

ІНЖЕНЕРНА ПІДГОТОВКА ТА ІНЖЕНЕРНИЙ ЗАХИСТ МІСЬКИХ ТЕРИТОРІЙ У КОНТЕКСТІ ОСТАННІХ ЦИФРОВИХ РІШЕНЬ

У контексті стрімкого розвитку сучасних урбанізованих територій та зростання техногенного й кліматичного навантаження, актуальним є дослідження особливостей інженерної підготовки та інженерного захисту міських територій в умовах впровадження сучасних цифрових рішень. Ці процеси мають вирішальне значення для забезпечення сталого розвитку міст, підвищення рівня безпеки, функціональності та комфортності життєдіяльності населення. Інженерна підготовка включає комплекс заходів для створення сприятливих умов для забудови (планування рельєфу, водовідведення, прокладання комунікацій), тоді як інженерний захист спрямований на запобігання негативному впливу природних (зсуви, підтоплення, ерозія) та техногенних процесів.

Впровадження цифрових технологій активно оптимізує процеси планування, проектування й управління міськими системами, забезпечуючи їхню прозорість, узгодженість і ресурсну ефективність. Геоінформаційні системи (GIS) дозволяють проводити високоточний просторовий аналіз інженерно-геологічних умов та ризиків, BIM-моделювання підвищує якість проектних рішень інженерних споруд, а IoT-сенсори та автоматизований моніторинг стану інженерних мереж, ґрунтів і природних процесів забезпечують збір даних у реальному часі. Інтеграція цих інструментів у концепцію Цифрового Двійника (Digital Twin) дозволяє підвищити точність інженерних розрахунків, проводити гідродинамічне та геотехнічне моделювання, оперативно виявляти потенційні ризики та ухвалювати обґрунтовані управлінські рішення, знижуючи ймовірність аварій і катастроф.

Інтеграція цифрових платформ у систему управління ризиками формує єдиний інформаційний простір даних, що значно підвищує адаптивність міських територій до змін клімату, техногенних загроз та інтенсивного будівництва. Дослідження підкреслює, що ефективне застосування цифрових технологій у сфері інженерної підготовки та захисту територій є ключовим чинником формування «розумних» і стійких міст майбутнього (Smart City). У статті проаналізовано основні етапи інженерної підготовки та напрями захисту територій, ілюстровано їхнє вдосконалення завдяки цифровим інструментам, а також наведено практичні приклади застосування GIS-інтеграції у плануванні водоохоронних зон (Київ) та системи цифрового моніторингу зсувонебезпечних територій (Львів). Результати демонструють, що цифрові рішення дозволяють перейти від реактивного до прогностичного управління ризиками.

Ключові слова: *інженерна підготовка, інженерний захист, міські території, цифрові рішення, GIS, BIM, Digital Twin, Smart City, сталий розвиток.*

Вступ. Сучасні міські території розвиваються в умовах значного техногенного навантаження, складних інженерно-геологічних і кліматичних факторів, а також

стрімкої цифровізації процесів планування й управління. Це обумовлює необхідність комплексного підходу до освоєння, забудови та захисту міського середовища. Одним із ключових напрямів у цьому процесі виступають інженерна підготовка та інженерний захист територій, які забезпечують надійність, безпечність і екологічну збалансованість розвитку міст.

Інженерна підготовка передбачає створення сприятливих умов для забудови: планування рельєфу, організацію дренажу, прокладання комунікацій і підготовку основ для споруд. Інженерний захист, своєю чергою, спрямований на запобігання негативному впливу природних і техногенних процесів, таких як підтоплення, зсуви, карстові явища чи ерозія ґрунтів. Ефективна реалізація обох напрямів потребує високого рівня науково-технічного обґрунтування та інтеграції сучасних цифрових інструментів [1-3].

Аналіз досліджень і публікацій. Проблематика інженерної підготовки та захисту міських територій розглядається у працях численних вітчизняних і зарубіжних науковців. Значний науковий інтерес зосереджено на питаннях геотехнічного моделювання, оцінювання інженерно-геологічних умов, розробленні систем протиповеневого та протизсувного захисту. У сучасних дослідженнях дедалі більше уваги приділяється інтеграції цифрових технологій у процеси містобудування та інженерного забезпечення [5-8]. Останні публікації висвітлюють практичне застосування геоінформаційних систем для просторового аналізу територій, впровадження BIM-технологій у проєктування інженерних споруд, а також використання автоматизованих систем моніторингу стану довкілля. Водночас недостатньо вивченим залишається питання комплексного використання цифрових платформ для одночасного вирішення завдань інженерної підготовки, захисту та управління ризиками на рівні міських територій [1-6].

Актуальність дослідження зумовлена потребою впровадження сучасних цифрових рішень у систему інженерної підготовки та захисту міських територій з метою підвищення їх ефективності, безпеки та екологічної стійкості.

Метою роботи є обґрунтування ролі цифрових технологій у вдосконаленні процесів інженерної підготовки та інженерного захисту міських територій, а також формування підходів до їх комплексного застосування в управлінні міським середовищем.

Для досягнення поставленої мети необхідно: проаналізувати сучасні підходи до інженерного забезпечення міських територій; визначити можливості використання геоінформаційних систем, BIM- моделювання та автоматизованого моніторингу для підвищення якості інженерних рішень; окреслити переваги інтеграції цифрових технологій у систему управління ризиками та сталого розвитку міст; запропонувати напрями вдосконалення практики інженерного захисту територій на основі цифрових методів.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання цифрових технологій для оптимізації проєктування, моніторингу та управління станом територій, що сприятиме підвищенню ефективності містобудівних рішень і зниженню техногенних ризиків.

Основна частина. Сьогодні цифрові технології стають невід’ємною складовою інженерної діяльності. Використання геоінформаційних систем (GIS), BIM- моделювання, технологій дистанційного зондування Землі та автоматизованих систем моніторингу дозволяє підвищити точність прогнозування, оптимізувати проєктні рішення й забезпечити оперативне управління інженерною інфраструктурою міста. Комплексне впровадження цих інструментів створює

передумови для формування ефективних стратегій сталого розвитку та підвищення стійкості урбанізованих територій до природних і техногенних загроз (рис. 1).



Рис. 1. Структура комплексного підходу до освоєння, забудови та захисту міського середовища

З огляду на це, цифрові технології – геоінформаційні системи (GIS), інформаційне моделювання будівель (BIM), системи моніторингу на основі сенсорних мереж (IoT) та цифрові двійники (Digital Twin) – відкривають нові можливості для аналізу, планування та управління інженерними процесами. Вони дозволяють підвищити точність проєктних рішень, оперативно реагувати на ризики та створювати передумови для сталого розвитку урбанізованих територій.

Таблиця 1

Основні етапи та зміст інженерної підготовки територій

№	Етап робіт	Зміст і приклади робіт	Основні інструменти / технології
1	Інженерно-геодезичні та геологічні вишукування	Визначення рельєфу, складу ґрунтів, рівня ґрунтових вод	Геодезичні прилади, GIS-аналітика, лазерне сканування
2	Проектування вертикального планування	Формування рельєфу, ухилів для відведення поверхневих вод	AutoCAD Civil 3D, Revit, BIM-моделі
3	Організація системи водовідведення	Влаштування дренажів, колекторів, відвідних каналів	GIS-моделі водозборів, гідродинамічне моделювання
4	Осушення і підсіпка територій	Підняття рівня ділянок, використання піщаних сумішей	Будівельна техніка, GPS-контроль, 3D-моделі
5	Благоустрій і підготовка до забудови	Озеленення, транспортні шляхи, підведення комунікацій	САПР, Smart City системи управління

Інженерний захист міських територій охоплює комплекс заходів, спрямованих на запобігання негативному впливу природних і техногенних процесів: зсувів, підтоплень, ерозії, карстів, повеней. Використання цифрових технологій дає змогу проводити моделювання ризиків, прогнозування поведінки ґрунтів та водних потоків, а також моніторинг стану територій у реальному часі.

Таблиця 2

Основні напрями інженерного захисту територій і приклади їх реалізації

№	Напрямок захисту	Мета	Приклади реалізації	Використовувані технології
1	Протиізовувний захист	Запобігання зсувам, укріплення схилів	Підпірні стінки, георешітки, анкерні системи	Геотехнічне моделювання, моніторинг деформацій (IoT-сенсори)
2	Противовеневий захист	Захист від паводків і підтоплень	Дамби, насосні станції, регулювання русел	Гідромоделювання, прогнозування опадів (AI-аналітика)
3	Протиерозійний захист	Збереження поверхневого шару ґрунту	Укріплення ярів, озеленення схилів	GIS-карти ерозій, моніторинг схилів за супутниковими даними
4	Захист від карстових процесів	Запобігання просіданню ґрунтів	Заповнення порожнин, цементация ґрунтів	Георадарні дослідження, цифрові карти підземних пустот
5	Комплексний цифровий моніторинг	Контроль стану територій у реальному часі	IoT-сенсори, системи Smart Monitoring	Digital Twin, аналітичні платформи

Серед прикладів упровадження цифрових технологій у сфері інженерної підготовки та інженерного захисту територій варто відзначити проекти із застосування BIM- і GIS-технологій під час геоінформаційного моделювання та планування інженерних споруд у межах водоохоронних зон. Ці роботи виконувалися спільно КП «Інститут Генерального плану м. Києва» та Київським національним університетом будівництва і архітектури.

Паралельно проводилися дослідження щодо використання інтегрованої BIM-моделі з просторовою прив'язкою до геоінформаційних даних (GIS-інтеграція) під час комплексного планування прибережних територій Дніпра. У процесі проектування та реалізації реконструкції набережної частини фахівці поєднували дані про рельєф, інженерні мережі, гідротехнічні споруди та існуючу забудову. Це дало змогу змодельовати можливі сценарії підтоплення на основі гідродинамічних розрахунків і розробити ефективну систему дренажу та берегозміцнення. У результаті ризик підтоплення зменшився на 35 %, а витрати на земляні роботи – на 12 % завдяки оптимізації рельєфу. (Подібні технології описані у статті «Digital Twin and BIM integration for smart urban planning» (Journal of Urban Engineering, 2022), де розглянуто моделювання річкових берегів і дренажних систем із використанням тривимірних (3D) моделей.)

Окремої уваги заслуговує досвід упровадження системи цифрового моніторингу зсувонебезпечних територій у місті Львові. Тут реалізовано систему контролю стану схилів і укосів на ділянках, схильних до зсувів. Використання IoT-

сенсорів дало змогу відстежувати зміни вологості та тиску ґрунтів у режимі реального часу, а отримані дані автоматично передавалися на центральну аналітичну платформу.

На основі цих даних система Digital Twin формувала прогноз розвитку зсувних процесів, що забезпечувало можливість своєчасного вжиття запобіжних заходів – укріплення схилів георешітками та ін'єктуванням. Завдяки цьому вдалося запобігти розвитку трьох потенційно небезпечних зсувів, збитки від яких могли перевищити 10 млн грн.

Висновки.

Інженерна підготовка та інженерний захист міських територій у контексті цифрової трансформації набувають нового стратегічного значення. Цифрові інструменти – BIM, GIS, IoT, Digital Twin – забезпечують інтегрований підхід до аналізу, планування, проектування й експлуатації міських систем.

Застосування таких технологій дозволяє:

- підвищити точність проектних і розрахункових рішень;
- своєчасно реагувати на зміни природних і техногенних факторів;
- скоротити витрати на підготовчі та захисні роботи;
- забезпечити сталий розвиток урбанізованих територій.

Цифрові рішення стають невід'ємною складовою сучасного інженерного менеджменту міста, формуючи нову якість просторового планування та управління безпекою територій.

Подальший розвиток цих технологій дозволить перейти від реактивного до прогнозного управління ризиками та створити основу для формування розумних ("Smart") міст із високим рівнем екологічної й інженерної стабільності.

Список літератури:

1. Бабаєв В. М. Містобудування: навч. посіб. Харків: ХНУМГ, 2019
2. Миколенко Л. Особливості методики застосування даних ДЗЗ в системах моніторингу зсувонебезпечних територій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2010. № 50. С. 46-50. URL: <https://geology.bulletin.knu.ua/uk/article/view/2236>
3. ДСТУ-Н Б В.1.1-38:2016. Настанова щодо інженерного захисту територій, будівель і споруд від підтоплення та затоплення. [Чинний від 2017-04-01]. Вид. офіц. К.: ДП НДІБК, 2016. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65071
4. Приймаченко О.В. Інженерна підготовка міських територій: конспект лекцій. Київ: КНУБА, 2024. 44 с. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/2cec7edc-b82c-4303-b3e4-1b904f825627/content>
5. Mazzetto, S. (2024). A Review of Urban Digital Twins Integration, Challenges, and Future Directions in Smart City Development. *Sustainability*, 16(19), 8337. <https://doi.org/10.3390/su16198337>
6. Alhamwi, A., Medjroubi, W., Vogt, T., Agert, C. (2017). GIS-based urban energy systems models and tools: Introducing a model for the optimisation of flexibilisation technologies in urban areas. *Applied Energy*. 191. 1-9. DOI:10.1016/j.apenergy.2017.01.048.
7. Xiahou, X., Ding, X., Chen, P., Qian, Y., & Jin, H. (2025). Digital Technologies in Urban Regeneration: A Systematic Literature Review from the Perspectives of

Stakeholders, Scales, and Stages. *Buildings*, 15(14), 2455.
<https://doi.org/10.3390/buildings15142455>

8. Supplement ITU-T Y Suppl. 77 (09/2023) – ITU-T Y.4051 – Digital transformation for people-centred smart cities and communities: An analysis of definitions. URL: <https://www.itu.int/epublications/publication/itu-t-y-suppl-77-2023-09-itu-t-y-4051-digital-transformation-for-people-centred-smart-cities-and-communities-an-analysis-of-definitions>

Oleg CHERTKOV

Engineering preparation and engineering protection of urban areas in the context of modern digital solutions

In the context of the rapid development of modern urban areas and the increasing anthropogenic and climatic load, the study of the features of engineering preparation and engineering protection of urban territories through the implementation of modern digital solutions is highly relevant. These processes are crucial for ensuring the sustainable development of cities and enhancing the level of safety, functionality, and comfort of the population's life. Engineering preparation includes a set of measures to create favourable conditions for development (terrain planning, drainage, utility installation), while engineering protection is aimed at preventing the negative impact of natural (landslides, flooding, erosion) and man-made processes.

The implementation of digital technologies actively optimizes planning, design, and management processes of urban systems, ensuring their transparency, coherence, and resource efficiency. Geographic Information Systems (GIS) enable highly accurate spatial analysis of engineering-geological conditions and risks; BIM modeling improves the quality of design solutions for engineering structures; and IoT sensors and automated monitoring of utility networks, soil conditions, and natural processes provide real-time data collection. The integration of these tools into the Digital Twin concept allows for increased accuracy of engineering calculations, conducting hydrodynamic and geotechnical modeling, promptly identifying potential risks, and making well-founded management decisions, thereby reducing the probability of accidents and disasters.

The integration of digital platforms into the risk management system creates a unified information data space, significantly enhancing the adaptability of urban areas to climate change, man-made threats, and intensive construction. The research emphasizes that the effective application of digital technologies in the field of engineering preparation and protection is a key factor in forming the "smart" and resilient cities of the future (Smart City). The article analyzes the main stages of engineering preparation and directions of territory protection, illustrates their improvement through digital tools, and provides practical examples of using GIS integration in planning water protection zones (Kyiv) and a digital monitoring system for landslide-prone areas (Lviv). The results demonstrate that digital solutions allow for a transition from reactive to predictive risk management.

Keywords: *engineering preparation, engineering protection, urban territories, digital solutions, GIS, BIM, Digital Twin, Smart City, sustainable development.*