

УДК 004.942, 004.891.2, 004.021

Я.І. Вуклюк

НУ «Львівська політехніка», м. Львів, Україна
vyklyuk@ukr.net

Математичне моделювання просторової організації поселень методами стохастичних броунівських фрактальних поверхонь та нечіткої логіки

Проведено аналіз досліджень у сфері фрактального моделювання урбанізованих територій. Розроблена методика моделювання просторової структури туристичних поселень на основі стохастичних броунівських поверхонь у нечіткому імовірнісному полі. Апробація розробленої моделі на реальних об'єктах підтвердила високий рівень адекватності і точності.

Вступ

Для математичного моделювання просторової структури систем різної природи досить часто використовуються математичні фрактали. До таких систем відносяться дерева, нервові та кровоносні системи, кристали, сніжинки, берегові лінії, континенти, острови, населені пункти. Одною з найбільш актуальних задач туристичної галузі, яка активно розвивається в західних регіонах, є прогноз структури та форми туристичних поселень та урбанізованих територій. Низький рівень адекватності класичних математичних моделей ставить перед науковцями питання про розробку та впровадження сучасних методів математичного моделювання, таких, як SoftComputing та фрактальна геометрія.

Метою наукових досліджень просторової організації було вивести ідеалізовану теорію розбудови міст в рамках жорстких обмежень. Довгий час просторова організація міст описувалась за допомогою геометрії Евкліда. Однак ідеалізовані міста були далекі від реально існуючих. Основною проблемою була саме неможливість застосування класичної математики до реальних об'єктів. За допомогою геометрії Евкліда можна виміряти такі фундаментальні величини, як довжина, площа тощо. Однак у реальних містах базовою «цеглиною» в більшості випадків є одиночний будинок. Будинки, в свою чергу, утворюють квартали. Кwartали утворюють самоподібну структуру, що залежить від спеціалізації атракторів, навколо яких ведеться забудова міста. Як атрактори можуть виступати завод, розважальний центр, церква, ринкова площа міста тощо [1].

Згідно з геометрією Евкліда ідеальні міста мають характеризуватись регулярністю, в той самий час переважна більшість міст є нерегулярною та може бути описана геометрією Мандельброта [2]. У першому випадку міста повинні мати сферичну форму. Насправді, на форму міст впливають транспортні шляхи, що деформують сферу вздовж транспортних артерій (рис. 1) [3]. Класично міста представляються у вигляді абсолютної регулярної дискретної сітки основних типів поселень, що систематично урбанізовані та утворюють міста, села та регіони. Насправді, поселення характеризую-

тяться неперервною структурою та можуть займати нецілу кількість клітинок або розташовуватись на гранях сітки. Аналогічно виникає проблема з визначенням периметра населеного пункту. При будь-якому збільшенні масштабу вимірювання з'являються нові нерівності в структурі. У граничному випадку периметр буде прямувати до безмежності. Як було показано в роботі [4], такі структури володіють нецілою розмірністю Хаусдорфа-Базікевича, а самі системи можуть бути змодельовані за допомогою фрактальної геометрії. Нормою в містобудівних системах є представлення міста у вигляді вулиць та будинків. Часто при будівництві нових житлових масивів приймається рішення про будівництво паралельних та прямих вулиць. Міста, які мають багатовікову історію та розвивались без генерального планування, не містять паралельних вулиць, чистої симетрії і на перший погляд володіють хаотичною структурою. Однак ця хаотична та самоподібна структура утворює гармонійне місто. Можна зробити висновок, що нерегулярність та нерівномірність форм сучасного міста є нормою, а не винятком.

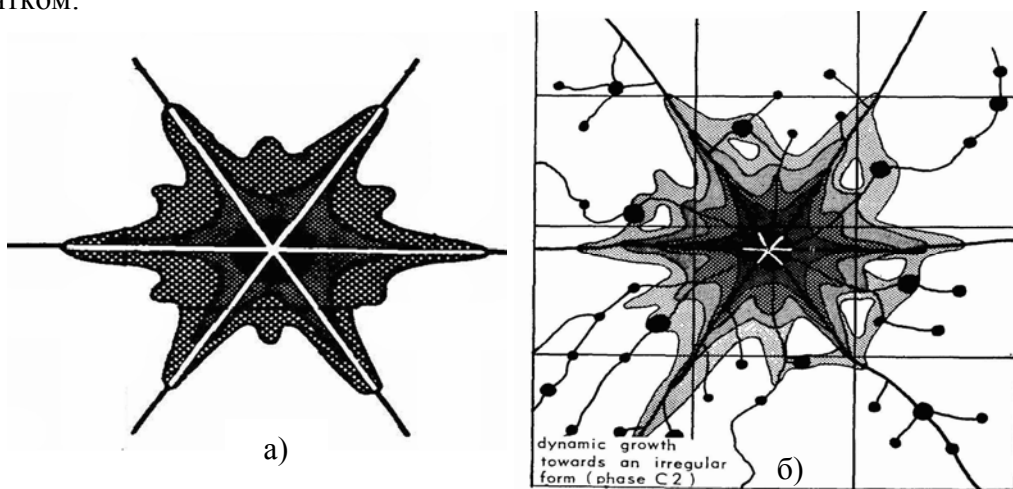


Рисунок 1 – Форма гармонійного розвитку міст (а) з врахуванням основних транспортних шляхів, (б) з врахуванням доріг [3]

При дослідженні просторового розвитку урбанізованих систем прийнято виділяти внутрішню структуру та периферію. Для моделювання внутрішньої структури широко використовуються математичні самоафінні фрактали [5], [6]. Моделювання периферії населених пунктів, як правило, проводиться методами фізичних фракталів, а саме за допомогою дифузно-обмеженої агрегації та клітинними апаратами.

Достатньо відомим методом моделювання урбанізації території є модель клітинної урбанізації (Cellular Urban Model) [7]. Для визначення імовірнісних правил неперервної дифузії частинок використовувались навчальні множини, отримані за допомогою ГІС технологій. Врахування нелінійності проводилось за допомогою методу опорних векторів. Запропонований підхід був апробований при моделюванні розвитку міста Шензен, Китай, та показав високу точність. У праці [8] запропоновано провести розрахунок імовірнісного поля за допомогою математичних методів, що застосовуються при обробці зображень. Моделі були апробовані при моделюванні розвитку гірського містечка Iwaki Newtown та показали високий рівень адекватності. Використання Cellular Urban Model до моделювання двох різних столичних районів у Португалії [9] дозволило провести порівняльний аналіз динаміки розвитку досліджуваних регіонів. У статті [10] вдосконалюється апарат Cellular Urban Model у рамках формалізму ГЕО-алгебри та представлений механізм інтеграції між даними ГІС та традиційними класами міських і

регіональних моделей. Детальний опис математичного апарату Cellular Urban Model наводиться в дослідженні [11]. Тут же наводиться моделювання розвитку міста Сага, Японія.

Дані підходи дозволяють отримати непогане узгодження форми периферії з експериментом, однак втрачається інформація про внутрішню структуру міста.

Мета і актуальність дослідження

Метою даної роботи є розробка методики моделювання динаміки розвитку просторової форми населених пунктів, що спеціалізуються на туристичних послугах, методами броунівських фрактальних поверхонь.

Актуальність дослідження полягає у розробці методики прогнозування слабо контрольованих соціальних процесів, таких, як розбудова міст та населених пунктів, пов'язана з активним розвитком зеленого туризму, утворення супутньої інфраструктури, розділення людей на сегменти за спільними інтересами, роботою, відпочинком тощо на базі математичних фракталів у поєднанні з теорією нечіткої логіки.

Математична модель

При моделюванні просторового розвитку невеликих туристичних містечок необхідно виділити особливості їх розвитку, що стануть основою для вибору методу та алгоритму моделювання.

Перш за все, форма периферії таких утворень розвивається самостійно, без генерального планування. Під формою будемо розуміти просторову структуру елементів, з яких складаються міста, до яких можна віднести інфраструктурні мережі, будівлі, урбанізовані території, та визначається через її геометрію виключно у двох, а не трьох вимірах. Відсутність генерального планування означає відсутність чітких границь населеного пункту. Адже периферію забудовує або місцеве населення, або малий та середній бізнес, що власноруч приймає рішення про викуп землі та розбудову. Тобто наявність чи відсутність забудови можна визначити, ввівши імовірність урбанізації.

По-друге, туристичні містечка орієнтовані на пішоходів. Це накладає обмеження на просторовий розмір населених пунктів. Адже розбудова таких поселень пов'язана з наданням послуг із розселення туристів, що приїхали заради відпочинку на атракторах, до яких можна дістатись пішки. Збільшення розмірів поселень призводить до необхідності введення міського транспортного сполучення. Що вимагає використання інших підходів та моделей.

По-третє, на відміну від великих міст, що містять декілька атракторів з різною спеціалізацією, туристичні містечка орієнтовані на надання однотипних послуг, перелік яких диктується рекреаційним атрактором. Тому в останніх відсутня яскраво виражена сегментація на зони спеціалізації.

По-четверте, внутрішня структура туристичних містечок в основному зумовлена під'їзними шляхами, якими рухаються туристичні потоки. А дороги-обмеження кварталів містечок не варто враховувати у зв'язку з тим, що це, як правило, ґрунтові дороги і вони можуть бути легко змінені за напрямком, за умови розбудови.

Можна прийти до висновку, що основними факторами, які визначають привабливість території для забудови, є координати атракторів, відстань до останніх по основних транспортних шляхах та відстань по ґрунтовій дорозі до траси. Такі величини, як водойми, річки, залізниця тощо виступають у ролі обмежень. Вищевказані вхідні пара-

метри та обмеження можна отримати з ГІС систем. Більшість з них містяться в даних системах явно, а деякі потребують додаткових розрахунків. Методика розрахунку віддалі дорогою до атрактора та відстані до траси детально представлена в попередній роботі автора [12]. Як було показано в даній статті, поле імовірності урбанізації зручно описати за допомогою апарата нечіткої логіки [13].

У загальному випадку імовірність P записуємо у вигляді

$$P = F(h, l), \quad (1)$$

де h, l – відповідно відстань до дороги та оптимальна відстань по трасі до найближчого атрактора. Алгоритм побудови продукційних правил та розрахунку просторового розподілу густини імовірності детально представлений в роботі [12].

Як було сказано вище, просторова форма населених пунктів володіє фрактальними властивостями, аналогічними тим, якими характеризуються такі фізичні об'єкти, як форма берегової лінії, острови, континенти [14], [15]. Одним з ефективних підходів до моделювання таких систем є броунівські фрактальні поверхні, запропоновані Мандельбротом [16]. Дані поверхні моделюються шляхом імітації трьохвимірного броунівського руху.

Більшість соціальних випадкових процесів описуються нормальним розподілом [14], [17]. До таких процесів відноситься і випадковий броунівський рух. За допомогою останнього можна з високою точністю описати просторове переміщення людей. Як було описано вище, забудова туристичних поселень активізується поблизу атракторів. Тому для визначення випадкових координат у певний момент часу t скористаємось наближенням руху броунівської частинки. Хай в момент часу $t = 0$ частинка розташовується в точці з координатами атрактора $(x_0, y_0) = (x_a, y_a)$. Тоді в момент часу $t = t + 1$:

$$\begin{aligned} x_{t+1} &= x_t + g_x(\mu, \sigma); \\ y_{t+1} &= y_t + g_y(\mu, \sigma), \end{aligned} \quad (2)$$

де g_i – випадкове зміщення з нормальним математичним сподіванням μ та дисперсією σ^2 . Тобто імовірність частинки зміститись на величину $\Delta x = x_{t+1} - x_t$ складає:

$$f(\Delta x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta x - \mu}{\sigma}\right)^2}. \quad (3)$$

Броунівський рух припиняється в двох випадках: або частинка віддалиться на визначену відстань L від атрактора $\left(\sqrt{(x_a - x_r)^2 + (y_a - y_r)^2} > L\right)$, або буде перевищений поріг ітерацій.

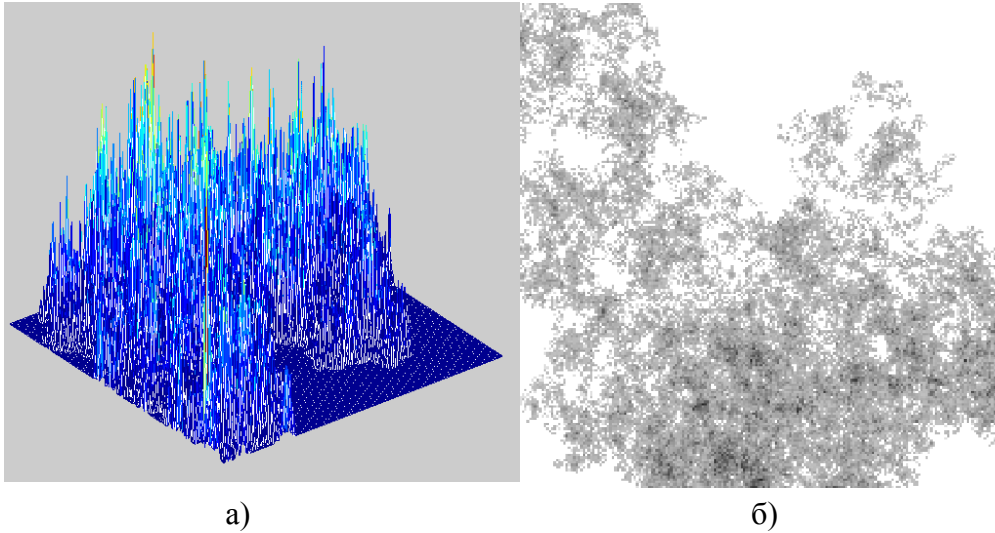
Для побудови броунівської поверхні ініціалізується нульова матриця $Z(x, y)$. Для кожної з випадкових величин $Z(x_{t+1}, y_{t+1})$ визначається випадкова величина приросту:

$$\Delta Z = Z(x_t + \Delta x, y_t + \Delta y) - Z(x_t, y_t), \quad (4)$$

яка має гаусівський розподіл з математичним сподіванням 0 і дисперсією $\sigma^2 \sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}^{2H}$, де σ – невід'ємна константа, H – коефіцієнт Херста, що для броунівського руху становить 1/2 [15]. Тобто імовірність приросту складає:

$$P(\Delta Z < s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{2H}}} \int_{-\infty}^s \left(\frac{u^2}{2\sigma^2(\Delta x^2 + \Delta y^2)^{2H}} \right) du. \quad (5)$$

Фрактальна розмірність такої поверхні (рис. 2) має розмірність $D = 3 - H$.



а) б)
Рисунок 2 – Стохастична фрактальна броунівська поверхня (а) та зрізи висот (б). Матриця 200×200

Основними відмінностями при моделюванні туристичних поселень методами броунівських поверхонь є наявність поля імовірності забудови та множини атракторів.

Поле може бути просто враховане за рахунок добутку розрахованого приросту (4) на величину імовірності забудови в даній точці:

$$\Delta Z'(x_t, y_t) = \Delta Z(x_t, y_t) \cdot P(x_t, y_t). \quad (6)$$

У випадку існування n атракторів $A_i(x_{a_i}, y_{a_i})$, $i = \overline{1, n}$, для кожного з них визначається нормована вага w_i . Вагові множники розраховуються як відносна кількість туристів, які відвідали дані об'єкти за визначений період часу:

$$w_i = \frac{S_i}{\sum_{i=1, n} S_i}; \quad (7)$$

де S_i – кількість туристів, які відвідали i -й рекреаційний об'єкт. Для вибору атрактора, відносно якого буде здійснюватись броунівський рух, визначаються інтегровані вагові множники:

$$\begin{aligned} w'_1 &= w_1; \\ w'_{i+1} &= w'_i + w_i; \end{aligned} \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Вибирається ξ з однорідного розподілу від 0 до 1. У залежності від ξ визначається індекс атрактора:

$$k = \begin{cases} 1 & \xi < w'_1 \\ 2 & w'_1 \leq \xi < w'_2 \\ \dots & \dots \\ n & w'_{n-1} \leq \xi < w'_n \end{cases}. \quad (9)$$

Тоді координати атрактора: $(x_a, y_a) = A_k(x_{a_k}, y_{a_k})$.

Запропонований метод моделювання просторової форми туристичних поселень зручно представити у вигляді наступного алгоритму (рис. 3):

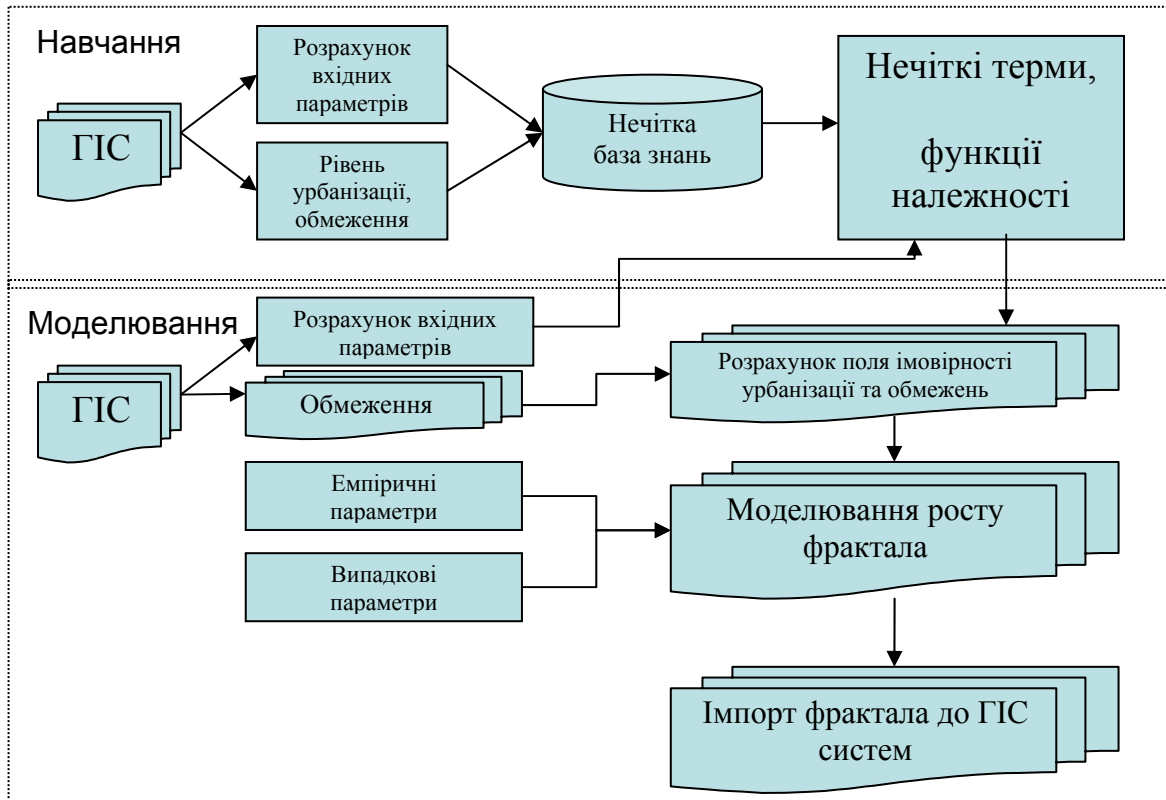


Рисунок 3 – Структурна схема алгоритму моделювання фрактальної структури туристичних поселень

Алгоритм моделювання

Крок 1. Створення нечіткої бази знань.

При використанні ГІС систем формується нечітка база знань. Для побудови навчальної множини розраховуються значення h та l для випадкових географічних координат в околі реально існуючих туристичних поселень. Як нечіткий висновок указується рівень урбанізації території для вибраної точки. В результаті навчання формуються нечіткі терми та продукційні правила.

Крок 2. Розрахунок поля імовірності урбанізації та обмежень.

Використовуючи нечітку базу знань, отриману на кроці 1, розраховується матриця поля імовірності. За допомогою ГІС системи формуються матриці обмежень.

Крок 3. Моделювання росту фрактала.

- 3.1. Ініціалізується початковий нульовий профіль поверхні $Z(x, y)$.
- 3.2. Визначаються початкові координати броунівської частинки (9).
- 3.3. Розраховується зміщення частинки (x_r, y_r) згідно з (2). Якщо частинка віддалилась більш ніж на L або перевищено число ітерацій, повернутись до 3.2.
- 3.4. Визначається приріст (6).
- 3.5. Перехід до 3.3.

Крок 4. Представлення результату.

Отриманий фрактал імпортується у ГІС системи у вигляді окремого прошиарку.

Комп'ютерний експеримент

Перевірка адекватності моделі проводилась для «ідеального» міста (рис. 1). Вхідними параметрами служили три вектори доріг, розташовані під кутом $\pi/3$ один до одного. Як атрактор виступала точка перетину доріг.

Для формування продукційних правил нечіткої моделі використовувались ландшафтні дані урбанізованих територій Карпатського регіону, отримані за допомогою ГІС систем. Усього навчальна множина містила близько 1000 записів.

Розраховане поле імовірності представлено на рис. 4 а). З рисунку видно, що поле імовірності за своєю структурою має багато спільного з рис. 1. Однак основна відмінність – симетричність поля. У розвитку урбанізованих територій завжди присутній елемент хаосу. Цей фактор можна врахувати за допомогою броунівських афінних стохастичних фрактальних поверхонь.

Для побудови фрактальних поверхонь використовувався алгоритм (рис. 3) з наступними наближеннями: матриця поверхні Z розмірністю 1000×1000 , $\mu = 15$, $\sigma^2 = 1$, кількість ітерацій склала $N = 10000$. Отримані в ході виконання алгоритму зрізи висот поверхні представлені на рис. 4 б). Для даного об'єкта перевірку адекватності моделі можна провести тільки на якісному рівні, тому що місто, представлене на рис. 1 – ідеалізований випадок. З рисунку видно, що на початкових етапах розвитку на форму міста слабо впливають транспортні мережі і населений пункт має сферичну форму. Це підтверджується і нашими розрахунками (чорна область в центрі) (рис. 4 б). У подальшому розвитку все більше відчувається вплив транспортних мереж і населений пункт починає приймати форму шестикутної зірки (рис. 4 б). Ця особливість підтверджується і якісними дослідженнями роботи [3].

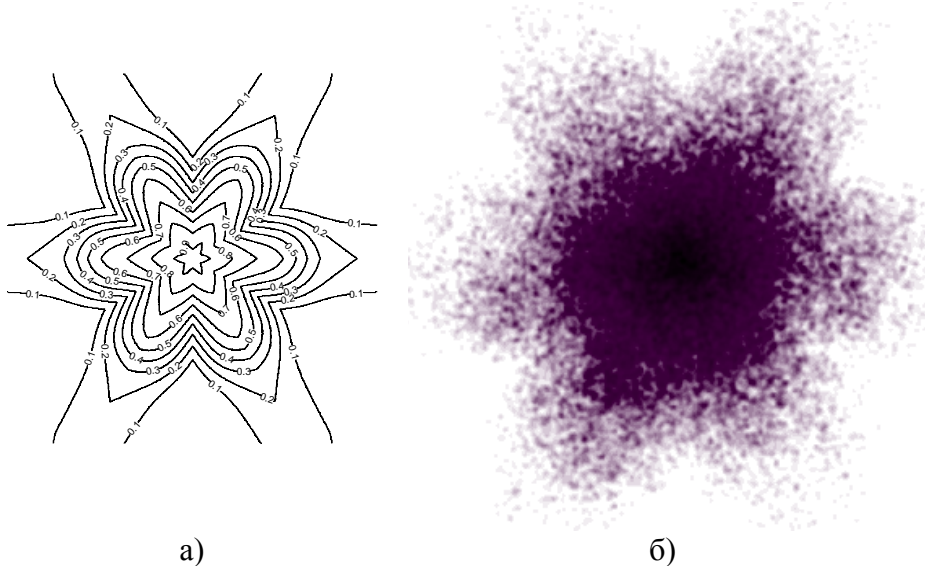


Рисунок 4 – «Ідеальне» місто:
а) нечітке поле імовірності урбанізації;
б) динаміка розвитку міста

Підтвердження адекватності наших розрахунків дозволяє провести моделювання просторового розвитку реальних туристичних містечок. Об'єктом дослідження було вибране відоме курортне містечко українських Карпат – Ворохти (рис. 5 б).

Як перше наближення під час розрахунку потенціального поля за вхідні параметри нечіткої моделі, основаної на алгоритмі нечіткого виводу Сугено, було вибрано координати гірськолижних витягів, віддалі до доріг і шлях дорогою до найближчого атрактора. Особливості рельєфу не враховували.

Розраховане навченою мережею нечітке імовірнісне поле представлено на рис. 5 а). З рисунку видно, що дане поле нагадує за формою урбанізовані території. В зоні максимальних забудов імовірність близька до 1. З віддаленням від центру міста імовірність спадає до 0. З рисунку видно, що градієнт спадання поля максимальний перпендикулярно до дороги. А вздовж доріг імовірність забудови спадає повільніше. Що підтверджує висновки роботи [3].

Емпіричні параметри алгоритму не змінювались. Отриманий після четвертого кроку алгоритму фрактал наведений на рис. 5 в).

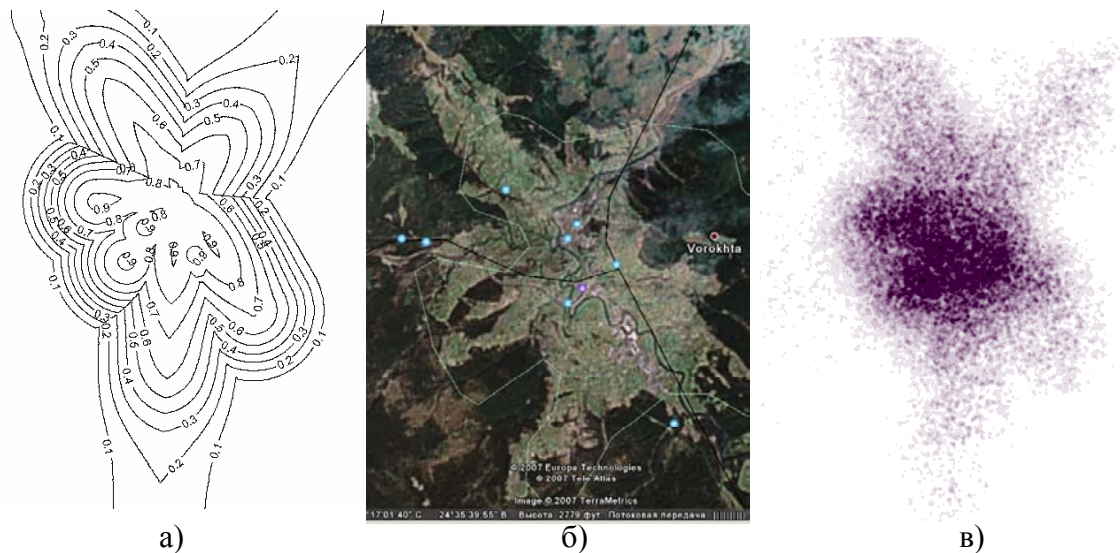


Рисунок 5 – Ворохта: а) нечітке поле імовірності урбанізації; б) світлина з космосу; в) розрахована динаміка фрактального росту

З якісного порівняння отриманого фрактала та реального населеного пункту можна прийти до висновку, що фрактал повторює основні особливості форми Ворохти. На під'їздах до містечка фрактал показує ріст населеного пункту вздовж доріг, а в центрі спостерігається складна структура, зумовлена полем імовірності та наявністю декількох атракторів. З рисунку видно, що на початкових етапах розвитку Ворохти забудова велась в основному біля атракторів. З часом, в процесі розростання міста, забудова починає тяжіти до транспортних шляхів – джерел рекреантів та транспортних потоків.

На жаль, нерівномірність розвитку та відсутність історичних аерофотозйомок не дає змоги порівняти часову залежність точності розрахунку. Тому порівнювалась лише сучасна форма міста з отриманим фракталом.

Критерієм ступеня схожості форми стохастичного фрактала до модельованого об'єкта виступає співвідношення, запропоноване Мандельбротом [14]:

$$\rho = \frac{P^{1/D}}{S^{1/2}}, \quad (10)$$

де P – периметр багатогранника, D – фрактальна розмірність, S – площа багатогранника.

Якщо профіль поверхні фрактала представлений у вигляді матриці, тоді фрактальну розмірність Хаусдорфа-Базікевича можна легко розрахувати згідно з [14]:

$$D(R) = 2 + \frac{\log(n_h/N)}{\log(R)}, \quad (11)$$

де R – радіус (лінійний розмір) досліджуваної частини матриці Z , N – кількість комірок, що містить досліджувана область, n_h – кількість клітинок, зайнятих фракталом у досліджуваній області матриці Z .

Якщо багатогранники подібні, то дане співвідношення для розрахованого фрактала (ρ_f) та населеного пункту (ρ_s) мають бути близькими.

Розрахована фрактальна розмірність отриманого стохастичного фрактала згідно з (11) для різних рівнів лежить в межах $D \in [1.21, 1.29]$. Для розрахунку фрактальної розмірності Ворохти територія покривалась сіткою, якій ставилась у відповідність матриця H' . Коміркам таблиці, яким відповідала урбанізована територія, присвоювалось значення 1, для неосвоєних територій – 0. Аналогічно розрахована фрактальна розмірність Ворохти становить $D \approx 1.273$. Близькість до одиниці фрактальної розмірності свідчить про те, що структура міста ближче до лінійної, чим до сферичної.

Периметри і площі побудованого фрактала та населеного пункту розраховувались шляхом підрахунку ненульових клітинок матриць Z та H' . У результаті найменше відхилення ρ_f від ρ_s становило 85%, що є підтвердженням адекватності та точності запропонованої моделі.

Висновки

У роботі наведено огляд можливих підходів до моделювання форм населених пунктів. Наведено особливості розвитку та внутрішньої структури невеликих туристичних поселень.

Обґрунтовано та наведено алгоритм розрахунку вхідних параметрів моделі. Представлено алгоритм побудови нечіткої бази знань та поля імовірності на основі нечіткого виводу Сугено. Запропоновано метод врахування поля імовірності забудови при побудові броунівського самоафінного фрактального рельєфу. Розроблено математичні методи моделювання броунівського руху для множини атракторів.

Розроблена методика моделювання фрактального росту населених пунктів представлена у вигляді покрокового алгоритму та структурної схеми.

Апробація алгоритму проводилась на туристичному курорті Українських Карпат – м. Ворохта. Отриманий фрактал за формою, розмірністю та ступенем схожості показав достатній рівень точності. Це підтверджує адекватність моделі.

До переваг такого підходу можна віднести можливість моделювання як форми, так і динаміку зростання населеного пункту в часі за допомогою математичних фракталів.

Література

1. Alexander C. A city is not a tree / C. Alexander // Architectural Forum. – 1965. – № 122 (1). – С. 58-62.
2. Mandelbrot B.B. Stochastic models for the earth's relief, the hape and fractal dimension of coastlines and the number-area rule for islands / B.B. Mandelbrot // Proceedings of the National Academy of Sciences USA. – 1975. – № 72. – С. 3825-3828.

3. Doxiadis C.A. *Ekistics: An Introduction to the Science of Human Settlements* / Doxiadis C.A. – London : Hutchinson, 1968.
4. Mandelbrot B.B. *Fractals – a geometry of nature* / B.B. Mandelbrot // *New Scientist*. – 1990. – № 127. – С. 38-43.
5. Reps J.W. *The Making of Urban America: A History of City Planning in the United States* / Reps J.W. – Princeton, NJ : Princeton University Press, 1965.
6. Keeble L. *Principles and Practice of Town and Country Planning* / Keeble L. – London : The Estates Gazette, 1959.
7. Qingsheng Yanga. *Cellular automata for simulating land use changes based on support vector machines* / Yanga Qingsheng, Lia Xia, Shi Xun // *Computers & Geosciences*. – 2008. – № 34. – С. 592-602.
8. Teknomo K. *Cellular Urban Descriptors of Lowland Urban Model* / K. Teknomo, G.P. Gerilla, K. Hokao // *Proceedings of International Symposium of Lowland Technology (Bangkok, September 2004)*. – С. 297-302.
9. Elisabete S. *Complexity, emergence and cellular urban models: lessons learned from applying SLEUTH to two Portuguese metropolitan areas* / S. Elisabete, C. Keith // *European Planning Studies*. – 2005. – № 13,1. – С. 93-115.
10. Couclelis H. *From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation* / H. Couclelis // *Environment and Planning B: Planning and Design*. – 1997. – № 24(2). – С. 165-174.
11. Teknomo K. *Stochastic cellular model for lowland urban development* / K. Teknomo, G. P. Gerilla and K. Hokao // *Lowland Technology Information Journal*. – 2006. – № 8, 1. – С. 1-10.
12. Vyklyuk Ya. *Crystal's fractal growth patterns in the fuzzy potential field for prognostication of socio-economic processes [Електронний ресурс]* / Ya. Vyklyuk // *Information Technology for Economics & Management*. – 2009. – V. 5, № 1. – P. 1.
13. Заде Л.А. *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений* / Заде Л.А. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
14. Федер Е. *Фракталы* / Е. Федер ; [пер.с англ.]. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
15. Кроновер Р.М. *Фракталы и хаос в динамических системах* / Кроновер Р.М. – М. : Техносфера, 2006. – 488 с.
16. Мандельброт Б. *Фрактальная геометрия природы* / Б. Мандельброт ; [пер. с англ. А.Р. Логунова]. – М. : Институт компьютерных исследований, 2002. – 656 с.
17. Batty M. *Fractal cities* / M. Batty, P. Longley. – London ; San Diego : Academic Press, 1996. – 394 p.

Я.И. Виклюк

Математическое моделирование пространственной организации поселений методами стохастических броуновских фрактальных поверхностей и нечеткой логики

Проведен анализ исследований в области фрактального моделирования урбанизированных территорий. Разработана методика моделирования пространственной структуры туристических поселений на основе стохастических броуновских поверхностей в нечетком вероятностном поле. Апробация разработанной модели на реальных объектах подтвердила высокий уровень адекватности и точности.

Ya.I. Vyklyuk

Mathematical Modeling of Spatial Settlement Organization Using Methods of Stochastic Brownian Fractal Surfaces and Fuzzy Logic

Some studies in the field of urban territory fractal modeling were analyzed. The methodology of tourist's cities spatial structure modeling on the basis of stochastic Brownian surfaces in fuzzy probabilistic field is developed. Model adequacy was checked on real objects and showed high level of accuracy.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2010.