

**Кирило КРИВДА,**

аспірант кафедри менеджменту в будівництві

ORCID: 0009-0005-6724-4119

*Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ*

## **ЦИФРОВІ ІНСТРУМЕНТИ ТА ТЕХНІКО-МЕТОДИЧНІ ПЛАТФОРМИ МОНІТОРИНГУ ЯК ЗАСІБ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІНСЬКИХ РІШЕНЬ У СИСТЕМІ КОНТРОЛЮ ЩІЛЬНОЇ ЗАБУДОВИ**

*У дослідженні здійснено системне обґрунтування ролі цифрових інструментів та техніко-методичних платформ моніторингу як інституційно інтегрованого засобу підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови. Доведено, що в умовах інтенсивної урбанізації, підвищення просторової концентрації об'єктів будівництва та зростання навантаження на інженерно-транспортну інфраструктуру традиційні методи спостереження та регулярного контролю не забезпечують належного рівня оперативності, точності та прогностичної спроможності.*

*Обґрунтовано, що цифрові платформи моніторингу формують інтегроване інформаційно-аналітичне середовище, яке поєднує сенсорні мережі, IoT-технології, геоінформаційні системи (GIS), супутниковий моніторинг типу InSAR, лазерне сканування, технології цифрових близнюків та аналітику великих даних (Big Data). Встановлено, що їх комплексне застосування забезпечує багаторівневий контроль технічного стану забудови, виявлення деформацій, аналіз просторових переважань, оцінювання геотехнічних та екологічних ризиків у режимі реального часу.*

*Проаналізовано функціонально-структурну архітектуру Smart Monitoring Systems та Urban Density Control Platforms як технологічну основу evidence-based planning. Визначено критерії ефективності платформ, що включають точність даних, масштабованість, інтеграційну сумісність, надійність, інформаційну безпеку та здатність до адаптивного прогнозування.*

*Доведено, що впровадження цифрових інструментів моніторингу сприяє переходу від реактивної моделі управління щільною забудовою до адаптивної та прогностично орієнтованої системи регулювання. Сформульовано висновок про те, що цифрові платформи виступають не лише технічним інструментарієм спостереження, а стратегічним компонентом інституційного механізму забезпечення безпеки, стійкості та збалансованого розвитку урбанізованих територій.*

*Додатково встановлено, що ефективність цифрових платформ визначається не лише технологічними характеристиками, але й рівнем їх інтеграції у систему муниципально-управління, нормативно-правове середовище та організаційні процедури прийняття рішень.*



*Важливим чинником є формування єдиних стандартів інтеперабельності даних, що забезпечують синхронізацію інформаційних потоків між органами влади, девелоперами, експлуатуючими організаціями та громадськістю. Обґрунтовано необхідність застосування алгоритмів машинного навчання та прогнозу аналітики для ідентифікації прихованих тенденцій просторового розвитку та раннього виявлення критичних зон ризику. Підкреслено, що цифровізація моніторингу цільної забудови створює передумови для формування прозорої системи контролю, підвищення довіри до управлінських рішень і забезпечення довгострокової стійкості урбанізованих територій в умовах структурної невизначеності та динамічних трансформацій міського простору.*

**Ключові слова:** *цифровий моніторинг, щільна забудова, геоінформаційні системи, IoT-технології, цифрові близнюки, Big Data-аналітика, Smart Monitoring Systems, підтримка управлінських рішень.*

**Вступ.** Інтенсифікація урбанізаційних процесів та зростання щільності забудови зумовлюють трансформацію підходів до управління міськими територіями. У сучасних умовах просторові, технічні та соціально-економічні параметри розвитку міста формують складну взаємозалежну систему, в якій будь-яке порушення структурної рівноваги може спричинити багаторівневі негативні наслідки.

Контроль щільної забудови вимагає безперервного спостереження за станом інженерних конструкцій, ґрунтових основ, транспортних вузлів та інфраструктурних мереж. Водночас традиційні інструменти нагляду – періодичні інспекції, локальні технічні обстеження, фрагментарна статистична звітність – не відповідають вимогам динамічного середовища.

Цифрові технології відкривають можливість формування інтегрованої системи моніторингу, що забезпечує синхронізацію фізичних вимірювань із просторово-аналітичними моделями. Поєднання сенсорних мереж, супутникових технологій, GIS-платформ та цифрових близнюків дозволяє формувати багатовимірне відображення стану урбанізованого простору.

У такому контексті цифрові інструменти набувають статусу ключового елемента управлінської інфраструктури, забезпечуючи аналітичну підтримку прийняття стратегічних і оперативних рішень.

**Актуальність дослідження** зумовлена необхідністю підвищення рівня безпеки, надійності та стійкості щільної забудови в умовах зростаючих техногенних і природних ризиків. Концентрація будівельних об'єктів у межах обмежених територій створює додаткове навантаження на ґрунтові основи, інженерні комунікації та транспортну інфраструктуру.

Своєчасне виявлення деформацій, перевантажень і структурних відхилень можливе лише за умови використання високоточного цифрового моніторингу. Інтеграція Big Data-аналітики, алгоритмів машинного навчання та цифрових платформ дозволяє формувати прогностичні моделі ризиків і забезпечувати адаптивну корекцію управлінських рішень.

Впровадження техніко-методичних платформ моніторингу є передумовою переходу до моделі «розумного міста», де управління базується на системному аналізі даних та принципах доказовості.

**Постановка проблеми** полягає у відсутності комплексної інтегрованої архітектури цифрового моніторингу, здатної забезпечити системну підтримку управлінських рішень у сфері контролю щільної забудови. Наявні інструменти

функціонують переважно ізольовано, що призводить до фрагментарності інформаційного середовища та обмежує можливості стратегічного прогнозування.

Виклики пов'язані з необхідністю уніфікації стандартів обміну даними, інтеграції різнотипних джерел інформації та розроблення алгоритмів адаптивного реагування на відхилення. Недостатньо розробленими залишаються механізми трансформації технічних даних моніторингу у формалізовані управлінські рішення.

Таким чином, виникає потреба у створенні цілісної техніко-методичної платформи, що поєднує технологічні, аналітичні та організаційні компоненти в єдину систему підтримки управління щільною забудовою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У наукових працях останніх років розглядаються питання впровадження IoT-технологій, цифрових близнюків, GIS-аналітики та систем штучного інтелекту в управління міськими територіями. Значна увага приділяється концепції Smart City, цифровій трансформації муніципального управління та розвитку систем супутникового моніторингу.

Разом з тим, більшість досліджень концентруються на окремих технологічних аспектах без належної інтеграції їх у контур прийняття управлінських рішень. Недостатньо опрацьованими залишаються питання інституційного впровадження платформ, критерії оцінювання їх ефективності та механізми стандартизації інформаційних потоків.

Потребує подальшого дослідження міждисциплінарна модель інтеграції технічного моніторингу, аналітики та управлінського планування в єдину цифрову екосистему контролю щільної забудови.

**Метою цієї статті** є теоретичне обґрунтування та розроблення концептуальної моделі цифрових інструментів і техніко-методичних платформ моніторингу як системного засобу підтримки управлінських рішень у сфері контролю щільної забудови, визначення критеріїв їх ефективності, надійності, інтеграційної сумісності та прогностичної спроможності в умовах динамічного урбанізованого середовища.

**Виклад основної інформації.** Цифровий моніторинг в урбанізованому середовищі є концептом, котрий поєднує систематичне спостереження, обробку, збір та аналіз даних про фізичний стан міських територій, інфраструктури, будівель та навколишнього середовища за допомогою цифрових технологій. Він виступає важливою складовою сучасного управління містами, особливо в умовах щільної забудови, коли традиційні методи контролю стають не ефективними через складність урбаністичних процесів та масштаби. У своїй сутності цифровий моніторинг полягає у створенні безперервного інформаційного середовища, вона забезпечує актуальні, деталізовані та точні дані про стан об'єктів у реальному часі. Його функціональна роль полягає у реєстрації відхилень або змін та у формуванні аналітичної бази для розвитку подій, прийняття обґрунтованих управлінських рішень, оцінки ризиків та стратегічного планування міського простору [1].

Цифровий моніторинг в урбанізованому середовищі відрізняється високим ступенем інтеграції різних джерел даних від стаціонарних сенсорів до супутникового знімання та мобільних платформ збору інформації. Однією з головних рис є мультиформатність даних, поряд із геометричними характеристиками об'єктів фіксуються показники навантаження, температурних режимів, вібрації, деформації, вологості, тощо. Завдяки цьому забезпечується технічний контроль стану споруд, інфраструктури та загальний моніторинг життєдіяльності міського середовища. Щільна забудова, котра створює складні

інженерно-геотехнічні та соціальні ризики, потребує високого рівня моніторингової точності та оперативності, цифрові технології стають основою для ефективного контролю та регулювання [1].

Для глибшого розуміння специфіки цифрового моніторингу треба розглядати його класифікацію за видами застосованих інструментів, які здійснюють збір та обробку даних у різних площинах міського середовища. Ключовими інструментами, котрі забезпечують функціонування систем цифрового моніторингу є сенсорні мережі, технології Інтернету речей (IoT), геоінформаційні системи (GIS) та концепція цифрових близнюків (Digital Twins) [2].

Сенсорні мережі складають основу для первинного збору даних у цифрових системах. Розподілені комплекси датчиків, які розташовані у контрольованому середовищі, забезпечують вимірювання тиску, перемішень, температури, вібрації, вологості, складу повітря та інших характеристик. У система контролю щільної забудови сенсорні мережі фіксують мінімальні деформації будівельних конструкцій, зміни рівня підземних вод, зміщення ґрунту, що критично важливо для запобігання аварійних ситуацій та підтримки безпеки міського середовища. Важливою особливістю є здатність працювати у складі само організованих систем, передавати дані через бездротові канали та забезпечувати безперервний моніторинг без необхідності втручання людини [3].

Інтернет речі (IoT) Розширюють функціональність сенсорних мереж, створюють інтегроване середовище, де елементи від окремого датчика до великої інженерної системи підключається до єдиної цифрової платформи. У контексті моніторингу щільної забудови вони забезпечують збір даних, попередню обробку, можливість автономного прийняття базових рішень за заданим алгоритмом та обмін між пристроями. Система моніторингу автоматично підвищує рівень контролю на певній ділянці, якщо сенсор деформації фіксує відхилення понад заданий поріг. Інтернет речі дають змогу будувати внучки та масштабовані системи моніторингу, забезпечувати високу швидкість реакції на зміни та підвищувати ефективність використання ресурсів [3].

Геоінформаційні системи (GIS) відіграють ключову роль в аналітичній обробці просторових даних, котрі є базовими для того, щоб управляти щільною забудовою. GIS дозволяють інтегрувати різні джерела даних, наприклад супутникові знімки, дані аерофотознімання, результати наземного моніторингу у єдину картографічну платформу на основі якої здійснюють візуалізацію ризиків, моделювання процесів забудови, аналіз навантаження на міську інфраструктуру. Важливим напрямом використання є побудова карт зон ризику, підтримка прийняття рішень стосовно оптимізації забудови та моделювання сценаріїв розробки урбаністичних процесів. Системи зберігають великі обсяги даних та здійснюють динамічний аналіз, формуючи інтерактивні карти зміни показників у просторі та часі [4].

Цифрові близнюки (Digital Twins) виступають найбільш інноваційною концепцією системах моніторингу та управління щільно забудову. Цифровий близнюк - це віртуальна модель фізичного об'єкта або системи, вона відображає стан у режимі реального часу на основі даних, які надходять від сенсорів або інших джерел. У будівництві та містобудування цифрові близнюки візуалізуються будівель та територій, прогнозують їх поведінку під впливом зовнішніх факторів, виявляють потенційні ризики до їх прояву та оптимізують планування технічного обслуговування. У системах контролю щільної забудови застосування даних систем відкриває можливості для сценарного моделювання, оцінки ефективності

регуляторних заходів та аналізу стійкості забудови до екстремальних навантажень. Завдяки синхронізації цифрової та фізичної реальності цифрові близнюки стають потужним інструментом підтримки управлінських рішень, забезпечують новий рівень контролю та оптимізації міського середовища [5].

Сучасний цифровий моніторинг в урбанізованому середовищі виступає складною багатокомпонентною системою, яка базується на комплексній інтеграції сенсорних мереж, IoT, GIS-платформ і цифрових близнюків. Узгоджене функціонування забезпечує створення адаптивних, гнучких та інтелектуальних систем управління щільної забудови, котрі ефективно реагують на сучасні виклики організації.

У сучасних умовах розвитку міста зростаючи щільності забудови роль Big Data та аналітичних платформ у створенні системи ефективного управління є визначальною. Обсяг даних, які генерується організованим середовищем дуже великий, наприклад сенсорні вимірювання з будівельних об'єктів, трафік мобільних пристроїв, супутникові знімки та ресстраційні дані державних установ. Дані без відповідної системи обробки залишаються хаотичним потоком, непридатним для практичного використання. Big Data-технології вирішують проблеми через побудову масштабних платформ, котрі акумулюють, обробляють, зберігають та аналізують великі обсяги різнопланової інформації у реальному часі. В контексті управління щільною забудовою означає моніторити десятки тисяч змінних одночасно відрізняючи вібрації до змін у структурі населення або транспортного навантаження на окремі ділянки міста.

Аналітичні платформи, які інтегровані з Big Data, відіграють роль інтелектуального ядра системи моніторингу щільної забудови, вони забезпечують зберігання даних, агрегування, класифікацію, інтерпретацію та фільтрацію, яка дає змогу переходити від простого спостереження до аналітичного прогнозування. На практиці реалізується через побудову спеціальних аналітичних панелей, вони візуалізують критичне показники у вигляді діаграм ризиків, теплових карт, графіків напруги в конструкціях або динаміки пересування ґрунтів у зонах забудови. Завдяки цьому управлінці оперативно реагують на загрози та моделюють варіанти їх розвитку, оцінюють ефективність можливих рішень, формують багатоваріативні стратегії адаптації забудову до зовнішніх змін [6].

Big Data у сфері моніторингу щільної забудови є обсягом даних та зміною самого підходу до їх аналізу. Раніше головною задачею було виявити відхилення від норми, зараз акцент зміщується на пошук прихованих закономірностей, комплексних кореляції залежностей та трендів, котрі без спеціалізованих аналітичних платформ недоступні для класичних методів обробки. Через кореляційний аналіз даних можна виявляти, підвищення рівня вібрації у фундаменті однієї будівлі з інтенсивністю руху на прилеглій вулиці, що дозволяє впроваджувати обмеження руху важкого транспорту або зміни у транспортній логістиці району. Big Data та аналітичні платформи стають основою для переходу до інтелектуального управління міським простором, дані перетворюється на активний ресурс створення безпечного, ефективного та сталого середовища щільної забудови [6].

Перспективи розвитку цифрового моніторингу щільної забудови пов'язані з впровадженням технологій штучного інтелекту, автоматизованого прогнозування та машинного навчання. Штучний інтелект відкриває можливості в обробці великих масивів урбаністичних даних, автоматичному виявленні аномалій, розпізнавання

складних просторових патернів та формування управлінських рішень без залучення людини на кожному етапі аналізу. В системах моніторингу щільної забудови штучний інтелект автоматично ідентифікує потенційні точки небезпеки, наприклад зони підвищеної деформації або нормальних вібрацій та надсилає сповіщення відповідальним особам до появи критичних наслідків [7].

Автоматизоване прогнозування стає логічним завершенням розвитку. Завдяки йому системи моніторингу перетворюються на про активних агентів управління, фіксують поточний стан об'єктів та на основі багатофакторних моделей будуть сценарій майбутнього розвитку, що дозволяє міським службам та девелоперам приймати рішення не після виникнення проблеми а на випередження, запобігаючи ризиком, оптимізуючи навантаження на інфраструктуру, плануючи розвиток забудови з урахуванням об'єктних даних про загрози [8].

У перспективі технології штучного інтелекту, автоматизованого прогнозування та машинного навчання призводять до створення повністю само регульованих систем моніторингу міських територій, мінімальне втручання людини буде потрібно лише для стратегічних коригувань. Можна очікувати інтеграцію моніторингових платформ із системами міського управління в реальному часі, що дає змогу реагувати на ризики до їх перетворення на загрозу. Перспективним напрямком є розвиток предиктивних систем моделювання сценаріїв міського розвитку, котрі на основі даних про фізичний стан забудови, економічна активність та демографічні процеси формують стратегії планування нових кварталів, розвитку зеленої інфраструктури, оптимізації транспортних потоків та підвищення стійкості міських систем.

Розвиток цифрового моніторингу з використанням технологій Big Data, Аналітичних платформ, машинного навчання та штучного інтелекту змінює підходи до управління щільно забудову, перетворює управлінські процеси з реактивних на проєктивні та прогнозно-аналітичні, що створює передумови для переходу до якісного нового рівня урбаністичного розвитку, безпека, ефективність та стійкість міських середовищ стає системно керованими характеристиками цифрової міської системи.

Інтеграція цифрових даних у процеси прийняття управлінських рішень у сфері контролю щільної забудови є одним із ключових напрямів розвитку сучасного міського управління, яке забезпечує перехід від традиційних, інтуїтивно-евристичних моделей до науково обґрунтованих, які аналітично підкріплені сценарієм дій. У сучасному урбаністичному середовищі обсяг даних, який генерується різними джерелами, наприклад сенсорними системами моніторингу, супутникову платформами, системами громадської безпеки, геоінформаційними службами постійно зростає, що створює унікальне середовище для формування рішень, які базуються на об'єктивні інформації [9].

На первинному рівні інтеграція цифрових даних означає створення багатоканальної системи збору інформації, дані з різних джерел консолідується в єдину базу, консолідація вимагає розробки уніфікованих протоколів передачі даних, синхронізації форматів та створення системних даних, що дозволяє ідентифікувати походження, актуальність та якість кожного пакета інформації. В умовах щільної забудови, ризики просторового перевантаження, деформації об'єктів та екологічних навантажень зростають у геометричній прогресії, об'єднання даних з різних рівнів стає необхідністю для того, щоб отримати цілісну картину ситуації [10].

Інтеграція цифрових даних вимагає побудови чіткої системи комунікації між різними рівнями управління, муніципалітетами, органами архітектурних-будівельного контролю, компаніями-девелоперами, експертними ситуаціями. Створюються платформи спільного доступу до аналітичної інформації, учасники процесу мають можливість отримувати релевантні дані для прийняття своїх управлінських рішень [11].

Інтеграція цифрових даних у процеси прийняття рішень у системі контролю щільної забудови формою нову модель міського управління, яка заснована на безперервному зборі, аналізі та практичному застосуванні актуальної інформації, що дозволяє істотно підвищити точність оцінок, оптимізувати розподіл ресурсів, скоротити час реакції та підвищити загальну безпеку міського середовища. Дана інтеграція стає основою для створення повноцінних систем «розумного міста» (Smart City), управління урбаністичному процесамі здійснюється на базі глибокої аналітики, прогнозування та автоматизованої адаптації до змін середовища [12].

На нижче наведеному рис. 1 продемонстровано інтегровану архітектуру цифрового моніторингу щільної забудови, вона поєднує мульти сенсорні системи збору даних, модульні обробки, аналітики Big Data та застосування прогнозованих інструментів для підтримки управлінських рішень. Схема відображає цикл перетворення первинних даних від сенсорних мереж, IoT-пристроїв, цифрових близнюків і GIS-даних через зберігання, машинне навчання та аналітичну обробку до формування інтерактивних інтерфейсів, котрі забезпечують ефективний контроль та прогнозування процесів у середовищі щільної забудови.

Система моніторингу щільної забудови базується на комбінації технічних рішень, кожна виконує важливу роль у прогнозованості, забезпеченні безпеки та керуванні урбаністичних процесів. Одним з базових компонентів є мультисенсорна платформа, яка об'єднує в єдину інфраструктуру різні типи сенсорів, геотехнічних, кліматичних, акустичних та структурних. Мультисенсорні платформи фіксують параметри від деформації будівельних елементів і вібрацій до температурних коливань і змін вологості ґрунтів. Перевага полягає у здатності забезпечувати комплексний підхід до оцінки ситуації, дані з різних сенсорів доповнюють одне одного, формують багатовимірну картину стану забудованої території. У сучасних умовах мульти сенсорні платформи інтегруються з системами автоматичної передачі даних у реальному часі, дозволяє мінімізувати часові лагери між виявленням проблем і початком реагування [14].

Одними з потужних інструментів є лазерне сканування, воно забезпечує високоточне тривимірне моделювання територій та об'єктів. Лазерні сканери з міліметровою точністю фіксують положення будівель, інженерних споруд, ґрунтових поверхонь, що робить їх незамінним при контролі за можливими зміщеннями, осіданнями або деформаціями забудові. Лазерне сканування застосовується у статичному форматі для періодичного знімання територій за допомогою стаціонарних сканерів та в мобільному режимі через інтеграцію сканерів із дронами або роботизованими платформами. Основна перевага лазерного планування полягає у швидкості збору великих даних та можливість порівнювати багаточасові знімки для виявлення мінімальних змін в об'єкті [14].

Наявність потужних технічних рішень потребує розвиненої методичної бази для обробки та інтерпретації даних. Одними з ключових напрямів є фільтрація шумів, вона потрібна для того, щоб очищувати первинну інформацію від випадкових або некоректних знань, котрі виникають через технічні похибки обладнання, вплив

погодних умов або інтерференцію сигналів. Фільтрація здійснюється на базовому рівні через математичні методи усереднення, ковзного середнього, медіанного фільтрування та через складні алгоритми на основі машинного навчання, котрі виявляють шаблони відхилень та автоматично відокремлюють їх [15].

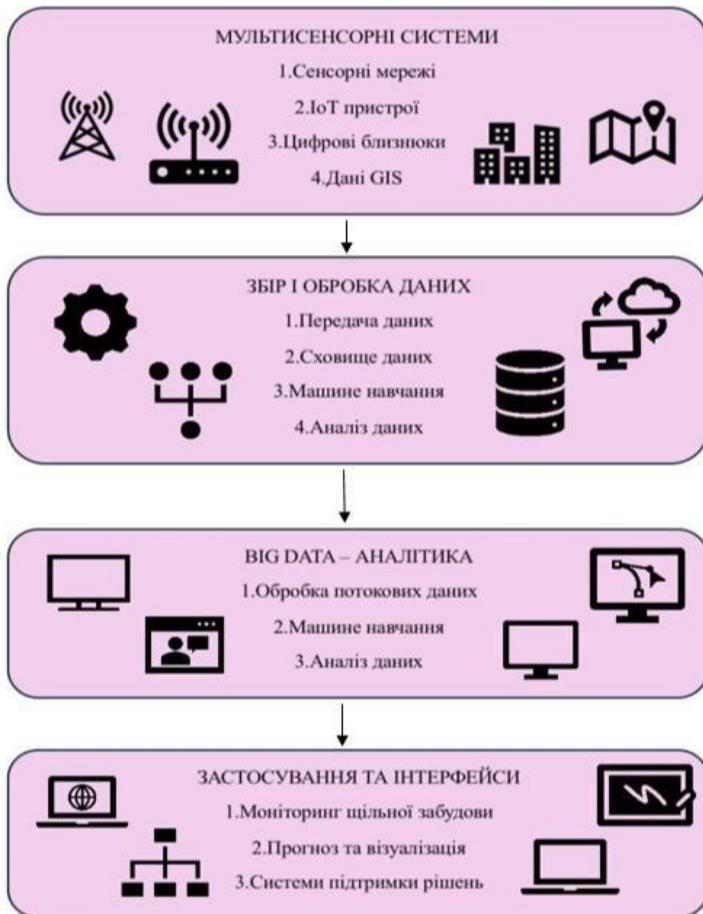


Рис. 1. Інтегрована архітектура цифрового моніторингу щільної забудови на основі мультисенсорних систем і Big Data-аналітики (розроблено автором на основі [13])

Важливим також є застосування алгоритмів предиктивного аналізу, котрі дають змогу будувати прогнози розвитку на основі наявних даних та виявлених трендів.

У системах моніторингу щільної забудови предиктивні алгоритми дозволяють прогнозувати ймовірність виникнення тріщин у будівлях, осідання фундаментів, деформації дорожнього полотна, зміни рівня підземних вод тощо. Предиктивний аналіз базується на багатофакторних регресійних моделях, методах кластеризації, нейронних мережах та стохастичного моделювання, вони дають можливість прогнозувати ймовірність події та розраховувати потенційний масштаб і часові рамки настання.

Технічні рішення у системах моніторингу щільної забудови, мультисенсорні платформи, лазерне сканування, супутникова моніторинг у поєднанні з розвинутими методами для обробки даних створюють комплексну основу для формування ефективної системи контролю та управління ризиками в урбанізованому середовищі. Інтеграція в єдину аналітичну платформу дозволяє здійснювати моніторинг поточного стану забудови та активно прогнозувати її розвиток, запобігати кризовим явищем та забезпечувати стійкість міських територій.

Техніко-методичні платформи використовується для моніторингу щільної забудови є втіленням комплексного підходу до обробки, збору, аналізу та інтерпретації даних, дозволяють в режимі реального часу контролювати стан середовища та приймати обґрунтовані рішення. Серед таких систем заслуговують уваги Smart Monitoring Systems і Urban Density Control Platforms, сьогодні вони визнані одними з найбільш прогресивних рішень у сфері управління забудованими територіями високої щільності.

Smart Monitoring Systems є інтегрованими платформи, вони поєднують сенсорні мережі, система аналітики великих даних, геоінформаційні технології та автоматизовані модулі попередження про критичні зміни в забудові. Концепція даних систем передбачає створення багаторівневої інформаційної інфраструктури, вона забезпечує безперервне моніторинг фізичного стану об'єктів, середовищ них параметрів та соціальних процесів у зоні щільної забудови. Основним елементом є мульти сенсорні мережі, який розташовується на критичних елементах будівельних конструкцій, транспортних магістралях, інженерних комунікаціях та ландшафтних структурах. Сенсори передають дані до центральних хмарних платформ, де здійснюється первинна обробка та агрегація. Подальше та передбачає використання модулів аналітики, котрій базується на алгоритмах машинного навчання для того, щоб виявляти закономірності, тренди та аномалії [16].

Особливістю Smart Monitoring Systems є інтеграція системами прогнозного моделювання, дозволяють фіксувати існуючі зміни та будувати сценарій розвитку ситуації за різних внутрішніх та зовнішніх умов. На основі даних про осідання певної ділянки території система автоматично оцінює ризики пошкодження навколишніх споруд протягом певного часу та формулює рекомендації стосовно стабілізаційних заходів. Системи включають інтерфейси для міських служб, котрі здійснюють візуалізацію даних у вигляді інтерактивних карт ризиків, графіків динаміки стану об'єктів та панелей KPI. Використанням Smart Monitoring Systems сприяє скороченню часу реакції на критичні зміни, оптимізації витрат на технічне обслуговування інфраструктури, підвищення безпеки мешканців та збереження стійкості міського середовища.

Urban Density Control Platforms спеціалізується на управлінні щільністю забудови через комплексний моніторинг соціально-економічних, екологічних та просторових параметрів міського середовища. У порівнянні з Smart Monitoring

Systems, котрі акцентують увагу на фізичному стані, Urban Density Control Platforms інтегрує дані з технічних сенсорів та систем реєстрації населення, мобільних операторів, муніципальних служб та транспортних потоків. Основною задачею є виявлення критичних зон перевантаження інфраструктури, визначення оптимальних щільностей забудови для збереження якості життя та формування рекомендацій стосовно урбаністичних проєктів [18].

Urban Density Control Platforms об'єднують у своїй архітектурі модулі просторового аналізу на основі GIS-технологій, соціально-економічного моделювання та штучного інтелекту для того, щоб оцінювати сценарії розвитку територій. Система виявляє, коли певний район зазнає перевантаження за показником густоти населення, який супроводжується погіршенням транспортної доступності, підвищенням навантаження на мережі, водопостачання чи енергопостачання, зростанням кількості надзвичайних ситуацій. На основі даних платформ автоматично формує пропозиції стосовно обмеження інтенсивності нової забудови, необхідності модернізації інженерної інфраструктури або пріоритетизації функціонального призначення об'єктів.

Ключовою особливістю Urban Density Control Platforms є інтеграція в системи стратегічного міського планування, дозволяє реагувати на поточні проблеми та формувати довгострокові програми, платформи часто підтримують сценарний прогнозування від 5 до 20 років уперед, використовують складні моделі урбаністичної динаміки, які враховують як фізичні зміни середовища, соціально-економічні тенденції, демографічні зрушення, зміни структури зайнятості та екологічні трансформації [17].

Smart Monitoring Systems та Urban Density Control Platforms Відображають, що сучасний контроль за щільною забудовою неможливий без мультикомпонентних платформ, котрі поєднують технічний, прогнозний та аналітичний рівень управління. Упровадження дозволяє переходити від реактивних стратегій реагування на проблеми до проєктивних моделей управління, коли ризики та виклики передбачаються заздалегідь, а управлінські рішення базуються на глибокому, багаторівневому аналізі великих масивів даних.

Оцінка ефективності технічних платформ для підтримки оперативного управління забудовою є складовою в системі сучасного міського в менеджменту, правильне функціонування платформ визначає своєчасність реагування на ризики, стабільність роботи урбаністичну інфраструктури та рівень безпеки середовища проживання населення. Ефективність технічних платформ оцінюють через ряд критеріїв, ключову роль відіграють точність зібраних даних, якість аналітичних висновків, швидкість обробки інформації, гнучкість інтеграція з іншими системами та здатність до масштабування. Першим аспектом оцінки є перевірка достовірності даних, генерується система, коли платформа забезпечує мінімальну похибку у вимірах незалежно від змін навколишнього умов, критично для моніторингу фізичних параметрів будівельних конструкцій або транспортних потоків в умовах щільної забудови.

Гнучкість є невід'ємною частиною оцінки ефективності платформи до інтеграції з іншими технічними та інформаційними системами. Оперативне управління забудова потребує дані із транспортних систем, електричних мереж, систем водопостачання, екологічного моніторингу тощо. Технічна платформа повинна підтримувати відкриті стандарти обміну даними та бути готовим працювати в мультиагентних середовищах. Потрібно оцінювати адаптивність

платформи до змін зовнішніх умов, до змін конфігурації забудови, розширення території моніторингу або впровадження нових сенсорних технологій. Останній важливий критерій ефективності юзабіліті або зручність використання платформи кінцевим користувачем, найпотужніша техніка буде малоефективною, якщо інтерфейс складний для інтерпретації або вимагає тривалого часу для навчання операторів [18].

З оцінкою ефективності технічних платформ потрібно враховувати вимоги до їх масштабу вності та надійності, дані характеристики визначають життєздатність систем у довгостроковій перспективі. Надійність техніка-методичних рішень у сфері контрольну забудови означає здатність системи функціонувати без збоїв у широкому діапазоні умов від пікових навантажень на комунікаційні мережі до екстремальних погодних явищ. Платформа повинна демонструвати високу стійкість до втрати окремих каналів передачі, перебоїв пошкоджень інфраструктури, забезпечуючи автоматичне перемикання на резервні системи та збереження безперервності моніторингу.

Вимоги до надійності включають захист даних, втрати інформації або спотворення внаслідок несанкціонованого втручання. Платформи мають вбудовані механізми шифрування переданих даних, систему автентифікації користувачів та резервне копіювання інформації у середовищах для запобігання повної втрати у випадку технічних збоїв. Надійність проявляється у стабільності роботи аналітичних модулів, результати прогнозування повинні залишатись послідовними при незначних змінах вхідних даних, котрі вимагають використання високоякісних математичних моделей та регуляторного тестування алгоритмів. Стосовно масштабованості, техніка-методичні рішення повинні проектуватися, щоб у разі необхідності розширення системи на нові території, включення додаткових сенсорних джерел або інтеграції нових типів даних не вимагалось повної перебудова архітектури. Платформа підтримує модульний принцип побудови, дозволяє додавати нові функціональні блоки без порушення роботи існуючих систем. Масштабованість також означає здатність обробляти обсяг даних без істотного погіршення продуктивності, передбачає використання хмарних обчислень, розподілених баз даних та оптимізованих алгоритмів обробки потокових даних [19].

Важливо, щоб масштабованість враховувала технічні та організаційні аспекти. Розширення системи не повинно призводити до неконтрольованого збільшення витрат на обслуговування. Ефективні платформи повинні мати автоматизовані інструменти налаштування нових сенсорів, адаптивні алгоритми балансування навантаження та механізми само діагностики, що буде зменшувати витрати на адміністрування у міру зростання масштабів системи.

Оцінка ефективності технічних платформ та формування вимог до їх надійності та масштабованості є комплексним завданням, котра охоплює технологічні та організаційно управлінських аспекти. Інтеграція високої точності, швидкодії, стійкості до зовнішніх загроз та здатності до гнучкого масштабування створює посправжньому ефективний системи моніторингу, котрі здатні забезпечувати безпечний, динамічний та стійкий розвиток щільної забудови.

На нижче наведеній таблиці 1 продемонстровано порівняльну характеристику сучасних платформ моніторингу. Вона дозволяє оцінити можливості технологічних рішень в залежності від потреб оперативного управління забудованими територіями та завдань забезпечення їх стійкості й безпеки.

Таблиця 1

**Порівняльний аналіз техніко-методичних платформ моніторингу для контролю щільної забудови за критеріями точності, масштабованості та інтеграційної спроможності**

Платформа	Точність вимірювань і прогнозів	Масштабованість системи	Інтеграційна спроможність із зовнішніми системами	Особливості застосування
<i>Smart Monitoring Systems</i>	Дуже висока (до 1 мм для деформацій, до 0,1°C для температури)	Висока (можливість підключення тисяч сенсорів у реальному часі)	Висока (підтримка відкритих API, інтеграція з ERP, BIM, GIS)	Застосовується для фізичного моніторингу споруд, комунікацій, елементів інфраструктури
<i>Urban Density Control Platforms</i>	Висока (на основі статистичних та соціально-економічних даних)	Середня (залежить від обсягу адміністративних і демографічних даних)	Дуже висока (інтеграція з муніципальними реєстрами, транспортними системами, екомоніторингом)	Оптимізація щільності забудови, регулювання навантаження на інфраструктуру
<i>GIS-based Monitoring Systems</i>	Висока для геопросторових параметрів (похибка до 10 см)	Дуже висока (масштабування на рівень міста або регіону)	Середня (потребує спеціалізованих конекторів для інтеграції з фізичними сенсорами)	Управління просторовими ризиками забудови, картографування критичних зон
<i>IoT-системи моніторингу забудови</i>	Середня (залежить від класу сенсорів, похибка 2–5%)	Дуже висока (гнучке підключення нових пристроїв)	Висока (інтеграція через MQTT, HTTP, CoAP протоколи)	Безперервний моніторинг локальних процесів (вібрації, навантаження, тиск)
<i>Супутникові системи InSAR</i>	Дуже висока (деформації поверхні до 1 мм на рік)	Висока (охоплення територій від районного до національного масштабу)	Середня (потрібна адаптація даних до місцевих систем моніторингу)	Виявлення осідань, моніторинг геотехнічних процесів на великих територіях
<i>Digital Twins для забудови</i>	Дуже висока (моделювання об'єктів із точністю 3D-сканування)	Середня (потребує значних ресурсів для масштабування)	Дуже висока (синхронізація з реальними об'єктами через IoT, BIM, ERP)	Симуляція поведінки об'єктів, прогнозування довгострокових ризиків

Джерело: розроблено автором на основі [19]

Інституційна роль моніторингових даних у системі управління міським простором набуває критичного значення, якісні, достовірні та актуальні дані стають фундаментом для розробки стратегічних планів розвитку міст, впровадження систем контролю за будови та забезпечення безпеки середовища. У сучасній концепції управління містом моніторингові дані більше не сприймаються як допоміжний елемент постфактум-аналізу, вони стають інституційним ресурсом першого порядку на якому базується ключові управлінські процеси. На рівні муніципального управління цифрові дані стан про інфраструктури, забудови, транспортні мережі, екологічне середовище інтегруються нормативно-правовову основу прийняття рішень та стають частиною системи доказового планування (evidence-based planning), кожен етап розвитку міського простору обґрунтований конкретними показниками, прогнозами та оцінкою ризиків.

Моніторингові дані відіграють роль своєрідного зв'язуючого елемента між різними рівнями управління, наприклад адміністративним, регуляторним, соціальним та економічним. Рішення стосовно затвердження нового проєкту житлового комплексу або офісного центру базується на загальній концепції розвитку міста та на фактичних даних про щільність існуючої забудови, ступінь завантаженості інфраструктури, ризики транспортного колапсу або екологічного перенавантаження. Моніторингові платформи забезпечують можливість оцінювати показники та формувати інформаційний базис для обґрунтованого погодження або відмови в реалізації проєктів.

Інституційна роль моніторингових даних проявляється у створенні відкритих інформаційних систем для громадськості, які дозволяють мешканцям міст отримувати доступ до інформації про стан їхнього середовища проживання, що сприяє розвитку принципів прозорості, підзвітності та участі громадян у процесах міського управління, формують довіру до рішень органів влади та знижують соціальну напругу в ситуаціях інтенсивної забудови. Моніторингові дані стають основою для розробки антикризових планів, зонування території за ступенем ризику, програм підвищення стійкості міських систем та визначення пріоритетів інвестиції у модернізацію проєкту.

Принципи оперативного ухвалення рішень на основі цифрових даних у сучасних містах будується на адаптивних моделях управління, вони дозволяють фіксувати відхилення від нормативного стану середовища та прогнозувати розвиток ситуації, здійснювати корекційні дії до моменту поки проблема набуде критичного характеру. Один із фундаментальних принципів є використання адаптивного управління ризиками, він базується на безперервному моніторингу змінних параметрів середовища, наприклад фізичних, соціальних, екологічних та моделювання можливих сценаріїв їх розвитку. У контексті щільної забудови означає, що дані про деформації конструкцій, навантаження на дорожню мережу, осідання ґрунтів та зміну транспортних потоків аналізується постфактумом та в режимі реального часу з автоматичним формуванням сигналів тривоги та пропозицій стосовно коригування управлінських рішень [20].

Адаптивні моделі передбачають оновлення планів дій залежно від внутрішніх та зовнішніх умов. Якщо моніторинг фіксує перевищення граничного рівня деформації в окремому районі забудови, адаптивна модель передбачає автоматичне оновлення пріоритетності технічних обстежень, перенаправить ресурси на укріплення будівель або навіть тимчасово обмежить експлуатації окремих суб'єктів до усунення ризиків. Підхід відрізняється від традиційних статичних моделей

плануванням, він дозволяє системі управління бути живою, стійкою до несподіваних викликів та саморегульованою [21].

Інституційна роль моніторингових даних та адаптивні принципи оперативного ухвалення рішень формують архітектуру міського управління, кожна управлінська дія спирається на актуальні цифрові дані та система в цілому набуває властивості стійкості, гнучкості та само навчання. У цій парадигмі дані стають джерелом інформації та активним ресурсом розвитку, забезпечують високий рівень прогнозованості, безпеки та керованості середовища.

Впровадження цифрових моніторингових платформ системи управління міського забудову стикаються з численними бар'єрами, вони істотно уповільнюють та ускладнюють процеси інтеграції та ефективного використання. Однією групою перешкод стають правові бар'єри, вони виникають через відставання нормативно-правової бази від темпів розвитку цифрових технологій. У багатьох містах відсутні визначені регламенти стосовно обробки, зберігання, збору та використання моніторингових даних, особливо якщо мова йде про дані з високою чутливістю, наприклад стосовно структурної безпеки об'єктів або пересування громадян. Відсутність законодавчого регулювання створює правову невизначеність, стримує ініціативу муніципалітетів та девелоперських компаній стосовно широкомасштабного впровадження моніторингових систем. Додатковими спектром правових бар'єрів стає питання захисту персональних даних та права на приватність в умовах всеохоплюючого цифрового моніторингу викликають конфлікти між необхідністю забезпечення громадської безпеки та дотримання індивідуальних прав людини.

Організаційні бар'єри серйозна проблема для впровадження цифрових платформ. Вони пов'язані з існуючою структурою міських адміністрацій, часто спостерігається фрагментація функцій та відсутність єдиної координаційної платформи для об'єднання даних різних департаментів, транспорту, будівництва, екології, комунального господарства. У ситуації кожен підрозділ може мати власні система збору даних, вони не інтегрується між собою, що унеможливило створення єдиної картини стану міського середовища. Організаційний супротив змінам проявляється на рівні персоналу, працівники, котрі не знайомі сучасними цифровими технологіями або не зацікавлені в зміні традиційних методів роботи, роблять пасивний або активний опір впровадження нових систем. Організаційною перешкодою стає відсутність прописаних процедур прийняття рішень стосовно моніторингових даних, які призводять до ситуації, коли дані збираються, але не використовуються ефективно у практиці.

Технічні бар'єри полягають у недосконалості інфраструктури, недостатні пропускну здатності комунікаційних мереж, відсутності сумісності між різними платформами, обмеженими можливостями зберігання та обробки великих обсягів даних. Особливо серйозними проблемами із стандартизацію форматів даних, інтеграція різних джерел інформації в єдину платформу вимагає значних ресурсів на етапі адаптації та налаштування. Технічним викликом буде залишатись забезпечення кібербезпеки цифрових моніторингових систем, будь-яке втручання або маніпуляція даними призводить до серйозних управлінських помилок та створення загрози для безпеки міського середовища. Брак кваліфікованих кадрів у сфері налаштування, аналітичного використання моніторингових платформ та обслуговування підсилює технічні ризики [22].

Для оптимізації процесу використання цифрового моніторингу у прийнятті рішень потрібно здійснювати системну роботу у ключових напрямках. Спочатку потрібно розпочати з удосконалення правового регулювання, розробити та впровадити нормативно-правові акти, які визначають правила обробки, збору, обміну, захисту моніторингових даних та юридичні рамки для їх використання в управлінських рішеннях, що має розмежування між технічними даними про стан об'єктів і персональними даними громадян із відповідним рівнем захисту кожної категорії [23].

Другим напрямком є організаційна реформа створення спеціалізованих підрозділів або департаментів цифрового моніторингу у структурах міського управління, які наділені повноваженнями для збору, аналітики та обробки даних із різних джерел. Необхідно забезпечувати міждепартаментальну інтеграції інформаційних потоків та стандартизувати процедури використання даних у плануванні, контролі та кризовому управлінні. Велике значення має розвиток кадрового потенціалу, впровадження систем навчання та підвищення кваліфікації працівників муніципалітетів у сфері цифрових технологій, аналітики даних та управління ризиками на основі моніторингової інформації.

З технічної точки зору оптимізація ґрунтується на впровадженні єдиних стандартів даних для всіх учасників моніторингової системи, застосування хмарних технологій для забезпечення масштабованість і та надійності зберігання інформації, розвитку безпечних комунікаційних інфраструктур для того, щоб передавати дані у реальному часі. Важливо інтегрувати моніторингові платформи з аналітичними інструментами на основі штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволяє фіксувати фактичний стан об'єктів та прогнозувати розвиток, формувати сценарій дій на різних горизонтах планування.

Перспективним є напрям впровадження адаптивних платформ управління, котрі змінюють режими моніторингу залежно від рівня ризику в певні територіальні зоні та створюють інтегровані системи візуалізації даних для широкого кола користувачів від міських менеджерів до громадськості. Рішення стають більш прозорими, відкритими та обґрунтованими для громадського контролю, сприяють зростанню довіри до управлінських процесів та підвищенню стійкості міських систем до зовнішніх та внутрішніх викликів.

Подолання бар'єрів та оптимізація процесів використання цифрового моніторингу в управлінні забудову потребують комплексних змін на організаційному, правовому та технічному рівнях. За умови синхронного розвитку всіх цих компонентів можливо реалізовувати повний потенціал цифрового моніторингу як інструменту створення стійкого, прогнозованого та безпечного міського середовища.

Створення Smart-груп моніторингу аналізу в органах міського планування виступає найперспективнішим напрямом модернізації процесів управління розвитком організованого середовища в умовах зростаючої складності та динаміки міських систем. Сучасні виклики, пов'язані зі щільною забудовою, транспортними перевантаженнями, екологічними ризиками та змінами клімату, вони вимагають нового підходу до обробки, збору та аналізу інформації, яка стає основою для обґрунтованих управлінських рішень. Створення Smart-груп моніторингового аналізу виступає головним елементом побудови цифрового міста, рішення базується на даних у реальному часі, аналітиці великих обсягів інформації та прогнозованому моделюванні.

Smart-групи представляють спеціалізовані міждисциплінарні команди до складу яких входять, інженери-будівельники, фахівці з моніторингових систем, геоінформаційні спеціалісти, аналітики даних, урбаністики, архітектори, спеціалісти з кібербезпеки та інформаційних технологій. Основне завдання даних груп полягає у постійному зборі, інтеграції, аналізі, валідації та інтерпретації даних про фізичний стан міської забудови, транспортні процеси, навантаження на інфраструктуру, соціальні зміни та екологічний стан середовища. Традиційні відділи міського планування, котрі часто працюють із застарілими статистичними даними відрізняються від концепції роботи Smart-груп, котрі працюють з інформацією в режимі реального часу, здійснюють оперативний моніторинг та забезпечують швидку реакцію на зміни середовища.

Однією з ключових функцій Smart-груп виступає створення єдиної цифрової платформи моніторингової інформації, дані з сенсорних мереж, супутникового моніторингу, цифрових близнюків, транспортних систем, систем енергоменеджменту, IoT-пристроїв Консолідується в єдину базу для комплексного аналізу. На основі платформи формують багатовимірні карти ризиків, теплові карти, щільності забудови, моделі навантаження на інженерно та транспортну інфраструктуру, інтерактивні панелі стану об'єктів міського середовища. Дані інструменти допомагають управлінцям виявляти критичні зони, прогнозувати можливі проблеми, планувати дії стосовно запобігання або мінімізації [23].

Smart-групи застосовують технології машинного навчання та штучного інтелекту для того, щоб створювати прогнозовані моделі розвитку міських процесів. На основі історичних даних про поведінку будівель у різних умовах експлуатації прогнозують ризик виникнення тріщин або осідань у нових забудовах, на основі аналізу транспортних потоків оцінюють ймовірність перевантаження певних вулиць після введення в експлуатацію нового житлового комплексу. Дані прогнози стають базою для формування сценаріїв міського розвитку, вони враховують сьогоденні потреби та середньо- та довгострокові ризики.

Важливим завданням Smart-груп оперативна підтримка ухвалення рішень під час кризових ситуацій у разі виявлення критичних деформації будівель, проривів інженерних мереж, транспортних колапсів або природних катастроф. Завдяки швидкому доступу до актуальної інформації групи можуть рекомендувати оптимальні управлінські заходи за лічені години, що знижує ризики для безпеки мешканців та мінімізує економічні втрати.

Функціонування Smart-груп передбачає взаємодію з іншими муніципальними структурами, наприклад департаментами транспорту, житлово-комунального господарства, надзвичайних ситуацій, екології, планування території. Через інтеграційні платформи обміну даними інформація про поточний стан середовища передається між відомствами, забезпечує синхронізоване та комплексне реагування на виклики. Результати роботи Smart-груп стають основою для розробки міських стратегій розвитку, планів реконструкції інфраструктури, програм підвищення стійкості міських систем до змін клімату та соціально-економічних трансформації.

Важливою є роль Smart-груп у розвитку відкритих даних та громадської участі. Результати публікуються у відкритому доступі у вигляді графіків, звітів, карт, які контролюють процеси розвитку міста країни, беруть участь у громадських слуханнях, впливають на прийняття рішень. Створення Smart-груп сприяє підвищенню ефективності управління та розвитку демократичних процесів міста, зміцненню довіри між громадянами та владою.

Створення Smart-груп потребує відповідної організаційної підготовки, розробки чітких регламентів роботи, визначення алгоритмів взаємодії між структурами, впровадження систем підвищення кваліфікації кадрів, забезпечення високого рівня інформаційної безпеки та побудови технічної інфраструктури. Успіх функціонування даних груп залежить від здатності муніципалітетів розвивати культуру управління на основі даних, рішення приймаються на основі об'єктивного аналізу цифрової інформації.

Smart-групи виступають центрами сучасного міського інтелекту, ефективно інтегрувати цифрові технології в процеси планування, розвитку та управління міським середовищем, підвищує стійкість, комфорт та безпечність для мешканців. У майбутньому дані групи визначають здатність міст адаптуватись до нових викликів, забезпечують баланс між розвитком, інноваціями та збереженням якості урбаністичного простору.

На нижче наведено в таблиці 2 демонструється матриця інтеграції цифрових моніторингових даних, вона відображає взаємозв'язок між джерелами інформації, процесами оперативного управління, очікуваними управлінськими ефектами та формами використання даних у прийнятті рішень, що дозволяє комплексно оцінювати роль моніторингової інформації у підвищення стійкості та безпеки міського середовища.

*Таблиця 2*

**Матриця інтеграції цифрових моніторингових даних у процеси оперативного управління щільною забудовою**

<b>Джерела цифрових моніторингових даних</b>	<b>Тип даних</b>	<b>Ключові процеси оперативного управління</b>	<b>Форма інтеграції у процеси прийняття рішень</b>	<b>Очікуваний управлінський ефект</b>
<i>Сенсорні мережі деформації</i>	Динаміка переміщень будівельних конструкцій	Оцінка структурної стійкості об'єктів, планування ремонтних заходів	Автоматичне формування сигналів тривоги при перевищенні критичних порогів	Запобігання аваріям, підвищення безпеки міського середовища
<i>Лазерне сканування будови</i>	3D-моделі будови, зміни в геометрії об'єктів	Контроль легальності будівельних робіт, аналіз відповідності проектам	Порівнянн сканованих моделей із проектною документацією	Зниження ризику нелегальної будови, забезпечення планової дисципліни
<i>Системи IoT моніторингу інфраструктури</i>	Навантаження на інженерні мережі (енергомережі, водо-постачання)	Моніторинг ресурсного навантаження територій, балансування мереж	Інтеграція даних у платформи диспетчеризації і планування навантажень	Оптимізація використання ресурсів, запобігання перевантаженням

Продовження табл. 2

Джерела цифрових моніторингових даних	Тип даних	Ключові процеси оперативного управління	Форма інтеграції у процеси прийняття рішень	Очікуваний управлінський ефект
<i>Супутниковий моніторинг (InSAR)</i>	Осідання та підйом територій	Прогнозування геотехнічних ризиків, оцінка впливу забудови на підґрунтя	Інтеграція з системами ризик-менеджменту міського середовища	Підвищення геостійкості територій, оптимізація зведення нових об'єктів
<i>Геоінформаційні системи (GIS)</i>	Просторово-часові дані про забудову, транспорт, екологію	Планування зон розвитку, транспортної логістики, озеленення	Інтерактивна візуалізація сценаріїв забудови і розвитку територій	Підвищення якості міського планування, мінімізація екологічних ризиків
<i>Цифрові близнюки забудованих районів</i>	Віртуальне моделювання реального стану об'єктів	Багатосценарне прогнозування експлуатаційних і ризикових змін	Використання моделей для тестування управлінських сценаріїв	Зниження витрат на експериментальні заходи, підвищення точності рішень
<i>Дані систем громадської мобільності</i>	Параметри трафіку, переміщення населення	Оцінка навантаження на транспортну інфраструктуру, регулювання потоків	Автоматичне оновлення транспортних моделей та схем планування руху	Зниження затворів, підвищення доступності міських територій
<i>Екологічний моніторинг</i>	Якість повітря, шумове забруднення	Визначення зон екологічного навантаження, планування компенсаційних заходів	Інтеграція в екологічні модулі містобудівних систем	Підвищення якості життя, баланс щільності забудови і екології

Джерело: розроблено автором на основі [23]

На рис. 2 зображено функціональну модель цифрової підтримки управлінських рішень у системі щільної забудови, вона ілюструє логіку взаємодії між джерелами моніторингових даних, аналітичних платформ, алгоритмів прогнозування та процесів оперативного ухвалення рішень. Модель показує, як на основі мультисенсорної інформації, супутникового моніторингу, IoT-систем та цифрових близнюків формують аналітичні висновки, котрі інтегрується у міські стратегії розвитку, сценарний планування та кризове реагування для забезпечення стійкості та безпеки організованого середовища.

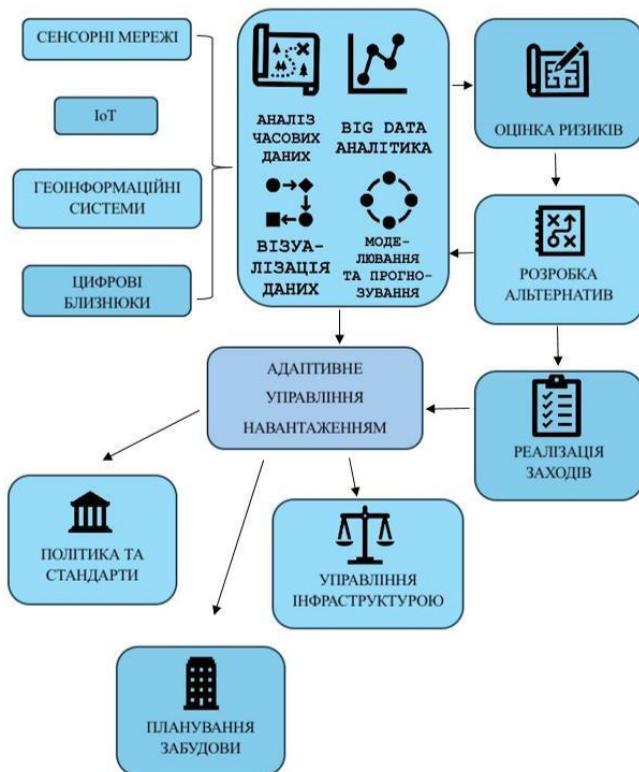


Рис. 2. Функціональна модель цифрової підтримки управлінських рішень у системі контролю щільної забудови (розроблено автором на основі [17])

**Висновок.** У результаті дослідження встановлено, що цифрові інструменти та техніко-методичні платформи моніторингу є ключовим елементом формування сучасної системи управління щільною забудовою. Їх інтеграція забезпечує багаторівневий контроль технічного стану територій, підвищує точність виявлення ризиків та створює передумови для переходу до прогностично орієнтованої моделі управління.

Послання сенсорних мереж, GIS-технологій, цифрових близнюків та Big Data-аналітики дозволяє забезпечити системну синхронізацію фізичних вимірювань із аналітичними моделями розвитку міського середовища. Інституційне впровадження таких платформ сприяє підвищенню прозорості управлінських процесів та формуванню доказової бази для прийняття стратегічних рішень.

Подолання організаційних, правових та технічних бар'єрів є необхідною умовою ефективного функціонування цифрових платформ. Розвиток стандартизованих протоколів обміну даними та міждисциплінарної взаємодії забезпечить стійкість та масштабованість систем моніторингу. Таким чином,

цифрові платформи моніторингу виступають стратегічним інструментом забезпечення безпечного, збалансованого та стійкого розвитку щільно забудованих урбанізованих територій.

#### **Список літератури:**

1. Екологічний моніторинг як засіб визначення екологічного стану навколишнього середовища. URL: <https://www.prostir.ua/?news=ekolohichnyj-monitorynh-yak-zasib-vyznachennya-ekolohichnoho-stanu-navkolyshnoho-seredovyscha> (дата звернення: 20.12.2025)
2. Карпенко О.В., Денисюк Ж.З., Наместнік В.В. Цифрове врядуванн: монографія. Київ: ІДЕЯ ПРИНТ, 2020. 336 с.
3. Дуднік А.С. Приклади застосування безпроводних сенсорних мереж у якості засобів вимірювання механічних величин. *Молодий вчений*. 2018. № 4(56). С. 182-184
4. Вербівська Л. Механізми управління стратегічним розвитком підприємств в умовах євроінтеграційних трансформацій. *Економіка та суспільство*, 2025, 72. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-72-128>
5. Цифрові двійники: повний огляд технології 2026/ URL: <https://blog.colobridge.net/uk/2025/12/digital-twin-technology-ua/> (дата звернення: 20.12.2025)
6. Що таке Big Data: визначення, приклади та можливість. URL: <https://hub.kyivstar.ua/articles/shho-take-big-data> (дата звернення: 20.12.2025)
7. Яворський А.А. Управління фінансовим станом підприємства в кризових умовах. *Економіка та суспільство*. 2016. № 6. С. 242-248.
8. Кропотов П.П. Оцінка методів моніторингу безпеки (ризик). *Математичні машини і системи*, 2018, № 4. С. 69-77.
9. Гринчак Н.А., Горобець О.О. Вплив цифровізації на процес прийняття управлінських рішень у міжнародному бізнесі. *Статистика України*. 2024. № 2. С. 108–115. Doi: 10.31767/su.2(105)2024.02.10
10. Довгий С.О., Копійка О.В. ІТ-інфраструктура як базова складова цифрової трансформації: монографія. К.: ТОВ «Видаництво «Юстон», 2023. 458 с.
11. Петраковська О., Михальова М. Структуризація територіальних зон з погляду встановлення обмежень у використанні земель. *Технічні науки та технології*, 2024, 1 (35), 319–328. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1\(35\)-319-328](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-1(35)-319-328)
12. Петраковська О.С., Михальова М.Ю. Понятійний апарат в частині реєстрації об'єктів державного земельного кадастру. *Просторовий розвиток*. 2024. №7. С. 425–432. <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.7.425-432>
13. Хоменко О., Петренко Г., Рижаква Г., Петруха Н., Чуприна Ю., Малихіна О., Кушнір О. Сучасні інструменти та програмні продукти адміністрування будівельними організаціями в умовах трансформації операційних систем менеджменту. *Управління розвитком складних систем*, 2022, 52, 113–125. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2022.52.113-125>
14. Рижаква Г.М., Чуприна Ю.А., Гавриков Д.О., Бородавка М.В. Формування будівельного кластеру у форматі державних інвестиційних цільових програм. *Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин*. 2019. Вип. 40. С. 19-24.

15. Mercader-Moyano P., Camporeale P., Serrano-Jiménez A. Integrated urban regeneration for high-rise multi-family buildings by providing a multidimensional assessment model and decision support system. *Journal of Building Engineering*, 2023, Vol. 76: 107359. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107359>.

16. Najafi P., Mohammadi M., Wesemael P., Le Blanc P.M. A user-centred virtual city information model for inclusive community design: State-of-art. *Cities*, 2023, Vol. 134: 104203. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104203>.

17. Nesticò A., Elia C., Naddeo V. Sustainability of urban regeneration projects: Novel selection model based on analytic network process and zero-one goal programming. *Land Use Policy*, 2020, Vol. 99: 104831. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104831>.

18. Гончаренко Т.А. Методологічні основи формування єдиного інформаційного середовища для автоматизації об'єктно-просторових систем в проектах будівництва: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. Київ: КНУБА, 2024. 418 с.

19. Toukola S., Ahola T. Digital tools for stakeholder participation in urban development projects. *Project Leadership and Society*, 2022, Vol. 3: 100053. <https://doi.org/10.1016/j.plas.2022.100053>.

20. Хитров В.Б. Етапи розробки та реалізації стратегії цифрової трансформації підприємства. *Проблеми системного підходу в економіці*, 2025, № 3(100). С. 38-44. DOI: <https://doi.org/10.32782/2520-2200/2025-3-5>

21. Шинькович А. В., Васильєва Н. Б., Романенко О. В. Інноваційне управління підприємствами в умовах цифрової трансформації: виклики та стратегії. *Здобутки економіки: перспективи та інновації*. 2024. № 13. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14648256>

22. Moufid O., Praharaj S., Oulidi H.J. Digital technologies in urban regeneration: A systematic review of literature. *Journal of Urban Management*, 2025, Vol. 14, Issue 1, Pp. 264-278. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2024.11.002>.

23. Weil C., Bibri S.E., Longchamp R., Golay F., Alahi A. Urban Digital Twin Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities. *Sustainable Cities and Society*, 2023, Vol. 99: 104862. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>.

### ***Kyrylo KRYVDA***

#### ***Digital tools and technical-methodological monitoring platforms as a means of supporting managerial decision-making in the system of dense urban development control***

*The study provides a systematic substantiation of the role of digital tools and technical-methodological monitoring platforms as an institutionally integrated means of supporting managerial decision-making within the system of dense urban development control. It is demonstrated that under conditions of intensive urbanization, increasing spatial concentration of construction facilities, and growing pressure on engineering and transport infrastructure, traditional observation and regulatory control methods fail to ensure an adequate level of responsiveness, accuracy, and predictive capacity.*

*It is substantiated that digital monitoring platforms create an integrated information and analytical environment that combines sensor networks, IoT technologies, geographic information systems (GIS), satellite monitoring such as InSAR, laser scanning, digital twin technologies, and big data analytics. Their comprehensive application enables multi-level control over the technical condition of built-up areas, detection of deformations,*

*analysis of spatial overloads, and assessment of geotechnical and environmental risks in real time.*

*The functional and structural architecture of Smart Monitoring Systems and Urban Density Control Platforms is analyzed as a technological foundation for evidence-based planning. The criteria for platform effectiveness are defined, including data accuracy, scalability, interoperability, reliability, information security, and adaptive forecasting capability.*

*It is proven that the implementation of digital monitoring tools facilitates the transition from a reactive model of dense urban development management to an adaptive and predictive regulatory system. A conclusion is formulated that digital platforms serve not merely as technical observation instruments but as a strategic component of the institutional mechanism for ensuring safety, resilience, and balanced development of urbanized territories.*

*Additionally, it is established that the effectiveness of digital platforms depends not only on their technological characteristics but also on the level of their integration into municipal governance systems, regulatory frameworks, and organizational decision-making procedures. An important factor is the development of unified data interoperability standards that ensure synchronization of information flows among public authorities, developers, operating organizations, and the community. The necessity of applying machine learning algorithms and predictive analytics to identify latent trends in spatial development and enable early detection of critical risk zones is substantiated. It is emphasized that the digitalization of dense urban development monitoring creates the prerequisites for establishing a transparent control system, increasing trust in managerial decisions, and ensuring the long-term resilience of urbanized territories under conditions of structural uncertainty and dynamic transformations of urban space.*

**Keywords: digital monitoring, dense urban development, geographic information systems, IoT technologies, digital twins, big data analytics, Smart Monitoring Systems, managerial decision support.**

Дата надходження статті: 25.12.2025

Дата прийняття статті: 26.01.2026