

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-09>

УДК 004.93

Христинець Андрій Олександрович¹, магістрант

Суринович Олена Миколаївна¹, к. т. н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-9300-0039>

Муляр Вадим Петрович², к. пед. н., доцент

<https://orcid.org/0000-0003-4774-3947>

Пех Петро Антонович¹, к. т. н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6327-3319>

Христинець Наталія Анатоліївна¹, к. т. н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-4836-7632>

¹Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

²Волинський національний університет ім. Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

МУЛЬТИРІВНЕВА ІНТЕГРАЦІЯ РЕНДЕРИНГУ У МОДЕЛЮВАННІ ІНТЕРАКТИВНИХ КАРТ

Христинець А. О., Суринович О. М., Муляр В. П., Пех П. А., Христинець Н. А. Мультірівнева організація рендерингу у моделюванні інтерактивних карт. У роботі розглянуто проблему оптимізації рівня деталізації LOD у інтерактивних 3D-картах, що використовуються для візуалізації просторових даних у реальному часі. Запропоновано математичну сигмоїдну логістичну модель, яка враховує ключові параметри: відстань до об'єкта, кут огляду камери, поточне навантаження на CPU/GPU та ресурсність пристрою. Показано, що застосування логістичної функції дозволяє адаптивно та плавно регулювати рівень деталізації, забезпечуючи оптимальний баланс між якістю зображення та продуктивністю рендерингу. Теоретично обґрунтовано формули, які описують залежність LOD від вхідних параметрів, а також запропоновано метод дискретизації рівнів деталізації. Проведено аналіз впливу окремих факторів на значення параметра ϕ , що визначає ступінь деталізації. Експериментально підтверджено коректність моделі на прикладі складної сітки полігонів із понад 400 тисячами ребер. Отримані результати демонструють, що модель дозволяє значно знизити навантаження на графічну систему без втрати важливих візуальних деталей на карті. Запропонований підхід є універсальним і може бути застосований для адаптивного рендерингу у різних геоінформаційних системах. Робота відкриває перспективи для подальшого розвитку моделей із урахуванням додаткових параметрів і інтеграції із сучасними алгоритмами оптимізації.

Ключові слова: 3D-карти, рендеринг, Blender, мепінг, полігони, LOD.

Khrystynets A., Surynovych O., Muliar V., Pekh P., Khrystynets N. Multilevel organization of rendering in modeling interactive maps. The paper considers the problem of optimizing the level of detail LOD in interactive 3D maps used for real-time visualization of spatial data. A mathematical sigmoid logistic model is proposed that takes into account key parameters: distance to the object, camera viewing angle, current CPU/GPU load, and device resource capacity. It is shown that the use of the logistic function allows adaptively and smoothly adjusting the level of detail, ensuring the optimal balance between image quality and rendering performance. Formulas describing the dependence of LOD on input parameters are theoretically substantiated, and a method for discretizing levels of detail is also proposed. An analysis of the influence of individual factors on the value of the parameter ϕ , which determines the degree of detail, is carried out. The correctness of the model is experimentally confirmed using the example of a complex polygon mesh with over 400 thousand edges. The results obtained demonstrate that the model allows to significantly reduce the load on the graphics system without losing important visual details on the map. The proposed approach is universal and can be applied for adaptive rendering in various geographic information systems. The work opens up prospects for further development of models taking into account additional parameters and integration with modern optimization algorithms.

Keywords: 3D maps, rendering, Blender, mapping, polygons, LOD.

Постановка проблеми. Інтерактивні 3D-карти стали важливим інструментом візуалізації просторових даних у реальному часі через зростаючі потреби у точному, динамічному та візуально зрозумілому представленні складного географічного простору. У всьому світі активно застосовуються багаторівневі технології рендерингу, які забезпечують адаптивну якість зображення залежно від навантаження, рівня деталізації, масштабу чи типу пристрою користувача. Такі підходи широко реалізовані як у провідних геоінформаційних системах CesiumJS, Google Earth та ArcGIS, так і в інструментах віртуальної навігації.

Оскільки дане питання дослідження є актуальним, сучасним та технологічно складним, ним активно займаються вчені та дослідники у сферах комп'ютерної графіки, геоінформаційних систем, штучного інтелекту та веб-технологій.

Метою даного дослідження є розробка концепції та програмного прототипу системи моделювання інтерактивної карти з багаторівневою інтеграцією рендерингу, яка дозволяє оптимально поєднувати продуктивність, деталізацію й інтерактивність візуалізації просторових об'єктів.

Аналіз існуючих моделей та підходів. Одним із підходів до вирішення проблеми ефективної інтерактивної візуалізації просторових даних є впровадження багаторівневих архітектур рендерингу, що адаптуються до складності сцени та потреб користувача. Зокрема, у роботі [1] описано розроблену веб-систему для інтерактивної 3D-візуалізації та реагування на надзвичайні ситуації з використанням Cesium Digital Earth. Таким чином вирішується проблема інтуїтивної й оперативної візуалізації небезпечних ліній зсувів у реальному часі, забезпечуючи швидкий доступ до геопросторових даних за допомогою сучасних засобів веб-візуалізації. Авторами [2] розглянуто архітектуру системи, яка поєднує 3D-візуалізацію міст із динамічними семантичними знаннями та досліджено процес інтеграції великих і динамічних даних міських моделей у інтерфейс, що підтримує адаптивну деталізацію, контекстуальні запити та інтелектуальну взаємодію з користувачем.

Якщо попередні дослідження спрямовані здебільшого на деталізований інтерфейс, то у роботі [3] представлено новий підхід до масштабного 3D-візуального рендерингу. Він здійснюється поєднанням методів комп'ютерного зору і нейронних мереж, інтегрованим в структуру Octree. Цей підхід, що має назву Neural Radiance Fields, забезпечує ефективний рендеринг великих сцен з масштабом, подібним до Землі при значно зменшеному обсязі пам'яті та підтримці адаптивного та масштабованого візуального представлення. Це дає змогу досягати високої якості зображення без необхідності зберігати повні геометричні моделі сцени, що особливо важливо при роботі з великими просторовими даними, такими як цифрові двійники міст, геопросторові карти або симуляції планетарного масштабу.

Незважаючи на світові досягнення в цьому напрямку, у вітчизняному контексті подібні рішення переважно залишаються на стадії експериментальної розробки або вузькогалузевого застосування. Це зумовлено складністю поєднання високопродуктивного рендерингу, інтерактивності та динамічного оновлення просторових даних в реальному часі. Відповідно, виникає потреба у створенні адаптивних обчислювальних рішень, які враховують обмежені ресурси, специфіку локальних даних і вимоги до інтерактивної взаємодії з користувачем.

Матеріали і методи дослідження.

У дослідженні використано сучасні інструменти для 3D-візуалізації просторових даних, зокрема рушій Blender для реалізації інтерактивної карти з підтримкою багаторівневої деталізації. Для побудови архітектури рендерингу застосовано методи оптимізації продуктивності на основі просторової ієрархії. Експериментальна частина базується на моделюванні типових сценаріїв навігації у віртуальному середовищі з різними параметрами деталізації та обчислювальними навантаженнями. Аналіз ефективності здійснювався шляхом порівняння продуктивності, часу рендерингу та якості зображення при різних режимах візуалізації. Для обробки даних та логіки взаємодії використовувалися JavaScript, WebGL, а також бібліотеки для динамічного оновлення просторової інформації.

Математична модель системи мультирівневого рендерингу в інтерактивних 3D-картах сформована на основі моделі Level of Detail – LOD [4,5]. Рівень деталізації LOD у 3D-моделюванні означає створення кількох версій однієї моделі з різною складністю, тобто, з різною кількістю полігонів і деталей та з автоматичним переключенням між ними залежно від відстані до камери. Ідея полягає в тому, що чим далі знаходиться об'єкт, тим менш детальна його версія відображається, бо дрібні деталі з великої відстані практично непомітні. Це дуже знижує навантаження на обчислювальні ресурси, і дозволяє таким ресурсам, як, наприклад, іграм, симуляціям та анімаціям працювати швидше і плавніше, не втрачаючи якості зображень зблизька. Зазвичай у 3D-моделюванні для цього створюють декілька рівнів деталізації. Це може бути і максимальна деталізація LOD0, і спрощена LOD1, і найпростіша LOD2, а сама система автоматично змінює їх під час роботи.

Моделювання системи 3D-карт [6] передбачає кілька рівнів деталізації: $L_0, L_1, \dots, L_n$, де L_0 та L_n найнижчий і найвищий рівень деталізації відповідно. Вибір рівня деталізації для конкретного об'єкта залежить від його відстані d до камери і його порогових значень $T_0, T_1, \dots, T_n$, що задають межі переходу між рівнями згідно формули (1):

$$L_i = \begin{cases} L_0, & 0 \leq d \leq T_0 \\ L_1, & T_0 \leq d \leq T_1 \\ \vdots & \\ L_n, & d \geq T_{n-1} \end{cases} \quad (1)$$

Відстань між камерою з тривимірною позицією $C = (x_1, y_1, z_1)$ та об'єктом $M = (x_0, y_0, z_0)$ можна розрахувати як евклідову відстань за формулою (2):

$$d = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + (z_1 - z_0)^2} \quad (2)$$

За умовами автоматичного перемикавання рівнів деталізації LOD, згідно вище наведених залежностей, модель матиме вигляд:

$$LOD = \begin{cases} LOD_0, & d \leq D_0 \\ LOD_1, & D_0 \leq d \leq D_1 \\ LOD_2, & D_1 \leq d \leq D_2 \\ LOD_3, & d > D_2 \end{cases}, \quad (3)$$

де D_0, D_1, D_2 – це граничні відстані для перемикавання між рівнями деталізації, LOD_0 – модель з максимальною кількістю полігонів, LOD_3 – спрощена версія моделі.

Такий підхід дозволяє поєднати геометричне визначення відстані з логікою рендерингу, щоб система автоматично обирала оптимальний рівень деталізації для відображення карти.

Для більш точної моделі необхідно враховувати ще і кут між камерою V та площиною виміру, тобто між камерою і вектором до об'єкта $D = M - C$ згідно (2). Цей кут θ обчислюється за формулою (4):

$$\cos \theta = \frac{V \cdot D}{\|V\| \cdot \|D\|} \quad (4)$$

Тоді критерій вибору рівня деталізації можна розширити:

$$L_i = \begin{cases} L_0, & d < T_0 \text{ і } \cos \theta > \alpha \\ L_1, & \text{інше} \end{cases}, \quad (5)$$

де α — порогове значення видимості об'єкта у полі зору камери.

Запропонована модель дозволяє динамічно переключати рівні деталізації в залежності від положення та напрямку огляду, зменшуючи навантаження на рендеринг і забезпечуючи таким чином оптимальний баланс між якістю зображення та продуктивністю.

В континуальному підході, для універсальної моделі вибору деталізації введемо показник деталізації $\varphi \in [0, 1]$, де 1 – це максимальна деталізація, а 0 – мінімальна.

Сигмоїдна логістична модель тоді має наступний вигляд:

$$\varphi = \sigma(\alpha(d_0 - d) + \beta \cos \theta + \gamma(1 - S) + \delta P + \varepsilon), \quad (6)$$

де $\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$ – логістична функція, d_0 – опорна відстань, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – вагові коефіцієнти, а ε – випадкова похибка, S – поточне нормоване $[0, 1]$ навантаження CPU/GPU, P – показник ресурсності пристрою.

Після обчислення φ отримуємо дискретний LOD:

$$LOD = \text{round}((1 - \varphi)n), \quad (7)$$

де n – кількість рівнів LOD.

Попередня обробка даних у багаторівневому рендерингу інтерактивних карт ґрунтується на приведенні вхідної геоінформації до єдиної системи координат і проекцій, генералізації геометрії за

вбудованими алгоритмами вибраного рушія, нормалізації атрибутів та уніфікації одиниць вимірювання. Також важливим кроком є заповнення або корекція пропущених даних.

Результати дослідження. Використовуючи ПЗ Blender, отримали сітка полігонів (рис. 1) на зображенні є основою для подальшого дослідження та оптимізації карт у тривимірних рушіях, таких як Blender. Візуалізація демонструє високий рівень деталізації. Це є критичним фактором для вибору правильних підходів до зниження навантаження на систему, оскільки кількість полігонів напряму впливає на продуктивність рендерингу, особливо при великомасштабних сценах.

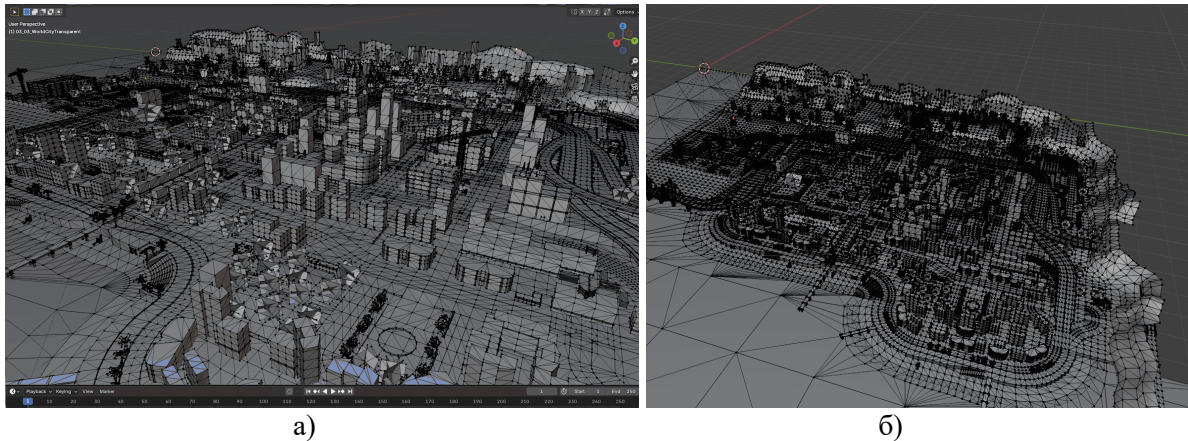
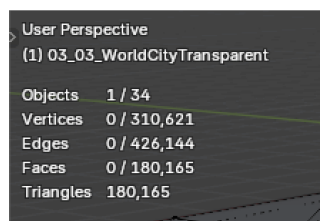


Рис. 1. Багаторівнева структура відображення шарів інтерактивної карти (а) та вигляд сцени з використанням камери та об'єктів (б) у рушії Blender

Найперше, на даному етапі можна оцінити щільність сітки та визначити, які ділянки моделі потребують зменшення кількості вершин без суттєвої втрати візуальної якості карт, використовуючи методи оптимізації сітки засобами самого рушія. На цьому етапі слід звернути увагу на топологію сітки. Деякі області, наприклад, рівнинні поверхні чи фонові елементи мапінгу, можуть бути спрощені шляхом ретопології – заміни складних геометричних форм на більш прості з меншим числом багатокутників. У Blender це дозволяє значно скоротити використання пам'яті та зменшити час обробки кадру, особливо при роботі з мобільними платформами чи VR. Ще одним напрямком спрощення є оптимізація текстур та матеріалів. Навіть при великій кількості полігонів правильно налаштовані карти нормалей та карти рельєфу здатні візуально компенсувати зменшення геометричної деталізації. Для цієї моделі можна провести UV-розгортку та підготувати PBR-матеріали, і це забезпечить реалістичне відтворення освітлення та тіней.

Другим важливим аспектом є впровадження рівнів *LOD*, які дозволяють автоматично перемикаєти моделі з меншою кількістю полігонів при віддаленні камери. Це особливо актуально для великих карт, де є взаємодія лише з невеликою частиною сцени у будь-який момент часу. На основі аналізу цієї сітки можна створити кілька версій об'єктів з різною полігональністю, оптимізуючи їх для різних дистанцій рендерингу.

Визначено засобами рушія параметри об'єктів полігонів (рис. 2), щоб в подальшому сформувати залежності для сигмоїдної логістичної моделі на основі формул (6) та (7).



User Perspective	
(1) 03_03_WorldCityTransparent	
Objects	1 / 34
Vertices	0 / 310,621
Edges	0 / 426,144
Faces	0 / 180,165
Triangles	180,165

Рис. 2. Статистика поточної сцени видимої області камери у середовищі Blender

Видно, що у User Perspective занадто багато Vertices та Edges, що означає, що навіть без руху камери цей рендер навантажує систему, і потрібно або зменшувати полігональність моделей, або збільшувати відсікання непотрібних об'єктів.

Врахувавши вагові коефіцієнти для кута, відстані, навантаження та ресурсності для типових моделей LOD [7], а також поклавши у якості інтервалу поточної відстані до камери d в межах від 0 до 200, кут θ від 0 до 2π , отримаємо:

$$\varphi = \frac{1}{1 + e^{-(5 \cdot (100 - d) + 1.5 \cos \theta + 2(1 - S) + 1P)}} \quad (8)$$

Кількість ребер Edges: $n=426144$ – це кількість рівнів LOD , що відповідає максимально можливому числу рівнів деталізації, тому, виходячи з формули (7):

$$LOD = \text{round}((1 - \varphi) \cdot 426144) \quad (9)$$

Якщо покласти $d = 80$, $S = 0,7$, $P = 0,8$, а кут камери $\theta = \pi/3 \approx 1,047$, то лінійний аргумент для σ :

$$x = 5(100 - 80) + 1,5 \cos(1,047) + 2(1 - 0,7) + 1 \cdot 0,8 = 102,15 \quad (10)$$

Підставимо це значення для обчислення моделі:

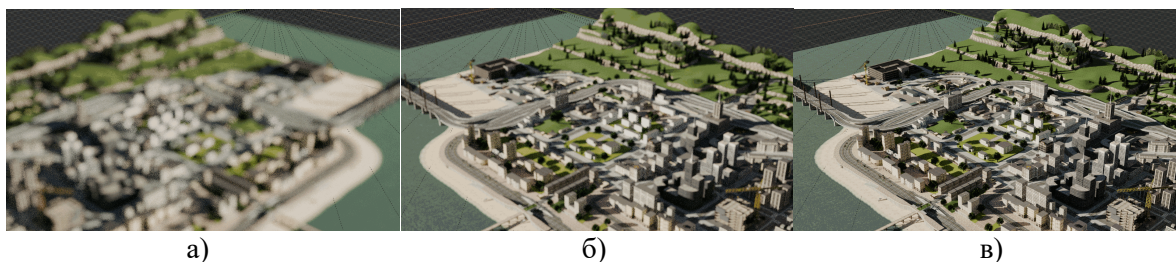
$$\varphi = \frac{1}{1 + e^{-102,15}} \approx 1 \quad (11)$$

Як бачимо, логістична функція при великому $x \rightarrow 1$. Обчислимо LOD :

$$LOD = \text{round}((1 - 1) \cdot 426144) = 0 \quad (12)$$

Тобто, для близької відстані $d=80$ та заданих параметрах ми отримуємо максимальний рівень деталізації. $LOD = 0$ – це найвищий рівень, оскільки він вказує на ступінь спрощення.

Отримані результати чітко узгоджуються з попередніми розрахунками за логістичною моделлю. Рендеринг низької якості (рис. 3а) відповідає ситуаціям, коли розраховане значення φ є малим, тобто модель передбачає велику відстань до об'єкта, високе навантаження на CPU/GPU або низьку ресурсність пристрою. В такому разі LOD наближається до максимального значення, що означає сильне спрощення геометрії і тому на рисунках це проявляється меншою деталізацією та меншою кількістю відображених вершин і ребер. Рендеринг кращої якості (рис. 3б) виникає при середніх значеннях φ , коли умови роботи камери та системи дозволяють зберегти помірну кількість полігонів. Тут LOD має середні значення: деталі відображаються чіткіше, ніж у низькій якості, але деяке спрощення все ще присутнє для оптимізації продуктивності. Найкращий рендеринг (рис. 3в) відповідає високим значенням φ , коли камера близько до об'єкта, навантаження на систему невелике, а пристрій має високі ресурси. У такому випадку LOD мінімальний, і сцена рендериться з максимально можливою кількістю полігонів, вершин та ребер. У цьому випадку на картах спостерігається найвища деталізація. Таким чином, різниця між трьома показаними варіантами рендерингу повністю пояснюється дією логістичної моделі.



а) б) в)

Рис. 3. Візуальна якість мепінгу за максимальних (а), середніх (б) та максимальних (в) значень LOD

Проведене дослідження було спрямоване на перевірку працездатності запропонованої сигмоїдної логістичної моделі для автоматичного визначення рівня деталізації на 3D-картах залежно

від відстані до об'єкта, кута огляду, навантаження на апаратні ресурси та ресурсності пристрою. Отримані розрахунки показали, що модель коректно реагує на зміну вхідних параметрів: при зменшенні відстані, зниженні навантаження та використанні більш потужних пристроїв значення φ зростає, що призводить до мінімального LOD і максимальної візуальної якості.

Елементи наукової новизни: доведено експериментально ефективність моделі на основі кількісних метрик, інтегровано показник поточного системного навантаження як вхідний параметр у модель LOD, розроблено метод дискретизації LOD на основі вихідного значення логістичної функції, що забезпечує плавний перехід між рівнями деталізації та мінімізує візуальні артефакти.

Практична значущість: запропонована сигмоїдна логістична модель дає змогу автоматично адаптувати рівень деталізації геопросторових об'єктів залежно від масштабу перегляду, кута огляду та поточних апаратних можливостей системи. Це забезпечує швидке завантаження та плавну навігацію по великих картографічних даних, зменшує затримки при відображенні складних геометрій і дозволяє зберігати високу чіткість ключових ділянок карти навіть за умов обмежених ресурсів, що особливо актуально для геоінформаційних систем, симуляторів і мобільних картографічних застосунків.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі представлено модель мультирівневої організації рендерингу у моделюванні інтерактивних карт. Отримані візуальні та числові результати показали, що запропонований підхід дозволяє гнучко змінювати ступінь деталізації залежно від умов відтворення, зберігаючи чіткість важливих ділянок карти та зменшуючи кількість непотрібних полігонів. Перспективи подальших досліджень передбачають розширення моделі з урахуванням додаткових параметрів, таких як складність текстур, динаміка руху камери та поведінка користувача, а також інтеграцію алгоритмів машинного навчання для автоматичної оптимізації вагових коефіцієнтів. Окремим напрямом розвитку є адаптація моделі для потокового рендерингу карт у вебсередовищі та на мобільних пристроях, що дозволить підвищити ефективність роботи з великими геопросторовими даними у режимі реального часу.

Список бібліографічного опису

1. A comprehensive and up-to-date web-based interactive 3D emergency response and visualization system using Cesium Digital Earth: taking landslide disaster as an example / Z. Yang et al. *Big Earth Data*. 2023. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2172823> (date of access: 07.08.2025).
2. Semantic 3D city interfaces–Intelligent interactions on dynamic geospatial knowledge graphs / A. Chadzynski et al. *Data-Centric Engineering*. 2023. Vol. 4. URL: <https://doi.org/10.1017/dce.2023.14> (date of access: 07.08.2025).
3. Preserve Integrity in Realtime Event Summarization / C. Lin et al. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*. 2021. Vol. 15, no. 3. P. 1–29. URL: <https://doi.org/10.1145/3442344> (date of access: 07.08.2025).
4. Level-of-detail quad meshing / H.-C. Ebke et al. *ACM Transactions on Graphics*. 2014. Vol. 33, no. 6. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1145/2661229.2661240> (date of access: 08.08.2025).
5. Moving level-of-detail surfaces / C. Mercier et al. *ACM Transactions on Graphics*. 2022. Vol. 41, no. 4. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1145/3528223.3530151> (date of access: 08.08.2025).
6. Paskalova M. IMPROVEMENT OF THE 3D MODELING AUTOMATED SYSTEM IN MILITARY EQUIPMENT. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*. 2021. Vol. 1, no. 14. P. 222–227. URL: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.222-227> (date of access: 08.08.2025).
7. Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016. Vol. 59. P. 25–37. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005> (date of access: 08.08.2025).

References

1. A comprehensive and up-to-date web-based interactive 3D emergency response and visualization system using Cesium Digital Earth: taking landslide disaster as an example / Z. Yang et al. *Big Earth Data*. 2023. P. 1–23. URL: <https://doi.org/10.1080/20964471.2023.2172823> (date of access: 07.08.2025).
2. Semantic 3D city interfaces–Intelligent interactions on dynamic geospatial knowledge graphs / A. Chadzynski et al. *Data-Centric Engineering*. 2023. Vol. 4. URL: <https://doi.org/10.1017/dce.2023.14> (date of access: 07.08.2025).
3. Preserve Integrity in Realtime Event Summarization / C. Lin et al. *ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data*. 2021. Vol. 15, no. 3. P. 1–29. URL: <https://doi.org/10.1145/3442344> (date of access: 07.08.2025).
4. Level-of-detail quad meshing / H.-C. Ebke et al. *ACM Transactions on Graphics*. 2014. Vol. 33, no. 6. P. 1–11. URL: <https://doi.org/10.1145/2661229.2661240> (date of access: 08.08.2025).
5. Moving level-of-detail surfaces / C. Mercier et al. *ACM Transactions on Graphics*. 2022. Vol. 41, no. 4. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.1145/3528223.3530151> (date of access: 08.08.2025).
6. Paskalova M. Improvement of the 3d modeling automated system in military equipment. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*. 2021. Vol. 1, no. 14. P. 222–227. URL: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.222-227> (date of access: 08.08.2025).
7. Biljecki F., Ledoux H., Stoter J. An improved LOD specification for 3D building models. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2016. Vol. 59. P. 25–37. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.04.005> (date of access: 08.08.2025).