень [8]. Серед приведених способів найбільш адекватним виявилось використання нечітких мереж.

В розрахунках для врахування нелінійності пропонується використати апарат Data Mining, що являє собою процес знаходження в необроблених даних раніше невідомих, нетривіальних, практично корисних і доступних інтерпретації знань, необхідних для прийняття рішень в різних сферах діяльності. Причому з ГІС можна легко отримати навчальні вибірки для аналізу. Оскільки поле ймовірності складно формалізувати, а аналітичного вигляду залежності для його знаходження немає, то для знаходження прихованих залежностей використана адаптивна система нейро-нечіткого виводу ANFIS. Такі системи дають можливість розробляти й представляти моделі систем у формі правил нечітких продукцій, які володіють наочністю змістовної інтерпретації. З іншого боку, для побудови правил нечітких продукцій використовуються методи нейронних мереж.

Для побудови навчальної вибірки навколо визначених туристичних містечок визначалась область радіусом декілька кілометрів. Із заданої області випадковим чином вибирались точки, для яких визначались координати, наявність об'єктів інфраструктури (автомобільних доріг, залізничних шляхів, селищ). Крім цього, розраховувалась відстань до найближчої автодороги, залізничної станції і центру вибраного населеного пункту.

Крок 3. *Моделювання фрактального зростання населених пунктів.*

Модель клітинної урбанізації CUM являє собою багатопшарову систему, кожен прошарок якої є матрицею рухомих частинок, агрегованих частинок, обмежень та ймовірності урбанізації, що визначені на кроці 2. Позначимо матрицю рухомих частинок як c_1 , а матрицю агрегованих частинок як c_2 . Моделювання здійснюється за таким алгоритмом:

3.1. Ініціалізується нульова матриця c_2 .

3.2. Створюється затравка в c_2 у вигляді одиничних комірок, що відповідають існуючій забудові. У процесі моделювання нового населеного пункту одиничні елементи відповідатимуть положенню атракторів.

3.3. Випадковим чином заповнюється матриця дифундуючих частинок c_1 .

Позначимо ймовірності переходів частинок $p_i, i=1, \dots, 4$. Для визначення напрямку переходу величини p_i нормуються:

$$\bar{p}_i = \frac{p_i}{\sum_i p_i}. \quad (1)$$

Після цього розраховуються інтегровані ймовірності p_{int} :

$$\begin{aligned} p_{\text{int}1} &= \bar{p}_1, & p_{\text{int}2} &= \bar{p}_{\text{int}1} + \bar{p}_2, \\ p_{\text{int}3} &= \bar{p}_{\text{int}2} + \bar{p}_3, & p_{\text{int}4} &= \bar{p}_{\text{int}3} + \bar{p}_4. \end{aligned} \quad (2)$$

Вибирається ξ з однорідного розподілу від 0 до 1. Залежно від ξ визначається індекс комірки, в якій буде взаємодіяти c_1^1 :

$$k = \begin{cases} 1, & \xi < p_{\text{int}1} \\ 2, & p_{\text{int}1} < \xi < p_{\text{int}2} \\ 3, & p_{\text{int}2} < \xi < p_{\text{int}3} \\ 4, & p_{\text{int}3} < \xi < p_{\text{int}4}. \end{cases} \quad (3)$$

3.4. Для випадково вибраної комірки з c_1 згідно з (3) визначається напрямок дифузії. Реалізується дифузія та агрегація частинки (4).

$$\begin{cases} c_1^i = c_1^i + s(c_1^2 - c_1^1)(1 - c_2^1)(1 - c_2^2), \\ c_2^i = c_2^i + c_2^{i+s}(1 - c_2^i)c_1^i, \end{cases} \quad (4)$$

де c_j^i – величина j -ї характеристики i -го клітинного автомату $i=1, 2$ – індекси двох взаємодіючих клітин, $s = +1$ при $i = 1$, $s = -1$ при $i = 2$.

3.5. Якщо агрегація задовольняє всім умовам матриць обмежень на агрегацію частинки, то відбувається перехід до наступного кроку алгоритму; в іншому випадку частинка вилучається з матриці c_2 .

3.6. У разі досягнення кількості ітерацій кратній емпіричній величині N реалізується “підживлення” матриці c_1 на гранях новими вільними дифундуючими частинками.

3.7. Перехід до 3.4.

Для розрахунку ступеня схожості форми фракталу і об’єктів моделювання є співвідношення, запропоноване Мандельбротом [3]:

$$\rho = \frac{P^{1/D}}{S^{1/2}}, \quad (5)$$

де P – периметр фрактальної лінії досліджуваного об'єкта; D – фрактальна розмірність Хаусдорфа–Базікевича; S – площа досліджуваного об'єкта.

Для розрахунку фрактальної розмірності Хаусдорфа–Базікевича [3] використовується така формула:

$$D(R) = 2 + \frac{\log(n/N)}{\log(R)}, \quad (6)$$

де R – радіус досліджуваної частини матриці; N – кількість комірок, що містить досліджувана область матриці; n – кількість одиничних клітинок в досліджуваній області матриці.

Комп'ютерний експеримент. Для проведення аналізу отриманих фрактальних структур з реальними об'єктами інфраструктури були використані картографічні дані м. Ворохта з Google Maps (рис. 1а). Переведення зображення у матричну структуру проводилось згідно з таким правилом: якщо територія, яку покриває клітинка, є урбанізованою на 50% і більше, то цій клітинці присвоюється одиничне значення. В іншому випадку присвоюється нульове значення.

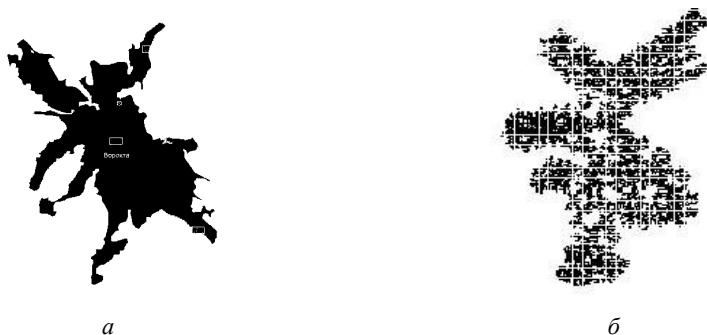


Рис. 1. Місто Ворохта: а – вигляд в картах Google; б – отримана фрактальна структура.

Для побудови навчальної вибірки були вибрані найбільш типові туристичні місечка Українських Карпат, а саме: с. Яблуниця, м. Яремче, с. Мигово, смт. Славське, с. Паляниця. Навчальна множина являє собою кортеж у вигляді $p = \langle x_1, x_2, x_3 \rangle$, де x_1 – відстань до центру населеного пункту; x_2 – відстань до найближчої автодороги; x_3 – відстань до залізничної станції. Для проведення експерименту використовувалась геоінформаційна система MapInfo. У цій роботі було сформовано навчальну вибірку даних, що містить 5000 значень. Отже, модель просторових розподілів ймовірності урбанізації може бути записана так:

$$p = (x_1, x_2, x_3), \quad (7)$$

де p – ймовірність урбанізації території.

В результаті була побудована гібридна нейронна мережа, що містить 3 вхідні змінні, одну вихідну змінну, кожна з яких описується 3-ма термами. В результаті навчання сформовано 27 правил нечітких продукцій. Використовувалися гаусівські функції приналежності, оскільки їх застосування показало найкращий результат, що було доведено в попередніх роботах [1].

На основі побудованого поля ймовірності була змодельована фрактальна структура м. Ворохта за допомогою моделі СМ. На рис. 1б зображена картина фрактального росту на полі клітин розміром 200×200 в момент часу, що відповідає кількості міжклітинних взаємодій, що дорівнює 7 млн. Час моделювання на комп'ютері з процесором Pentium Dual-Core T4200 CPU 2 GHz становив 15 хв.

Для порівняння ступеня схожості картографічного зображення м. Ворохта і отриманої фрактальної структури використовувалися формули (5), (6). Розраху-

нок периметру здійснювався на основі алгоритму, що складається з таких кроків:

- 1) виділення контуру досліджуваного об'єкта;
- 2) вибір будь-якої одиничної комірки контуру з координатами (x, y) ;
- 3) вибір радіусу і виділення околу навколо вибраної точки;
- 4) знаходження відстані від вибраної точки (x, y) до всіх точок цього околу.

Розрахунок відстані проводився за формулою

$$d = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}, i = 1, \dots, n ; \quad (8)$$

5) вибір точки в околі з одиничним значенням, що має найбільшу відстань до початкової точки;

6) очищення околу і вибір знайденої точки як початкової;

7) повторення кроків 4-6 до того часу, поки в матриці не залишиться одиничних комірок.

Для розрахунку периметру було проведено серію експериментів з різними значеннями радіусу околу. Результати зображено на рис. 2.

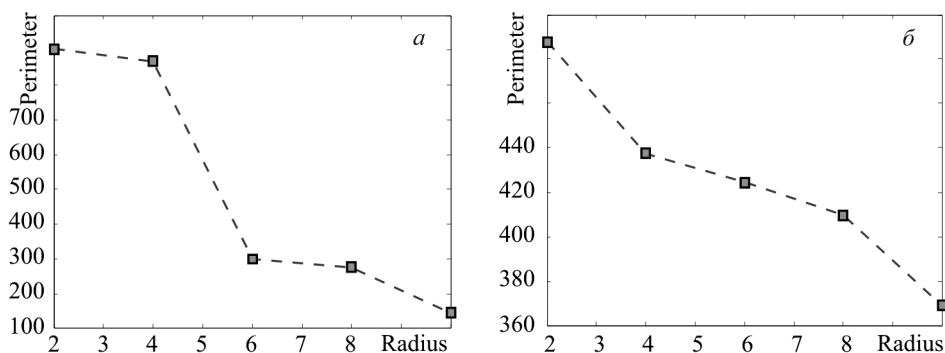


Рис. 2. Залежність периметру контуру від радіусу околу для м. Ворохта: *a* – реальна структура; *б* – змодельований фрактал.

З рис. 2 видно, що зі збільшенням радіусу периметр контуру поступово зменшується. На рис. 2 найбільш точні значення периметру було отримано при значеннях радіусу $R = 2, 4$. Це пов'язано з тим, що контур міста (рис. 1*a*) є сильно “порізаний” і невелика довжина радіусу дає змогу максимально точно обгинати контур туристичного містечка. Причому подальше збільшення радіусу окружності призводить до зменшення величини периметру. Тобто, чим менше радіус, тим точніше вимірюється периметр контуру.

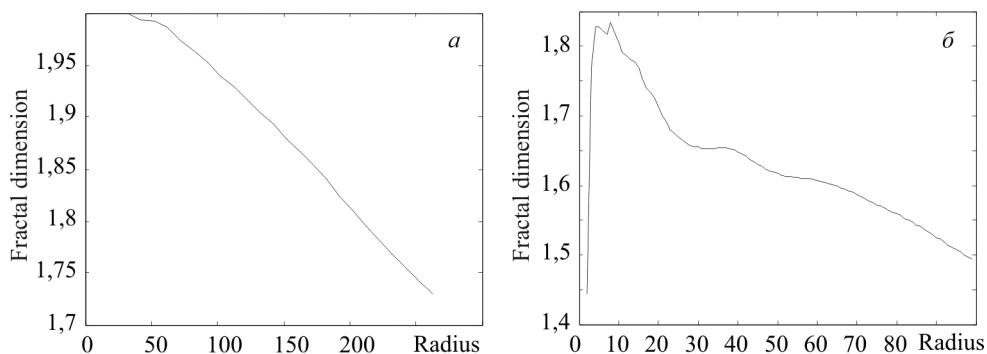


Рис. 3. Фрактальна розмірність для м. Ворохта: *a* – реальна структура; *б* – змодельований фрактал.

Розрахунок фрактальної розмірності D здійснювався згідно з (6) з початковою величиною радіуса $R = 2$. Результати обчислень подано на рис. 3.

В результаті розрахунків для оригінального зображення Ворохти (рис. 1а) були отримані такі значення: $D = 1,98$; $s = 62219$; $\rho_1 = 0,0867$. Відповідно для отриманого фракталу (рис. 1б): $D = 1,8349$; $s = 52329$; $\rho_2 = 0,0733$. Час моделювання для визначення фрактальної розмірності D становив близько 10 секунд, а для розрахунку периметру і ступеня схожості ρ – 30 сек.

Критерієм точності є відносне відхилення ρ_2 від ρ_1 :

$$\varepsilon = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Відхилення змодельованого фракталу від оригінального вигляду міста становить 15%. Похибка пов'язана з побудовою поля ймовірності урбанізації для методу SUM на основі ГІС, де межі міста не є деталізованими.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано доцільність застосування SUM для моделювання динаміки просторового поширення. Апробація алгоритму проводилась на туристичному курорті українських Карпат – м. Ворохта. Отриманий фрактал за формою, розмірністю та ступенем схожості виявив достатній рівень точності, а відхилення від реальної структури міста становило 15%.

1. *Виклюк Я. І., Гаць Б. М.* Методи розрахунку і побудови просторових полів ймовірності урбанізації // Вісник Націон. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". Зб. наук. праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – 2010. – № 31. – С. 42–48.
2. *Камінський Р.* Реалізація принципу розгортки в задачах синтезу і моделювання тестових зображень для дослідження людино-машинних інтерфейсів // Інформаційні технології і системи – 1998. – 1, № 1/2. – С. 145–151.
3. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. Пер. с англ. А. Р. Логунова. – М.: Инс-т компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
4. *Modelling dynamic spatial processes: simulation of future scenarios through cellular automata / J. Barredo, M. Kasanko, N. McCormick, C. Lavalle // Landscape and urban planning. – 2003 – Vol. 64. – P. 145–160.*
5. *Batty M., Longley P.* Fractal cities. – Academic Press, London and San Diego, 1996. – 394 p.
6. *Clarke K. C., Gaydos L.* Loose-coupling of a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore // Int. J. Geographical Information Science. – 1998 – Vol. 12 (7). – P. 699–714.
7. *Modelling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China / C. He, N. Okada, Q. Zhang, P. Shi, J. Zhang // Applied Geography. – 2006. – 26. – P. 323–345.*
8. *Herold M., Goldstein N. C., Clarke K. C.* The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modelling // Remote Sensing of Environment. – 2003. – 86. – P. 286–302.
9. *Li X., Yeh A.G.O.* Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS // Int. J. Geographical Information Science. – 2002. – Vol. 16. – P. 323–343.
10. *Qingsheng Yanga, Xia Lia, Xun Shi* Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines / Qingsheng Yanga, Xia Lia, Xun Shi // Computers & Geosciences. – 2008. – № 34. – P. 592–602.
11. *Teknomo K., Gerilla G. P., Hokao K.* Cellular Urban Descriptors of Lowland Urban Model // Proc. Int. Symposium of Lowland Technology. – Bangkok, 2004. – September. – P. 297–302.
12. *White R., Engelen G.* Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns // Environment and Planning A. – 1993. – Vol. 25(8). – P. 1175–1199.
13. *Wu F.* Calibration of stochastic cellular automata: the application to ruralurban land conversions // Int. J. Geographical Information Science. – 2002. – Vol. 16 (8). – P. 795–818.