

УДК 711.4:004.94:519.87

С. І. Пустюльга

д.т.н., професор, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

В. П. Самчук*

к.т.н., доцент, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>

Кафедра будівництва та цивільної інженерії

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

Ю. С. Бондарчук

к.мист., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-9795>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

М. В. Заразка

аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7652-5563>

Кафедра архітектури та дизайну

Луцький національний технічний університет, вул. Львівська, 75, Луцьк, Україна, 43018

*автор-кореспондент, e-mail: volodsam@ukr.net

Дискретно-воксельна оптимізація параметричних моделей міської інфраструктури

Цитувати як:

Пустюльга, С. І., Самчук, В. П., Бондарчук, Ю. С., Заразка, М. В. (2026). Дискретно-воксельна оптимізація параметричних моделей міської інфраструктури. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 25, 35-52, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-03)

© 2026, Автори. Публікується згідно рекомендацій ліцензії [CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Анотація. У статті розроблено та апробовано метод дискретно-воксельного моделювання для кількісної оцінки змін параметрів мікрорайону при інтеграції у його інфраструктуру нового житлового об'єкта. Міський простір формалізовано у вигляді регулярної тривимірної решітки з дискретним описом функціонального стану кожного елемента.

На прикладі інтеграції у сформовану забудову 108-квартирного житлового будинку виконано симуляцію зміни таких показників: об'ємна та площинна щільність забудови, інсоляційний режим і баланс сонячного надходження, транспортна доступність, забезпеченість озелененням. Модель реалізовано в середовищі MagicaVoxel: базовий крок решітки прийнято 3 м, а стан вокселя кодує тип простору (збудова, транспорт, зелена зона тощо), що дозволяє алгоритмічно обчислювати площі, об'єми та просторові відстані. Для щільності використано глобальні та локальні оцінки, для інсоляції – розрахунок енергетичного балансу для розрахункового зимового дня, для доступності – мінімальний час до транспортних вузлів.

Встановлено, що при інтеграції 10-поверхової будівлі: об'ємна щільність

дискретної моделі існуючої забудови збільшується на 1,8%; інсоляційний потенціал зменшується на ~11%; середній час транспортної доступності зростає на 8–9%; показники озеленення знижуються на 2–3%, залишаючись у межах нормативів.

Проведено варіаційний аналіз поверховості (10–12–15 поверхів) та визначено граничні значення, при яких відбувається істотне погіршення інсоляційних та транспортних характеристик.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованою методу дискретно-воксельного моделювання для попередньої кількісної перевірки містобудівних рішень, швидкого порівняння альтернатив ущільнення та оцінки їх відповідності нормативним вимогам.

Ключові слова: дискретно-воксельне моделювання, параметрика, оптимізація параметрів інфраструктури, дискретизація міського простору.

Вступ

Сучасний розвиток міст супроводжується зростаючою складністю інфраструктурних систем, що включають транспортні вузли, громадські простори, житлові квартали, інженерні, соціальні, комунікаційні мережі та екологічні складові. Традиційні підходи до архітектурного та містобудівного проектування, засновані на евклідовій геометрії та статичних типологічних схемах, дедалі менше відповідають вимогам адаптивності, варіативності та алгоритмічної керованості форм.

Однією з ключових проблем сучасного містобудування є недостатня формалізація процесу формоутворення в умовах багатофакторності. Проектні рішення часто приймаються інтуїтивно або на основі обмежених параметричних моделей, що не враховують дискретну природу цифрового середовища.

У цьому контексті виникає потреба у дослідженні дискретних підходів до параметричного проектування, зокрема, у використанні воксельного моделювання як інструменту просторової алгоритмізації.

Геометрична структура міста складається з дискретних об'ємних елементів, які можуть бути представлені як скінченна множина просторових клітин. Це дозволяє перейти до альтернативної парадигми – дискретного опису містобудівного простору, в якому геометрія стає похідною від структури решітки. У такій моделі простір описується як множина $\Omega \subset Z^3$, а всі морфологічні характеристики зводяться до функцій підрахунку, та сумування просторових відстаней.

Проблема дослідження полягає у відсутності математично коректної та експериментально перевіреної методики застосування дискретно-воксельного середовища для вирішення прикладних містобудівних задач, пов'язаних з оптимізацією щільності, інсоляції, транспортної доступності та озеленення.

Актуальність роботи визначається необхідністю створення швидких, масштабованих і алгоритмічно контрольованих моделей для попереднього аналізу можливих варіантів розвитку міських територій.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Аналіз відомих літературних джерел показав, що питання використання воксельних моделей у проектуванні та аналізі об'єктів міської інфраструктури є актуальним напрямом сучасних досліджень. Як правило, воксельне подання розглядається як зручна форма представлення 3D-середовища та засіб поєднання різних даних, а також як основа для окремих розрахунків і оцінок (інсоляційних, видимості, морфологічних і безпекових).

У роботі [1] узагальнено напрями використання вокселів в архітектурі та міському плануванні як способу поєднання різних типів даних. Водночас там не запропоновано практичного підходу, де воксельне подання виступає обчислювальною основою для одночасного розрахунку показників і вибору найкращих варіантів; причина – оглядовий характер роботи.

У дослідженнях [2, 3] розглянуто підходи до створення та поєднання 3D-міських даних у воксельному вигляді для подальших розрахунків і моделювання. Проте не показано, як на цій основі організувати пошук оптимальних параметрів міських об'єктів за кількома критеріями одночасно; причина – зосередження на підготовці даних та узгодженні подань.

У статті [4] запропоновано систему 3D-показників для опису міської морфології. Однак не розглянуто, як ці показники включати в дискретну воксельну модель разом з іншими міськими критеріями (сонце, доступність, озеленення) у межах однієї задачі; причина – орієнтація на опис і порівняння, а не на оптимізацію.

У публікаціях [5, 6] вокселі застосовано для вирішення задач інсоляції та затінення: зокрема, для відбору допустимих об'ємів за умовами затінення та для ефективного обчислення сонячного випромінювання на 3D-моделях міста. Водночас не враховано повний набір містобудівних показників та їх узгодження у єдиному алгоритмі відбору найкращого рішення; причина – вузька спеціалізація на інсоляційних обмеженнях.

У роботах [7, 8] воксельні підходи застосовано для оцінки видимості та для задач безпеки руху пішоходів у поєднанні з даними будівельних моделей. Проте ці дослідження не формують універсальної процедури багатокритеріального вибору параметрів міських об'єктів у воксельному середовищі; причина – тематична спрямованість на окремі прикладні задачі.

У роботах [9, 10] застосовано дискретно-геометричний підхід для розв'язання задач оптимізації, зокрема показано, що варіювання

геометричних параметрів дискретної моделі дає змогу цілеспрямовано покращувати якісні та безпекові показники функціонування транспортних систем. Такий результат підтверджує придатність дискретної формалізації для постановки цілей і обмежень та створює підґрунтя для поширення подібного підходу на проектування й аналіз об'єктів міської інфраструктури у воксельному 3D-поданні. При цьому, оптимізація має враховувати взаємопов'язані просторові, інсоляційні, транспортні та безпекові характеристики.

Огляд літературних джерел за темою дослідження свідчить, що на сьогодні немає ефективної комплексної методики, яка б дозволяла в єдиному дискретно-воксельному поданні описувати міське середовище, виконувати узгоджену оцінку ключових показників для параметричних варіантів міських об'єктів (просторових, інсоляційних, транспортних та екологічних), а також визначати найкращі параметри таких об'єктів з урахуванням обмежень і компромісів між показниками. Таким чином, постає актуальне науково-практичне завдання розробки науково обґрунтованого підходу до дискретно-воксельної оптимізації параметричних моделей міської інфраструктури, який забезпечував би порівняльний аналіз можливих варіантів розвитку, зіставлення альтернатив і обґрунтований вибір рішень для підвищення ефективності планувальних та інфраструктурних перетворень у міському середовищі.

Мета і завдання дослідження. Обґрунтувати можливість застосування дискретно-воксельного параметричного підходу до проектування об'єктів інфраструктури мікрорайонів міст та продемонструвати його практичну реалізацію в середовищі MagicaVoxel. Виконати математичну верифікацію розробленої дискретно-воксельної моделі оптимізації оновленої міської інфраструктури.

Для досягнення мети були поставлені наступні завдання:

1. Формалізувати містобудівний простір як дискретну множину вокселів із визначенням функції їх стану.
2. Провести числову симуляцію для розрахунків об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону.
3. Визначити баланс сонячного надходження та виконати інсоляційну оптимізацію інтегрованої воксельної моделі будівлі.
4. Провести верифікацію параметрів транспортної доступності мікрорайону в дискретно-воксельному середовищі.
5. Виконати просторово-кількісну оцінку ефективності озеленення мікрорайону в умовах ущільнення забудови.
6. Порівняти результати моделювання з нормативними вимогами.

Матеріали та методи

Воксельне середовище, зокрема програма MagicaVoxel, дозволяє розглядати міську інфраструктуру як дискретну систему, що складається з

модульних просторових одиниць. Такий підхід відкриває нові можливості для дослідження параметризму в умовах жорсткої просторової дискретизації. Результати попередніх досліджень авторів [9, 10] стали основою для формулювання наступних гіпотез роботи:

1. Дискретна воксельна модель може виступати повноцінним середовищем параметричного проектування інфраструктурних об'єктів.

2. Параметризм у воксельному середовищі реалізується через ітеративність, серійність та функціональну залежність просторових елементів.

3. Дискретність не обмежує архітектурну виразність, а сприяє формалізації містобудівних процесів.

4. MagicaVoxel може використовуватися як середовище для ефективного моделювання напрямів розвитку міської інфраструктури.

Дослідження базується на: теорії дискретних просторів, принципах параметричного моделювання, морфологічному аналізі та системному підході. Основою методу дослідження є експериментальне воксельне моделювання, порівняльний морфологічний аналіз варіацій, ітеративне тестування параметричних залежностей.

Інфраструктура мікрорайону описується через систему параметрів, які наведено у таблиці 1. У воксельному середовищі кожен із цих параметрів може бути формалізований через кількість та конфігурацію заповнених клітин.

Таблиця 1. Система параметрів для дискретно-воксельного аналізу інфраструктури

N	Групи параметрів	Аналізовані характеристики
1	Просторові параметри	– модуль забудови; – площа мікрорайону; – поверховість забудови; – щільність забудови.
2	Інсоляційні параметри	– потік сонячної енергії; – коефіцієнт освітленої площі; – енергетичний баланс.
3	Транспортні параметри	– кількість транспортно-активних вокселів; – ширина вулиць та транспортні вузли; – демографічне навантаження; – просторовий розподіл транспортної доступності; – інтегральний показник транспортної ефективності.
4	Екологічні параметри (озеленення)	– площа потенційного озеленення; – індекс озеленення.

Алгоритмізація містобудівного простору означає перехід від інтуїтивного формування до процедурної генерації, де:

- геометрія визначається набором параметрів;
- просторові зв'язки формалізуються;
- рішення можуть бути відтворені або масштабовані;
- варіативність закладена у саму структуру моделі.

У дискретно-воксельному середовищі така алгоритмізація набуває особливої чіткості, оскільки простір представлений як множина координатних клітин:

$$S = \{v_{x,y,z} \rightarrow x \in X, y \in Y, z \in Z\}, \quad (1)$$

де $v_{x,y,z}$ – кожен воксель має бінарний або багатозначний стан (заповнений, порожній, тип функції).

Таким чином, містобудівний простір може бути описаний як функція:

$$F: P \rightarrow S, \quad (2)$$

де P – множина параметрів, що визначають конфігурацію забудови, інфраструктури та ландшафту.

У межах даного дослідження міський простір інтерпретується як ортогональна тривимірна решітка:

$$G = (X, Y, Z),$$

де X, Y, Z – осі просторової системи координат.

Кожен осередок решітки є мінімальною морфологічною одиницею. Таким чином, забудова мікрорайону набуває вигляду дискретної матриці:

$$M(x, y, z) = \begin{cases} 1 - \text{якщо клітина занята;} \\ 0 - \text{якщо клітина порожня.} \end{cases}$$

Розширена модель може включати багатозначний стан:

- 0 – відкрита територія;
- 1 – житлова забудова;
- 2 – транспорт;
- 3 – зелена зона;
- ...
- n – соціальна інфраструктура і т. д.

Це дозволяє розглядати будь-який мікрорайон міста як багатшарову інформаційну структуру.

Результати та обговорення

У межах розробленої теоретико-методологічної концепції дискретно-воксельного параметричного моделювання, виконано апробацію запропонованого підходу для конкретного об'єкту, а саме, інтеграції нової будівлі, із заданими техніко-економічними показниками, у мікрорайон «26 школа, м. Луцьк».

Вихідні умови:

- існує 3D-модель мікрорайону (рис. 1, а) та сформований у MagicaVoxel її воксельний аналог (рис. 1, б);
- визначена ділянка забудови (червоний прямокутник);
- необхідно інтегрувати в ділянку 108 квартирний житловий будинок;
- перший поверх – універсальний торговельний простір;
- параметри висоти визначити з урахуванням інсоляції та нормативів;
- зберегти баланс щільності, транспортної доступності та озеленення.

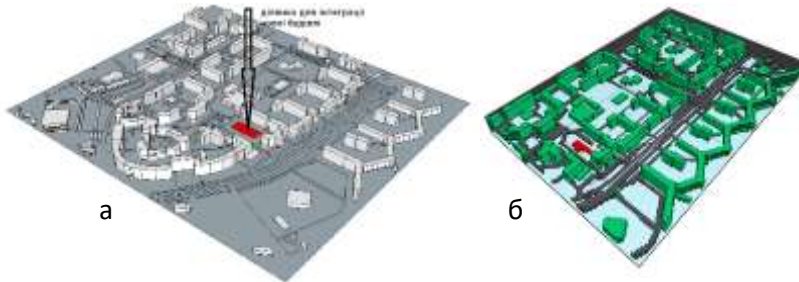


Рис. 1. Вихідна та адаптована дискретно-воксельна модель мікрорайону:
а – існуюча модель мікрорайону; б – адаптована дискретно-воксельна модель із виділеною ділянкою для розміщення нової будівлі

1. Числова симуляція об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону

Базовою одиницею проектування є модуль – m , який визначає розмір дискретної сітки:

$$m = v \times k,$$

де v – розмір одного вокселя (3 м); k – кількість вокселів у модулі.

Щільність забудови мікрорайону визначається як відношення заповнених клітин до загального об'єму чи площі:

$$D_{3d} = \frac{\sum V_{зан}(x, y, z)}{V_{заг}}, \quad D_{2d} = \frac{\sum A_{зан}(x, y)}{A_{заг}},$$

де A – площа мікрорайону у вокселях; V – кількість дискретних вокселів.

Зміна показників D_{3d} і D_{2d} є параметричним механізмом трансформації морфології моделі.

Проведена числова симуляція та верифікація об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону «26 школа, м. Луцьк». Існуючу модель мікрорайону представлено як тривимірну регулярну воксельну

решітку:

$$V = \{v_{i,j,k}\}, i \in [1, N_x], j \in [1, N_y], k \in [1, N_z],$$

де $N_x = 222, N_y = 157, N_z = 12$.

Загальна кількість вокселів: $N_{\text{заг}} = N_x \times N_y \times N_z = 418\,248$. Кожен воксель має бінарний стан: 0 – не зайнятий, 1 – зайнятий.

За проведеною цифровою реконструкцією морфології, обчислено показники просторової та площинної щільності забудови у дискретно-воксельній моделі:

Таблиця 2. Зведені показники щільності забудови

Показник	Значення	Показник	Значення
Загальна кількість вокселів	418 248	Площа території	666 x 471 = 313 686 м ²
Заповнені вокселі	70 058	Площа забудови	57 718 м ²
Порожні вокселі	348 190	Щільність забудови	0,184
Об'ємна щільність	0,167		


Обчислимо локальну щільність забудови мікрорайону (локальне вікно 40×40×12). Функція локальної щільності:

$$D(x, y) = \frac{\sum S(v_{i,j,k})}{W}, \quad (3)$$

де $W = 40 \times 40 \times 12 = 19\,200$.

Результати розрахунків та карта щільності забудови мікрорайону наведені у таблиці 3.

Таблиця 3. Формування карти щільності забудови мікрорайону «26 школа, м. Луцьк»


Зона	Щільність	
Оранжева	0,31	
Жовта	0,18	
Зелена	0,05	
Середня по району	0,167	

Виконаємо інтеграцію моделі 108-квартирного будинку в існуючу забудову. Параметри нового об'єкта: габарити: 20 × 4 вокселів; висота: 10

(вокселів); об'єм: $N_{нов} = 20,1 \times 4,4 \times 10 \approx 880$. Оновлена модель, вносить корективи у формування показників щільності. Об'ємна щільність зростає на 1,8%, а параметри щільності та оновлена карта наведені у таблиці 4.

Таблиця 4. Показники зміни загальної щільності вокселів забудови мікрорайону після інтеграції будівлі

Показник	До	Після
Заповнені вокселі	70 058	70 938
Загальні	418 248	418 248
Об'ємна щільність	0,167	0,17
Приріст	–	+1,8 %



Приріст градієнта щільності не критичний. При цьому можна зробити наступні висновки. Мікрорайон має помірну об'ємну щільність (16-18%). Локальні піки не перевищують 0,31. Інтеграція 108-квартирного будинку підвищує середню щільність лише на 0,03%. Морфологічний баланс моделі після інтеграції – зберігається.

2. Баланс сонячного надходження та інсоляційна оптимізація інтегрованої будівлі

Інсоляція у містобудівному середовищі має подвійну природу: санітарно-гігієнічні характеристики (тривалість прямого сонячного освітлення) та енергетичний баланс (сумарне сонячне теплове надходження).

У запропонованій в роботі дискретно-воксельній моделі інфраструктурного простору, виникає можливість перейти від якісної оцінки освітленості елементів забудови до кількісного розрахунку енергетичного балансу через інтегрування сонячного потоку по площі фасадів та території.

Геометрія воксельного середовища:

$$V = \{v_{i,j,k}\}, i \in [1,222], j \in [1,157], k \in [1,12].$$

Крок решітки: $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3 \text{ м}$. Площа території:

$$A = 666 \times 471 = 313\,686 \text{ м}^2.$$

Для зимового розрахункового дня (22 грудня): Висота сонця:

$\alpha = 20^0$. Сонячна радіація: $G_p = 450 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Дифузна складова:
 $G_o = 120 \text{ Вт} / \text{м}^2$. Сумарна: $G_{\text{сум}} = 570 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Потік сонячної енергії на горизонтальну поверхню:

$$Q_s = G_p \times \sin 20^0 + G_o = 153,9 + 120 = 273,9$$

Тривалість активного сонячного періоду: $t = 6 \text{ год}$. Енергія, отримана за день:

$$E = Q_s \times t = 273,9 \times 6 = 1,64 \text{ кВт} / \text{м}^2$$

Енергетичний баланс до інтеграції 10-поверхової будівлі. Середня інсоляція: $I_c = 4,73 \text{ год}$. Коефіцієнт освітленої площі: $k_{\text{осв}} = 4,73 / 6 = 0,788$. Енергетичний потік:

$$E_n = 1,64 \times 0,788 = 1,29 \text{ кВт} / \text{м}^2$$

Сумарна енергія по мікрорайону:

$$E_{\text{сум}} = 1,29 \times 313686 = 404655 \text{ кВт} / \text{год}$$

Енергетичний баланс після інтеграції будівлі (таблиця 5). Для 10-поверхової будівлі: середня інсоляція: $I_c = 4,2 \text{ год}$, коефіцієнт освітленої площі: $k_{\text{осв}} = 4,2 / 6 = 0,7$.

Енергетичний потік: $E_n = 1,64 \times 0,7 = 1,148 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$. Сумарна енергія:

$$E_{\text{сум}} = 1,148 \times 313686 = 360111 \text{ кВт} / \text{год}$$

Енергетичні втрати: $\Delta E = 404655 - 360111 = 44544$.

Відносне зменшення (при 10 поверхах):

$$\frac{44544}{404655} \times 100\% = 11\%$$

Таблиця 5. Варіаційний аналіз енергоефективності при різних варіантах поверховості інтегрованої будівлі

Поверхи	Середня інсоляція	Енергія (кВт·год/м ²)	Загальна енергія
10	4,2	1,148	360 111
12	4,12	1,113	349 132
15	3,96	1,08	338 780

При 15 поверхах – втрата становить: 16%.

Енергетичний баланс фасадів нового будинку. Площа фасадів: $A_{\text{ф}} = 2(L + W) \times H = 2(60 + 12) \times 30 = 4320 \text{ м}^2$. Сонячне надходження

(південний фасад): $Q_{\phi} \approx 350 \text{ Вт} / \text{м}^2$.

Денна енергія фасаду: $Q_{\phi} \approx 350 \times 6 = 2,1 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$. Загальне надходження: $4320 \times 2,1 = 9072 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^2$.

Інтегральний енергетичний показник із врахуванням коефіцієнту балансу:

$$B = \frac{E_{\text{район}} + E_{\text{нов}}}{E_{\text{до}}} = \frac{360\,111 + 9\,072}{404\,655} = 0,91.$$

Тобто, система зберігає 91% енергетичного потенціалу. Інтеграція 10-поверхового об'єкта зменшує середній інсоляційний потенціал на 11%. Енергетичні втрати становлять ~ 44 МВт·год за розрахунковий зимовий день. Новий будинок генерує додатковий фасадний сонячний потенціал ~ 9 МВт·год. Енергетично оптимальним для нового будинку є діапазон 9–10 поверхів. При 15 поверхах виникає енергетичний дисбаланс ($>15\%$).

3. Параметри транспортної доступності мікрорайону в дискретно-воксельному середовищі

Транспортна доступність визначається як функція мінімального часу переміщення від кожної точки житлової забудови до ключових транспортних вузлів. У воксельній моделі простору задача формалізується як:

$$T(x, y) = \min \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i}, \quad (4)$$

де d_i – довжина сегмента шляху, v_i – швидкість пересування по сегменту, n – кількість сегментів оптимального маршруту.

Дискретна геометрична модель території мікрорайону складає 222×157 вокселів. Крок решітки: 1 воксель = 3 м. Кількість транспортно-активних вокселів: $N_m = 1332$ вокселів – головна магістраль (просп. Соборності), де курсує громадський транспорт – $S_m = 11\,988 \text{ м}^2$. Загальна кількість зайятих вокселів, включаючи, додатково, проїзди, в'їзди та пішохідні доріжки на мікрорайоні: $N_s = 3960 + 1332 = 5292$ вокселів, із площею $S_s = 47\,630 \text{ м}^2$.

У моделі враховано наступні транспортні вузли: 1 головний шляхопровід, 3 магістральні в'їзди до нього, 7 зупинок громадського транспорту.

Показники транспортної доступності мікрорайону до i після інтеграції нової будівлі наведено у таблиця 6. Середній час доступу по мікрорайону до інтеграції: $T_i = 6,8$ хв. Інтегрування нової будівлі вносить певні корективи. Середня заселеність нового будинку: 3 особи/квартиру –

$w = 324$ особи.

Генерація власного транспорту: 0,45 авто/квартиру x 108 квартир \approx 49 авто. При цьому змінюється інтенсивність руху по магістральному проїзду в околі нового будинку, завдяки додатковому потоку: $Q_d = 49 \times 2 = 98$ поїздок/день. Пікове навантаження: 18 авто/год. При цьому середній час доступу збільшиться: $T_2 = 7,2$ хв. – завдяки локальному впливу інтеграції будівлі та збільшення часу доступу в околі будинку до головної магістралі (до інтеграції: $T = 5,6$ хв., після інтеграції: $T = 6,2$ хв., що становить зростання часу доступу на +10%). Середній час доступу по мікрорайону зростає до: $T_2 = 7,2$ хв., що становить +0,4 хв.

Таблиця 6. Просторовий розподіл транспортної доступності до і після інтеграції нової будівлі

До інтеграції			Після інтеграції		
Час доступу	Площа	Частка	Час доступу	Площа	Частка
< 5 хв	10 700 м ²	19%	< 5 хв	10 700 м ²	18%
5–8 хв	25 500 м ²	44%	5–8 хв	26 350 м ²	45%
8–12 хв	7 110 м ²	12%	8–12 хв	7 110 м ²	12%
> 12 хв	14 100 м ²	25%	> 12 хв	14 100 м ²	25%

На рисунку 2 наведено карту моделі доступності до транспортних вузлів мікрорайону. Принцип побудови просторової карти: зелений колір < 5 хв.; жовтий колір 5-8 хв.; фіолетовий колір 8-12 хв.; червоний колір > 12 хв.



Рис. 2. Карта-модель транспортної доступності мікрорайону до базових транспортних вузлів

Введемо інтегральний показник транспортної ефективності:

$$A = \frac{1}{T}.$$

До інтеграції будівлі: $A = 0,147$. Після – $A = 0,139$. Зниження: – 5,5%.

Просторово-морфологічний аналіз дискретно-воксельної моделі показав, що новий 108-квартирний будинок збільшує середній час доступу у мікрорайоні на 8-9%. Жовта зона, в яку попадає новобудова (> 5 -8 хв.), збільшує час доступності на +10%. Внутрішньоквартальний проїзд в околі інтегрованого будинку працює у режимі граничної пропускної здатності. Критичне транспортне перевантаження може настати уже при інтеграції будинку >140 квартир.

Мікрорайон зберігає нормативну транспортну доступність, однак входить у фазу зниження ефективності. Оптимізація можлива через: розширення проїзду біля інтегрованої будівлі ще на 1 смугу або введення одностороннього руху.

4. Просторово-кількісна оцінка ефективності озеленення мікрорайону в умовах ущільнення забудови

Ущільнення житлової забудови є актуальним інструментом модернізації міського середовища, проте воно супроводжується ризиками зниження якості простору за рахунок зменшення параметрів озеленення та транспортної доступності.

Відсутність комплексної кількісної моделі часто призводить до локального перевантаження території. Для даного випадку, загальна площа моделі мікрорайону складає: $A_3 = 313\,686\text{ м}^2$. Загальна площа його потенційного озеленення (до інтеграції): $A_{оз} = 208\,338\text{ м}^2$.

Ефективним вважається озеленення, яке: розташоване в радіусі 300 м від житлових будинків; не перекрите забудовою; не знаходиться у санітарно-захисній зоні дороги.

Формалізуємо дане положення:

$$A_{\text{ефект}} = \sum_{i=1}^n A_i \cdot f(d_i), \quad f(d) = \{1(d \leq 300), 0(d > 300)\}. \quad (5)$$

До інтеграції будівлі середня чисельність жителів мікрорайону: $P = 26\,400$ осіб. Площа для потенційного озеленення – $208\,338\text{ м}^2$, площа мікрорайону – $313\,686\text{ м}^2$, площа забудови – $57\,718\text{ м}^2$, площа доріг, проїздів та тротуарів – $47\,630\text{ м}^2$ (рис. 3).

Озеленення на одну особу складає: $G = \frac{208\,338}{26\,400} = 7,89\text{ м}^2$. Норматив

– $\geq 6 \text{ м}^2/\text{особу}$ – виконується. Індекс озеленення – $I = \frac{7,89}{6} = 1,31$. Система

перевищує норматив на 30%.

Інтеграція 108-квартирного будинку (10 поверхів) збільшує чисельність жителів на 324 особи. Середня кількість жителів виросте до 26 724 осіб.

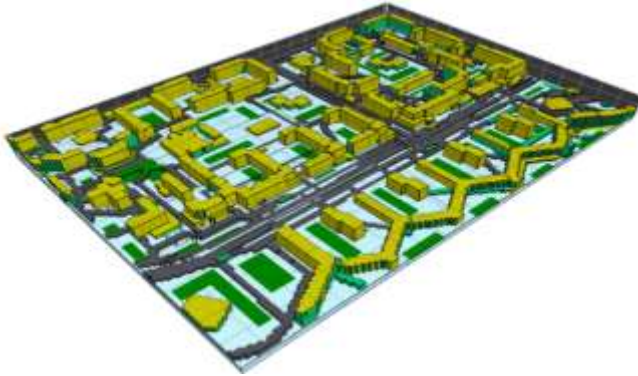


Рис. 3. Воксельна карта-модель озеленення (існуючого та потенційного) мікрорайону (зелені зони)

Площа потенційного озеленення, враховуючи під'їзди та виступаючий офіс, зменшиться на 1320 м^2 . Озеленення на одну особу

зменшиться до: $G = \frac{207018}{26724} = 7,7 \text{ м}^2$. Норматив $6 \text{ м}^2/\text{особу}$ – виконується.

Індекс озеленення впаде до на 2,3%. $I = \frac{7,7}{6} = 1,28$. $\Delta = -2,3\%$

Проведений аналіз із використанням дискретно-воксельного моделювання показав, що інтеграція 10-поверхового будинку зменшує забезпеченість зеленими площами на 2,3%, однак норматив $6 \text{ м}^2/\text{особу}$ не порушується. Дефіцит озеленення має локальний характер і формується переважно в зоні, прилеглої до новобудови. Компенсація можлива за рахунок додаткового озеленення на суміжних територіях. З погляду показників озеленення раціональною є поверховість новобудови в межах 9-10 поверхів. Існуючий мікрорайон у базовому стані відповідає нормативним вимогам, тоді як після інтеграції 108-квартирного будинку доцільно передбачити просторові заходи компенсації зелених площ.

Висновки

1. У роботі розроблено та апробовано методику практичної

формалізації містобудівного простору як дискретної множини вокселів із описом функціонального стану кожного елемента. Введено систему морфологічних параметрів для обчислення щільності забудови, вертикального розподілу об'ємів, інсоляційного індексу, транспортної доступності та коефіцієнта озеленення.

2. Виконано числову симуляцію розрахунків об'ємної щільності дискретно-воксельної моделі мікрорайону до і після інтеграції нової будівлі в дискретний простір. Розглянуто ефективність різних варіантів забудови. Доведено, що при інтеграції в модель мікрорайону «26 школа, м. Луцьк» 10-поверхової будівлі, морфологічний баланс мікрорайону – зберігається.

3. Визначено баланс сонячного надходження та виконано інсоляційну оптимізацію інтегрованої воксельної моделі будівлі.

4. Виконано перевірку показників транспортної доступності мікрорайону в дискретно-воксельному середовищі. Встановлено, що після інтеграції нової будівлі нормативна доступність зберігається, однак фіксується зниження транспортної ефективності. Запропоновано напрями покращення доступності в локальній проблемній зоні.

5. Виконано просторово-кількісну оцінку забезпеченості озелененням мікрорайону в умовах ущільнення забудови. Аналіз на основі дискретно-воксельного моделювання показав, що інтеграція 10-поверхового будинку зменшує зелені площі на 2,3%, що зумовлює потребу в компенсаційному озелененні.

6. Виконано порівняльний аналіз результатів дискретно-воксельного параметричного моделювання процесу інтеграції будівлі в існуючий мікрорайон із нормативними вимогами. Визначено що практично всі нормативні показники у процесі інтеграції – зберігаються.

7. Запропонований підхід закладає основи розвитку нового напрямку дискретно-воксельного моделювання для попередньої кількісної перевірки містобудівних рішень та оцінки їх відповідності нормативним вимогам. Модель демонструє високу алгоритмічну прозорість та дозволяє ефективно уніфікувати, масштабувати і спростити алгоритми обчислень. Перспективними є дослідження інтеграції методики з генетичними алгоритмами та GIS.

Конфлікти інтересів

Автори заявляють, що у них немає конфлікту інтересів щодо поточного дослідження, включаючи фінансовий, особистий, авторський чи будь-який інший, який міг би вплинути на дослідження, а також на результати, наведені в цьому документі.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті статті.

Використання штучного інтелекту

Автори засвідчують, що під час підготовки тексту штучний інтелект не використовувався.

References

1. Тус, J., Selami, T., Hensel, D. S., & Hensel, M. (2023). A Scoping Review of Voxel-Model Applications to Enable Multi-Domain Data Integration in Architectural Design and Urban Planning. *Architecture*, 3(2), 137-174. <https://doi.org/10.3390/architecture3020010>
2. Fujiwara, K., Tsurumi, R., Kiyono, T., Fan, Z., Liang, X., Lei, B., Yap, W., Ito, K., & Biljecki, F. (2026). VoxCity: A seamless framework for open geospatial data integration, grid-based semantic 3D city model generation, and urban environment simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 123, 102366. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2025.102366>
3. Gorte, B., Zlatanova, S., Pilouk, M., Diakite, A., & Barton, J. (2024). 3D Data Integration in the Voxel Domain. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4–2024, 133–140. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-133-2024>
4. Labetski, A., Vitalis, S., Biljecki, F., Arroyo Otori, K., & Stoter, J. (2023). 3D building metrics for urban morphology. *International Journal of Geographical Information Science*, 37(1), 36–67. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2103818>
5. Liang, J., & Gong, J. (2017). A Sparse Voxel Octree-Based Framework for Computing Solar Radiation Using 3D City Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040106>
6. Alkadri, M. F., Luca, F. D., Turrin, M., & Sariyildiz, S. (2020). A Computational Workflow for Generating A Voxel-Based Design Approach Based on Subtractive Shading Envelopes and Attribute Information of Point Cloud Data. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162561>
7. Chmielewski, S. (2021). Towards Managing Visual Pollution: A 3D Isovist and Voxel Approach to Advertisement Billboard Visual Impact Assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10), 656. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100656>
8. Aleksandrov, M., Zlatanova, S., Heslop, D. J., & Diakite, A. (2024). BIM-based connectivity graph and voxels classification for pedestrian-hazard interaction. *Journal of Spatial Science*, 69(3), 699–719. <https://doi.org/10.1080/14498596.2023.2281923>
9. Pustiulha, S., Samchuk, V., Samostian, V., Prydiuk, V., & Dembitskij, V. (2023). Influence of the City Transport Route Network Discrete Model Geometrical Parameters on a Quality of a Passenger Traffic System Operation. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, & Y. Tsegelnyk (Eds.), *Smart Technologies in Urban Engineering* (Vol. 536, pp. 740–751). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_66
10. Pustiulha, S., Samchuk, V., Prydiuk, V., Pasichnyk, O., & Shymchuk, O. (2024). Improving safety criteria for transporting hazardous goods by road through optimizing the geometric parameters of their stowage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (129)), Article 3 (129). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307235>

Література

1. Tyc, J., Selami, T., Hensel, D. S., & Hensel, M. (2023). A Scoping Review of Voxel-Model Applications to Enable Multi-Domain Data Integration in Architectural Design and Urban Planning. *Architecture*, 3(2), 137-174. <https://doi.org/10.3390/architecture3020010>
2. Fujiwara, K., Tsurumi, R., Kiyono, T., Fan, Z., Liang, X., Lei, B., Yap, W., Ito, K., & Biljecki, F. (2026). VoxCity: A seamless framework for open geospatial data integration, grid-based semantic 3D city model generation, and urban environment simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 123, 102366. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2025.102366>
3. Gorte, B., Zlatanova, S., Pilouk, M., Diakite, A., & Barton, J. (2024). 3D Data Integration in the Voxel Domain. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4–2024, 133–140. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-2024-133-2024>
4. Labetski, A., Vitalis, S., Biljecki, F., Arroyo Ogori, K., & Stoter, J. (2023). 3D building metrics for urban morphology. *International Journal of Geographical Information Science*, 37(1), 36–67. <https://doi.org/10.1080/13658816.2022.2103818>
5. Liang, J., & Gong, J. (2017). A Sparse Voxel Octree-Based Framework for Computing Solar Radiation Using 3D City Models. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(4), 106. <https://doi.org/10.3390/ijgi6040106>
6. Alkadri, M. F., Luca, F. D., Turrin, M., & Sariyildiz, S. (2020). A Computational Workflow for Generating A Voxel-Based Design Approach Based on Subtractive Shading Envelopes and Attribute Information of Point Cloud Data. *Remote Sensing*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/rs12162561>
7. Chmielewski, S. (2021). Towards Managing Visual Pollution: A 3D Isovist and Voxel Approach to Advertisement Billboard Visual Impact Assessment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(10), 656. <https://doi.org/10.3390/ijgi10100656>
8. Aleksandrov, M., Zlatanova, S., Heslop, D. J., & Diakite, A. (2024). BIM-based connectivity graph and voxels classification for pedestrian-hazard interaction. *Journal of Spatial Science*, 69(3), 699–719. <https://doi.org/10.1080/14498596.2023.2281923>
9. Pustiulha, S., Samchuk, V., Samostian, V., Prydiuk, V., & Dembitskij, V. (2023). Influence of the City Transport Route Network Discrete Model Geometrical Parameters on a Quality of a Passenger Traffic System Operation. In O. Arsenyeva, T. Romanova, M. Sukhonos, & Y. Tsegelnyk (Eds.), *Smart Technologies in Urban Engineering* (Vol. 536, pp. 740–751). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_66
10. Pustiulha, S., Samchuk, V., Prydiuk, V., Pasichnyk, O., & Shymchuk, O. (2024). Improving safety criteria for transporting hazardous goods by road through optimizing the geometric parameters of their stowage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(3 (129)), Article 3 (129). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.307235>

Відомості про статтю:	Article information:
Отримано 04.04.2026	Received 04.04.2026
Отримано у доопрацьованому вигляді 17.05.2026	Received in revised form 17.05.2026
Прийнято 27.05.2026	Accepted 27.05.2026
Опубліковано 29.05.2026	Published 29.05.2026

S. I. Pustiulha

D.Sc. in Engineering, Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7623-7803>
Department of Architecture and Design
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

V. P. Samchuk*

Ph.D. in Engineering, Associate Professor, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9045-9525>
Department of Building and Civil Engineering
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

Yu. S. Bondarchuk

Ph.D. in Arts, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-9795>
Department of Architecture and Design
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

M. V. Zarazka

PhD student, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7652-5563>
Department of Architecture and Design
Lutsk National Technical University, Lvivska St., 75, Lutsk, Ukraine, 43018

*corresponding author, e-mail: volodsam@ukr.net

Discrete-Voxel Optimization of Parametric Models of Urban Infrastructure

How to Cite:

Pustiulha S. I., Samchuk V. P., Bondarchuk Yu. S., Zarazka M. V. (2026). Discrete-Voxel Optimization of Parametric Models of Urban Infrastructure. *Modern technologies and methods of calculations in construction*, 25, 35-52, [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15\(25\)-03](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2026-15(25)-03)

Abstract. This paper develops and validates a discrete-voxel modelling method for the quantitative assessment of microdistrict changes when a new residential building is introduced into existing urban infrastructure. Urban space is represented as a regular 3D grid with a discrete functional state for each cell. Using the integration of a 108-apartment building into an established neighbourhood, we simulate changes in volumetric and planar building density, insolation regime and solar-gain balance, transport accessibility, and green-space provision. The model is implemented in MagicaVoxel: the base grid step is 3 m, and voxel states encode land-use types (built-up, transport, green areas, etc.), enabling algorithmic computation of areas, volumes, and distances. Density is evaluated by global and local measures; insolation by an energy-balance calculation for a representative winter day; accessibility by minimum travel time to transport hubs. For a 10-storey option, volumetric density increases by 1.8%, insolation potential decreases by ~11%, average accessibility time rises by 8–9%, and green-space indicators drop by 2–3% while remaining within regulatory limits. A height variation study (10–12–15 storeys) identifies threshold values where insolation and transport performance deteriorate markedly, providing a basis for selecting acceptable design ranges. Due to the grid-based structure, computations are scalable and well suited to early-stage decision support and rapid comparison of alternatives. Overall, the approach offers a transparent multi-criteria workflow that can be extended to automated search of parameter sets under normative constraints.

Keywords: discrete-voxel modelling, parametrics, infrastructure parameter optimization, discretization of urban space.