DOI: https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.358378

УДК 624.13:711.4:72.025(477)

ПРИНЦИПИ ВСТАНОВЛЕННЯ ГЛИБИННИХ ОХОРОННИХ ЗОН ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ІСТОРИКО-КУЛЬТУРНОЇ СПАДЩИНИ В УМОВАХ ІНТЕНСИВНОГО ОСВОЄННЯ ПІДЗЕМНОГО ПРОСТОРУ СУЧАСНИХ МІСТ

PRINCIPLES OF ESTABLISHING DEPTH PROTECTION ZONES FOR HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE SITES UNDER INTENSIVE UNDERGROUND SPACE DEVELOPMENT IN MODERN CITIES

Т. В. Кріль
Tetiana V. Kril

E-mail:
kotkotmag@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-4324-9231

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601

У статті розглянуто проблему обґрунтування глибинних охоронних меж для територій історико-культурної спадщини в умовах інтенсивного освоєння підземного простору сучасних міст. Показано, що традиційні двовимірні підходи до встановлення охоронних зон є недостатніми для забезпечення збереження історичних об'єктів з огляду впливу підземного будівництва на напружено-деформований стан ґрунтового масиву. Мета дослідження — розробка науково обґрунтованих принципів формування глибинних охоронних зон на підставі просторово-функціонального аналізу геологічного середовища та математичного моделювання змін напружено-деформованого стану ґрунтового масиву. Дослідження виконано на прикладі буферної зони Національного заповідника «Софія Київська». Методична основа роботи включає застосування геоінформаційних технологій для побудови просторових моделей, а також чисельне моделювання напружено-деформованого стану ґрунтового масиву із використанням методу скінченних елементів. Виконано типізацію техногенних навантажень та оцінено вплив типових статичних і динамічних навантажень, визначено глибини їх впливу. У результаті досліджень встановлено глибину поширення змін напружено-деформованого стану ґрунтів — яка становить 25–30 м без урахування впливу метрополітену та до 90–130 м з його урахуванням. На цій підставі побудовано 3D-модель нижньої межі геологічного середовища та запропоновано підхід до стратифікованого використання підземного простору. Сформульовано систему принципів встановлення глибинних охоронних меж, що включає тривимірне зонування, урахування інженерно-геологічних умов, суперпозицію техногенних впливів, встановлення захисних відстаней, адаптивності і превентивного моніторингу та інтеграцію з нормативною базою. Запропонований підхід забезпечує перехід до тривимірного регулювання використання територій історичних ареалів міст і сприяє підвищенню рівня їх інженерно-геологічної безпеки.

The article addresses the problem of substantiating depth protection boundaries for territories of historical and cultural heritage under conditions of intensive underground space development in modern cities. It is shown that traditional two-dimensional

Ключові слова: інженерно-геологічні умови, охоронні глибинні зони, підземні споруди, напружено-деформований стан, глибинно-функціональна типізація, історико-культурна спадщина, Національний заповідник «Софія Київська».

Keywords: engineering-geological conditions, depth protection zones, underground structures, stress-strain state, depth-functional typification, historical and cultural heritage, National Reserve "Sophia of Kyiv".

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2025. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

© Publisher Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2025. This is an Open Access article under the CC BY-NC-ND license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

Цитування: Кріль Т. В. Принципи встановлення глибинних охоронних зон для об'єктів історико-культурної спадщини в умовах інтенсивного освоєння підземного простору сучасних міст. Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України. 2025. Том 18. Вип. 2. С. 116–128. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.358378.

Citation: Kril T. V., 2025. Principles of establishing depth protection zones for historical and cultural heritage sites under intensive underground space development in modern cities. Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences NAS of Ukraine. Vol. 18. Iss. 2. Pp. 116–128. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2025.358378.

approaches to establishing protection zones are insufficient to ensure the preservation of historical objects, given the impact of underground construction on the stress-strain state of the soil mass. The aim of the study is to develop scientifically grounded principles for the formation of depth protection zones based on the spatial-functional analysis of the geological environment and mathematical modelling of changes in the stress-strain state of the soil mass. The research was carried out on the example of the buffer zone of the National Reserve "St. Sophia of Kyiv". The methodological basis of the work includes the application of geoinformation technologies for constructing spatial models, as well as numerical modelling of the stress-strain state of the soil mass using the finite element method. Typification of anthropogenic loads was performed and the impact of typical static and dynamic loads was assessed, with the determination of their influence depths. As a result of the research, the depth of propagation of changes in the stress-strain state of soils was established, which amounts to 25–30 m without taking into account the influence of the metro and up to 90–130 m when it is considered. On this basis, a 3D model of the lower boundary of the geological environment was constructed and an approach to the stratified use of underground space was proposed. A system of principles for establishing depth protection boundaries was formulated, including three-dimensional zoning, consideration of engineering-geological conditions, superposition of anthropogenic impacts, establishment of protective distances, adaptability and preventive monitoring, and integration with the regulatory framework. The proposed approach ensures the transition to three-dimensional regulation of the use of territories of historical urban areas and contributes to increasing the level of their engineering-geological safety.

ВСТУП

Охорона об'єктів культурної спадщини традиційно ґрунтується на встановленні охоронних і буферних зон, які регулюють використання територій навколо пам'яток. Проте в умовах інтенсивного розвитку підземної інфраструктури сучасних міст дедалі більшого значення набуває врахування вертикального виміру використання території. Традиційні двовимірні системи планування є недостатніми для ефективного регулювання підземного будівництва, оскільки вони не відображають просторову структуру підземних об'єктів та пов'язані з ними права, обмеження і відповідальність (Lemmen et al., 2015; Guler, 2024).

У нормативних документах, наукових дослідженнях більшість існуючих режимів охорони визначають обмеження переважно у плані, тоді як підземний простір часто залишається поза межами чіткої регламентації. Це може створювати загрози для археологічних шарів та конструктивної стабільності споруд історико-архітектурного значення (Saeidian et al., 2021; Кріль, Селівачева, 2024; Kitsakis et al., 2022).

Геотехнічні дослідження засвідчують, що зведення глибоких котлованів та підземних споруд поблизу історичних будівель може спричиняти перерозподіл напружень у ґрунтовому масиві, деформації ґрунтових основ та зміни гідрогеологічного режиму, що потребує спеціальних інженерних обмежень і моніторингу. Це підкреслює необхідність встановлення глибинних обмежень для підземних робіт у межах територій історичних ареалів з метою забезпечення збереження пам'яток та стабільності геологічного середовища (Caudron et al., 2008; Кріль, 2019; Zhang, 2023).

Міжнародний досвід демонструє поступовий перехід від традиційних двовимірних охоронних зон до тривимірних моделей просторового регулювання, у межах яких враховуються як горизонтальні, так і вертикальні межі антропогенного втручання. Разом з тим методичні підходи щодо визначення глибинних меж охоронних зон, зокрема з урахуванням стану геологічного середовища та глибини антропогенного втручання, історії підземного освоєння території залишаються недостатньо розробленими і потребують подальших досліджень.

Тому головною метою цих досліджень було наукове обґрунтування принципів формування глибинних охоронних зон для об'єктів історико-культурної спадщини на підставі просторово-функціонального аналізу геологічного середовища та математичного моделювання змін напружено-деформованого стану (НДС) ґрунтового масиву. Дослідження виконано на прикладі території буферної зони Національного заповідника «Софія Київська». Для досягнення мети було виконано такі завдання: збір та аналіз даних щодо геологічної будови, інженерно-геологічних умов і техногенного навантаження території дослідження; типізація статичних і динамічних навантажень для уніфікації розрахункових моделей НДС ґрунтових масивів у програмному середовищі PLAXIS й встановлення геометричних параметрів їх поширення; визначення просторової структури та особливостей геологічного середовища буферної зони Національного заповідника «Софії Київської»; визначення нижньої межі геологічного середовища на 2D схемі у глибинах та 3D візуалізація; опрацювання мінімальних захисних (режимні) відстаней від нижньої межі геологічного середовища до потенційних підземних споруд (тунелі, підземні сховища, паркінги); узагальнення результатів для оцінки стійкості геологічного середовища,

формулювання науково обґрунтованих принципів глибинних охоронних меж для територій історичних ареалів міст.

АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Термін «геологічне середовище» не має єдиного усталеного визначення і по-різному трактується різними авторами. У науковий обіг він увійшов наприкінці 1970-х років, що відображено у працях А. В. Сидоренка, Є. М. Сергєєва та Г. А. Голодковської. В. Д. Ломтадзе (1977) розглядав геологічне середовище як будь-яку територію Землі з її рельєфом, геологічними процесами та явищами, сформованими внаслідок історичного розвитку планети. На відміну від цього, Є. М. Сергєєв (1979) визначав його як верхню частину літосфери — багатокомпонентну динамічну систему, що перебуває під впливом інженерно-господарської діяльності людини та водночас визначає умови її здійснення. Цього підходу дотримувався і М. Г. Демчишин (2004).

Г. П. Бондарік (1981) розумів під геологічним середовищем мінеральну речовину в твердому, рідкому та газоподібному станах разом із фізичними полями, а Г. О. Білявський, М. М. Падун, Р. С. Фурдуй (1993) давали більш екологічне тлумачення — сукупність усіх умов, що впливають на організми, популяції чи біоценози, забезпечуючи їх існування, обмін речовин та енергії. В. Т. Трофімов та Д. Г. Зілінг (2000) відмовилися від терміна «геологічне середовище», замінивши його на терміни «приповерхнева частина літосфери», «верхні горизонти літосфери» і виключивши зі складу компонентів поверхневі води та іноді ґрунтовий покрив.

У нормативних документах це поняття також еволюціонувало: СНіП 2.01.15–90 (скасований 2011 р.) визначав геологічне середовище як багатокомпонентну, дискретну, динамічну природну систему, яка різноманітно та енергійно взаємодіє зі спорудами. ДБН В.1.1–24:2009 ввели термін «інженерно-геологічне середовище» — поверхнева частина земної кори, яка змінюється під впливом внутрішніх і зовнішніх чинників природного і антропогенного походження.

Отже, сучасне розуміння терміну геологічне середовище акцентує увагу саме на антропогенному впливі, що безпосередньо зумовлює потребу обмеження глибини підземного втручання. Згідно з геотехнічними дослідженнями, прокладання тунелів і розробка глибоких котлованів у щільній міській забудові можуть спричинити деформації ґрунтового масиву та осідання поверхні, що створює ризики для історичних будівель (Kontogianni & Stiros, 2020).

На підставі чисельного моделювання та польового моніторингу встановлено, що розробка котлованів може призводити до деформації огороджувальних конструкцій і осідання прилеглих історичних споруд, що потребує обмеження глибини робіт або застосування спеціальних технологій зміцнення ґрунтів (Zhang, 2023). Експериментальні та чисельні моделі також показують, що характер деформацій залежить від відстані будівлі до тунелю, глибини прокладання, жорсткості ґрунтів, жорсткості конструкції будівлі (Caudron et al., 2008). Методи 3D чисельного моделювання, зокрема методи граничних або скінченних елементів, дають змогу прогнозувати деформації ґрунтового масиву та визначати безпечні параметри підземних робіт (Beer et al., 2021).

В українській нормативній базі питання підземного будівництва поблизу історичних об’єктів регулюється низкою будівельних норм. Зокрема, ДБН Б.2.2–12:2019 встановлює охоронні зони пам’яток, регламентує взаємне розташування підземних мереж і мінімальні відстані між спорудами. ДБН В.2.1–10:2018 передбачає необхідність урахування інженерно-геологічних умов, проведення моніторингу стану ґрунтів і фундаментів та оцінювання впливу будівництва на існуючі споруди, зокрема пам’ятки архітектури. ДБН В.1.1–24:2009 та ДБН В.1.1–25:2009 обмежують глибину земляних робіт у зонах небезпечних геологічних процесів і підтоплення. ДБН А.2.2–14–2016 зобов’язує проводити інженерно-геологічні дослідження та оцінювати вплив нового будівництва на фундаменти пам’яток. У сукупності ці положення формують нормативну основу для встановлення обмежень щодо глибини підземного втручання у геологічне середовище на територіях історичної забудови.

У нормативній базі Європи питання впливу підземних споруд на існуючу забудову розглядається переважно в рамках геотехнічного проєктування. Хоча Eurocode 7 (EN 1997) не встановлює прямих глибинних охоронних зон для пам’яток, він передбачає обов’язкове оцінювання впливу земляних робіт і підземного будівництва на існуючі споруди, зокрема через прогнозування деформацій ґрунту, осідань та зміни напруженого стану масиву (Bogusz, 2024).

У міжнародній практиці охорони культурної спадщини традиційні горизонтальні буферні зони ЮНЕСКО, передбачені Операційними вказівками, поступово доповнюються концепцією вертикальних (глибинних) обмежень. Цей підхід враховує тривимірний характер археологічних шарів, підземних конструкцій пам'яток та їх взаємодію із сучасними інженерними спорудами, що забезпечує комплексний захист об'єктів у трьох вимірах. Найбільш чітко такий підхід закріплений в офіційних документах серійного об'єкта Всесвітньої спадщини «Кордони Римської імперії». Зокрема, у номінаційному досьє «Frontiers of the Roman Empire — Dacia» пострімські нашарування та сучасні реконструкції прямо називаються «vertical buffer zones» (UNESCO..., 2025). Таким чином, вертикальні обмеження стають визнаним інструментом збереження археологічних горизонтів під час реалізації інфраструктурних проєктів.

Показовим прикладом застосування вертикальних обмежень є розвиток підземної транспортної інфраструктури в історичних містах — Афінах і Салоніках. Для збереження археологічних горизонтів у верхніх шарах ґрунту тунелі Афінського метрополітену прокладено на глибині 15 м і більше. Це дало змогу сформувати двошарову просторову структуру, де верхній шар є зоною археологічної охорони, а нижній — зоною інженерного освоєння (Elliniko..., 2025; Kontogianni & Stiros, 2020). Аналогічний підхід було застосовано в проєкті Салонікського метрополітену (Elliniko..., 2025a). Станції з високим археологічним ризиком (Plateia Demokratias, Venizelos, Agia Sofia) отримали спеціальний режим супроводу. Таким чином, грецькі метрополітени стали моделлю стратифікованого використання підземного простору, що об'єднує збереження культурної спадщини із сучасними інфраструктурними потребами.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Просторові межі геологічного середовища буферної зони заповідника «Софія Київська» визначено в результаті побудови карти глибин, на які поширюються зміни НДС ґрунтів, та створення 3D-моделі для наочного зображення просторової структури геологічного середовища. Для цього використано геоінформаційні технології, зокрема методи інтерполяції, реалізовані в програмному комплексі ArcGIS Desktop Basic. Застосовано метод зворотного віддаленого зважування (Inverse Distance Weighting, IDW) для оцінювання розподілу глибин впливу техногенних навантажень, а також метод кригінгу для врахування просторової автокореляції даних, що забезпечило вищу точність (Xiao et al., 2016; Darmawan et al., 2023). Вхідними даними слугували величини глибин впливу техногенних навантажень (будівлі, автошляхи, метро, моніторингові гідрогеологічні свердловини та розвідувальні, дренажно-штольневі системи), отримані за розрахунками. 3D-побудова гладкої тривимірної моделі глибин геологічного середовища виконана шляхом растрової інтерполяції за алгоритмом Topo to Raster, що забезпечує морфологічну цілісність поверхні. Для усунення локальних нерівностей та візуальних артефактів застосовано метод просторової фільтрації (Focal Statistics) із використанням ковзного середнього. Візуалізацію оптимізовано завдяки налаштуванню параметрів базових висот і білінійній інтерполяції за ресемплінгом, що дало змогу досягти високої плавності градієнтів при збереженні метричної точності вихідних даних.

За методами математичного моделювання програмного продукту Plaxis було розраховано НДС ґрунтової основи під виділеними нами типовими техногенними об'єктами (Bentley..., 2020). Споруди було згруповано за типом фундаменту і за кількістю поверхів, що опосередковано визначає навантаження.

Розрахунки проводились чисельним методом із використанням скінченно-елементного аналізу, розв'язувалась плоска задача з розбиттям розрахункової області на елементи дрібної крупності. Процес нелінійного деформування моделювався покроково за параметром навантаження. Параметри фізико-механічних властивостей описано лінійно-пружною моделлю, використано модель Кулона–Мора. Отримані епюри напружень і переміщень використано для визначення глибин поширення впливів та подальшої інтерполяції для побудови карти нижньої межі геологічного середовища.

Для аналізу геологічної будови, інженерно-геологічних і геодинамічних умов було використано карти (Колот та ін., 1984; Палієнко та ін., 2000), для побудови інженерно-геологічних розрізів були використані фондові матеріали, звіти про інженерно-геологічні вишукування для окремих об'єктів, що розміщуються в буферній зоні заповідника (Вивчення..., 2002; Техногенні..., 2016).

Усі вхідні дані адаптовані до універсальної поперечної системи координат Меркатора (UTM)

(datum WGS84, zone 36 N) і опрацьовані в геоінформаційній системі ArcGIS Desktop Basic.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Інженерно-геологічні умови буферної зони заповідника

Заповідник «Софія Київська» є об'єктом всесвітньо-культурної спадщини та внесений у список ЮНЕСКО під номером 527 у 1990 р. Він розташований в історичному центрі Києва (Шевченківський район), є одним з найбільших пам'ятників архітектури і монументального мистецтва початку XI ст. Для збереження об'єктів культурної спадщини (собор, дзвіниця, монастирські будівлі XVII–XVIII ст. тощо) крім буферної зони виділяють зону суворої охорони, що враховує вплив зміни гідрогеологічних умов (рис. 1).

У геоморфологічному сенсі ансамбль Софійського собору розташований у найбільш високій частині київського лесового плато (Старокиївська гора), обмежений правим берегом р. Дніпро, долиною р. Либідь, Хрещатицьким та Глибочицьким (урочище Гончарі–Кожум'яки) ярами. Абсолютні позначки території змінюються в межах 186,4–191,6 м. Площа центральної ділянки заповідника — 5,025 га. Тут розташовані 16 пам'яток національного значення — Софійський собор, дзвіниця, трапезна, будинок митрополита, бурса та ін. Площа буферної зони — 112,7 га. Геологічний розріз території заповідника є типовим для київського лесового плато, де відбулася найбільш помітна акумуляція відкладів у пліоцені–плейстоцені. У той час тут сформувалась товща відкладів потужністю 25–84 м. Геологічний розріз плато доволі однорідний, усі його головні горизонти залягають субгоризонтально (рис. 2).

Основою ґрунтової товщі є «строкаті глини» міоцену–пліоцену і горизонт пліоцен-нижньочетвертинних «бурих глин». Над ними залягають відклади дніпровського льодовикового комплексу (середній плейстоцен). У повному розрізі він містить під-, надморенні відклади (здебільшого піски та супіски) і морену (суглинки) (Колот та ін., 1984). Між льодовиковим комплексом і лесовою товщею, що залягає вище, за керном багатьох свердловин виділено темно-сірий похований ґрунт (лесоподібний суглинок) потужністю до 1,5 м. Леси представлені однорідними палево-жовтими алевритами. У верхній частині розрізу лесів потужністю 7–10 м переважає фракція крупного алевриту (супісок), а у нижній потужністю 2–3 м — дрібного алевриту (суглинок). Особливістю лесоподібних супісків є їх просідання під час замочування. Територія заповідника належить до I типу ґрунтових умов за просіданням. Саме в лесах закладені фундаменти Софіївського собору, дзвіниці, трапезної та інших об'єктів ансамблю (Вивчення..., 2002).

У гідрогеологічному сенсі встановлено, що перший ґрунтовий водоносний горизонт на території заповідника залягає у флювіогляціальних і моренних відкладах на глибині 13–17 м в межах абсолютних позначок 171–175 м. Цей горизонт — безнапірний. Потужність водовмісних ґрунтів — 6–10 м. Водотривкий шар бурих глин залягає на глибині 22–27 м.

Аналіз техногенного освоєння буферної зони заповідника та зміни НДС його геологічного середовища

У межах буферної зони заповідника проаналізовано техногенні статичні та динамічні навантаження. До статичних навантажень віднесено існуючу забудову, до динамічних — рух автомобільного транспорту та вібрації, що виникають під час руху поїздів метрополітену, роботи фунікулера.

Будівлі та споруди на території буферної зони заповідника систематизовано за такими характеристиками:

- тип проєкту будівництва («царський», «сталінка», індивідуальний проєкт, «панельний») та рік зведення;
- поверховість (малоповерхові — менше трьох поверхів; середньої поверховості — 4–5; багатоповерхові — 6–9; підвищеної поверховості — понад 10 поверхів);
- будівельний матеріал (цегла, залізобетон);
- площа основи, м^2: незначна — менше як 150; мала — 150–400; середня — 400–800; велика — 800–1200);
- тип фундаменту (стрічковий, стовпчастий, пальовий).

Понад 30% площі буферної зони зазнає впливу статичного навантаження різної величини. Слід зазначити, що за останні десятиліття на території буферної заповідної зони були виконані та проводяться роботи з реконструкції існуючих споруд та нового будівництва, що проявляється у додаткових привантаженнях та, відповідно, змінах властивостей компонентів геологічного середовища (див. рис. 1). Для регулювання гідрогеологічних умов і забезпечення стійкості схилів у північній та східній частинах схилу прокладено дренажно-

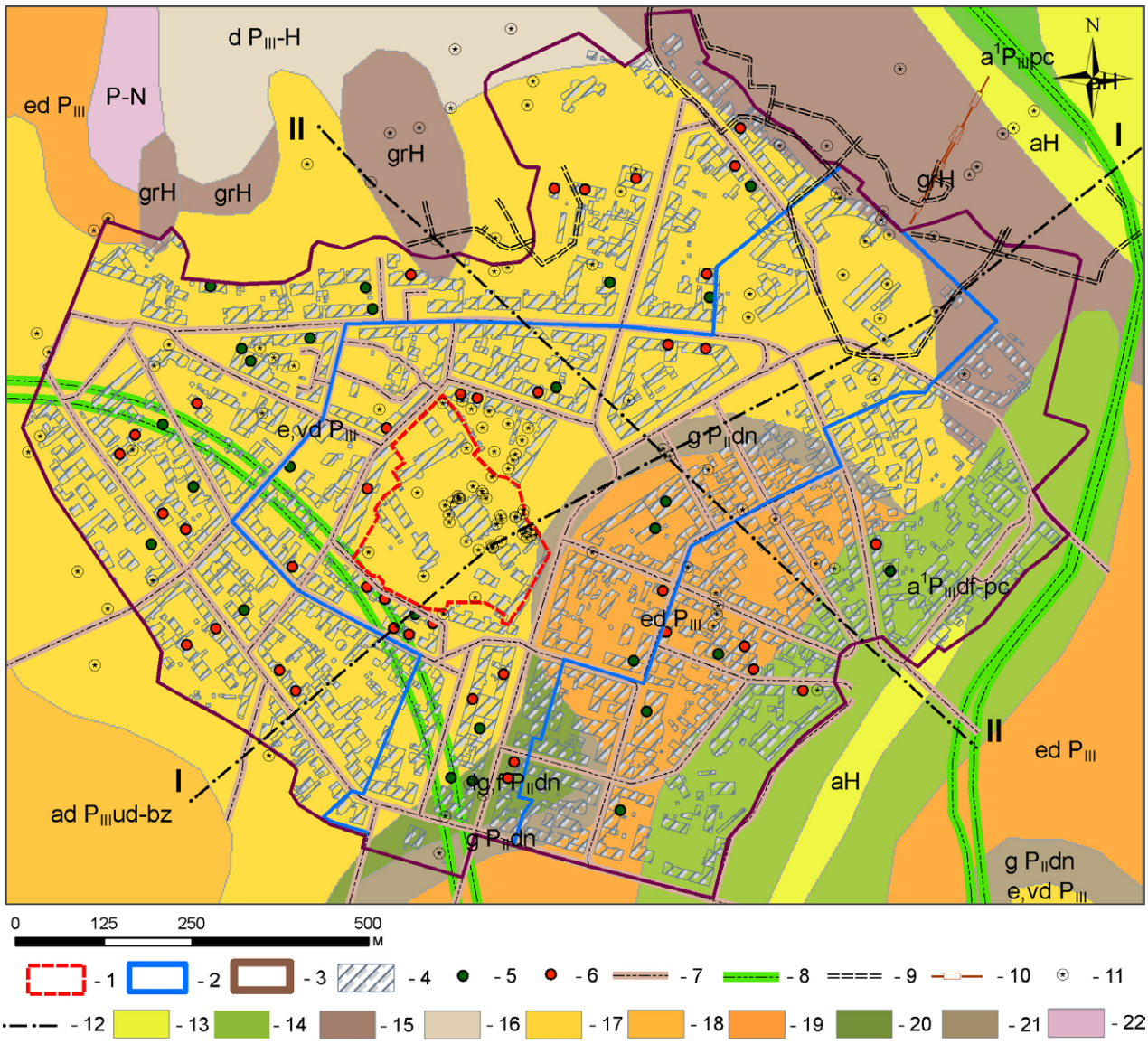


Рис. 1. План-схема території Національного заповідника «Софія Київська», основа — четвертинні відклади, за (Колот та ін., 1984):
1 — межі заповідника; *2* — особливо сувора охоронна зона; *3* — охоронна (буферна) зона, 2005 р.; *4* — будівлі та споруди; *5* — новобудова; *6* — реконструкція; *7* — вулиці; *8* — тунелі метро; *9* — дренажні системи; *10* — фунікулер; *11* — свердловини інженерно-геологічні та гідрогеологічні; *12* — лінії розрізів; *13* — алювіальні відклади, піски (aH); *14* — піски комплексу першої надзаплавної тераси (a^1P_{II}df-pc); *15* — гравітаційні утворення (grH); *16* — делювіальні відклади, супіски, суглинки (dP_{III}–H); *17* — супіски та суглинки лесоподібні (e, dvP_{III}); *18* — алювіально-делювіальні відклади, піски, супіски (adP_{III}ud-bz); *19* — еолово-делювіальні відклади, піски (edP_{III}); *20* — супіски та піски флювіогляціальні, надморенні та підморенні (f, lP_{II}dn); *21* — суглинки моренні (gP_{II}dn); *22* — дочетвертинні відклади (P-N).

Fig. 1. Schematic plan of the territory of the National Reserve "St. Sophia of Kyiv", background — Quaternary deposits after (Kolot et al., 1984):
1 — boundaries of the Reserve; *2* — especially strict protection zone; *3* — protection (buffer) zone, 2005; *4* — buildings and structures; *5* — new construction; *6* — reconstruction; *7* — streets; *8* — metro tunnels; *9* — drainage systems; *10* — funicular; *11* — engineering-geological and hydrogeological boreholes; *12* — cross-section lines; *13* — alluvial deposits, sands (aH); *14* — sands of the first above-floodplain terrace complex (a^1P_{II}df-pc); *15* — gravitational formations (grH); *16* — deluvial deposits, sandy loams and loams (dP_{III}–H); *17* — loess-like sandy loams and loams (e, dvP_{III}); *18* — alluvial-deluvial deposits, sands and sandy loams (adP_{III}ud-bz); *19* — aeolian-deluvial deposits, sands (edP_{III}); *20* — fluvioglacial, supraglacial and subglacial sandy loams and sands (f, lP_{II}dn); *21* — moraine loams (gP_{II}dn); *22* — pre-Quaternary deposits (P-N).

ISSN 2522-9753 ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ІГН НАН УКРАЇНИ, ТОМ 18, ВИП. 2, 2025

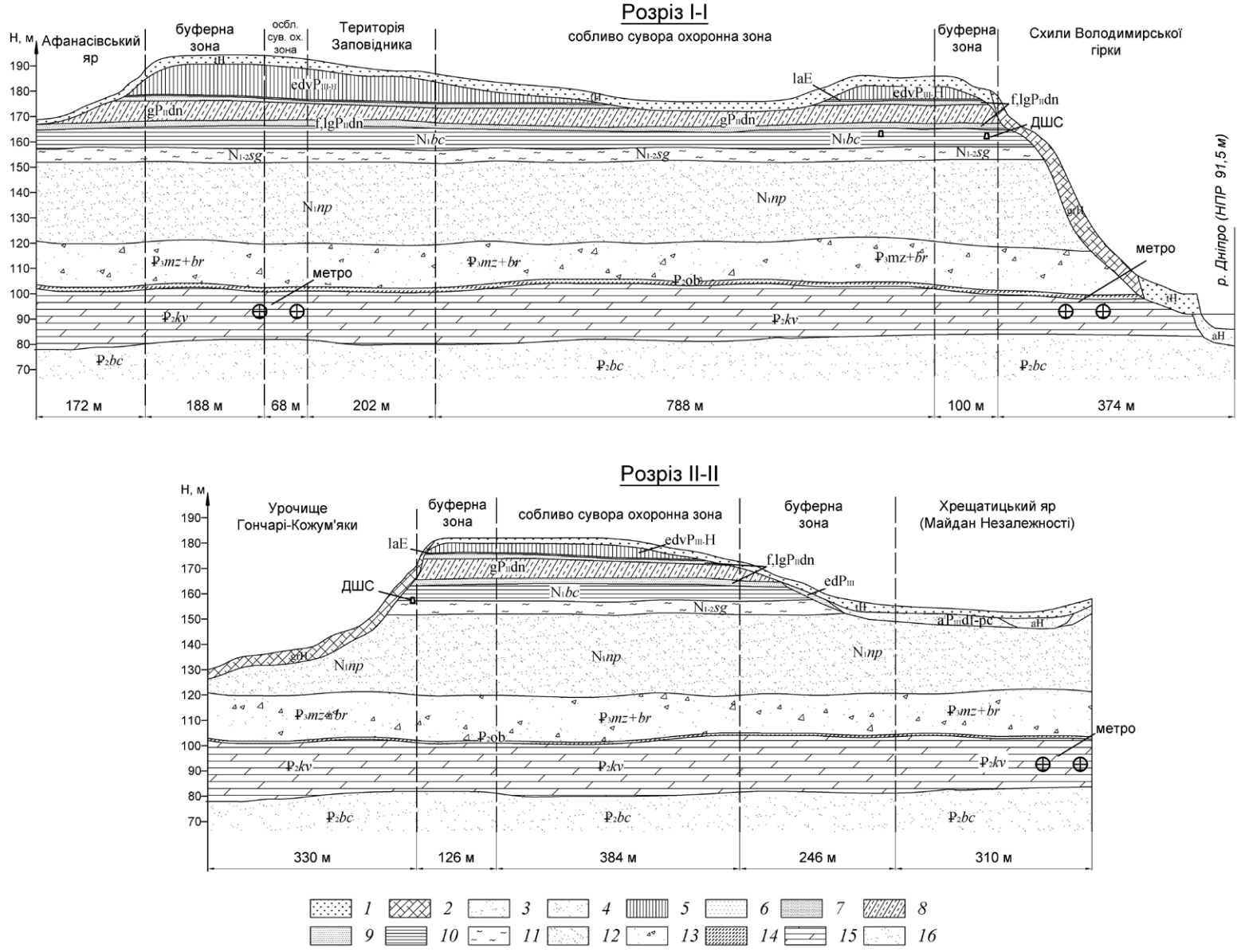


Рис. 2. Інженерно-геологічні розрізи вздовж території досліджень:
1 — техногенні відклади (tH); *2* — гравітаційні утворення (grH); *3* — алювіальні відклади, піски (aH); *4* — піски комплексу першої надзаплавної тераси (a^1P_{II}df-pc);

5 — супіски та суглинки лесоподібні (edvP_{III}–H); *6* — суглинок прісноводний (laE); *7* — супіски та піски флювіогляціальні, надморенні та підморенні (f, lP_{II}dn); *8* — суглинки моренні (gP_{II}dn); *9* — еолово-делювіальні відклади, піски (edP_{III}); *10* — глини бурі (N_2cb); *11* — глини строкаті (N_{1-2}sg); *12* — пісковики полтавської світи (N_1np); *13* — піски межигірської та берекської світ (P_3mz+br); *14* — алеврити обухівської світи (P_2ob); *15* — спондилові глини київської світи (P_2kv); *16* — піски берекської світи (P_2bc).

Fig. 2. Engineering-geological cross-sections along the study area:
1 — technogenic deposits (tH); *2* — gravitational formations (grH); *3* — alluvial deposits, sands (aH); *4* — sands of the first above-floodplain terrace complex (a^1P_{II}df-pc); *5* — loess-like sandy loams and loams (edvP_{III}–H); *6* — freshwater loam (laE); *7* — fluvioglacial, supraglacial and subglacial sandy loams and sands (f, lP_{II}dn); *8* — moraine loams (gP_{II}dn); *9* — aeolian-deluvial deposits, sands (edP_{III}); *10* — brown clays (N_2cb); *11* — mottled clays (N_{1-2}sg); *12* — sandstones of the Poltavska Suite (N_1np); *13* — sands of the Mezhyhirska and Berekska Suites (P_3mz+br); *14* — aleurites of the Obukhivska Suite (P_2ob); *15* — spondylous clays of the Kyivska Suite (P_2kv); *16* — sands of the Berekska Suite (P_2bc).

штольневі системи прохідного перерізу на глибині 20–22 м, протяжністю 2,8 км.

При аналізі динамічних техногенних навантажень в межах буферної зони заповідника за інтенсивністю руху автомобільного транспорту було виділено три категорії доріг. Загальна протяжність транспортних шляхів ≈14 км. У межах території досліджень на глибині ≈90 м проходить транспортний тунель Сирецько-Печерської гілки метрополітену. Під час руху поїздів рівень вібрації за віброприскоренням може змінюватися від 56 до 135 дБ. На східному схилі території досліджень працює фунікулер.

Пройдені бурові інженерно-геологічні та моніторингові гідрогеологічні свердловини завглибшки 18–33 м також віднесено до техногенного втручання у геологічне середовище.

На підставі чисельного моделювання в програмному комплексі Plaxis отримано розподіли напружень та деформацій у ґрунтовому масиві для типових груп навантажень, виділених у межах буферної зони (рис. 3). Розрахунки проводились поетапно імітуючи послідовність подій від природного стану ґрунтового масиву, будівництва, привантаження від руху транспорту. Для споруд за кількістю поверхів прийнято такі глибини поширення змін стану ґрунтової товщі: одноповерхові — 3 м; 2–3 поверхи — 5 м; 4–5 поверхові — 10 м; 6–9 поверхові — 15 м; понад 9 поверхів — 30 м.

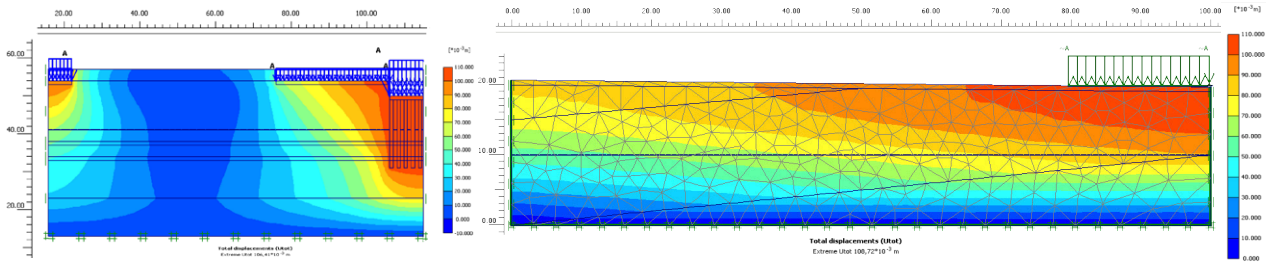
Згідно з результатами розрахунків глибина активної зони впливу залежить від поверховості та типу фундаментів і змінюється в межах від 3 до 30 м; для багатоповерхової забудови формується зона підвищених вертикальних напружень із поступовим затуханням у глибину; динамічні навантаження формують локальні зони додаткових деформацій, що можуть накладатися на статичне поле напружень; сумарний вплив призводить до формування складної просторової структури НДС.

Для визначення впливів від руху транспорту на автошляхах динамічні навантаження задавались параметрами — частота, амплітудний коефіцієнт, початкова фаза, і були обрані з бібліотеки програми Plaxis. Радіус поширення змін у ґрунтах було прийнято 8–12 м.

Для визначення відстані поширення динамічних впливів від руху поїздів метрополітену було використано залежності, наведені у нормативі та монографії (Споруди..., 2003; Кріль, 2015). Враховувались параметри ґрунту (спондилові глини), глибина лоткової частини тунелю, відстані від поздовжньої осі тунелю, віброшвидкості на лотковій частині тунелю. Радіус впливу від руху поїздів метрополітену за загасанням віброшвидкості ґрунту прийнято для подальших інтерполяцій — 40 м.

Значення меж геологічного середовища в контексті збереження об'єктів історико-архітектурної спадщини

Виділяють верхню і нижню межу геологічного середовища, верхня збігається з денною поверхнею, нижню визначають за найглибшим втручанням людини та за відповідними змінами напружень й деформацій ґрунтів і порід, а також геохімічними процесами. Ця межа варіативна для різних природно-техногенних систем. Визначення подібних меж, а також видів техногенної діяльності є основою для розроблення глибинно-функціонального зонування та встановлення обмежень, що забезпечують баланс між розвитком інфраструктури та збереженням об'єктів культурної спадщини від техногенних загроз шляхом зонування, моніторингу та планувальних обмежень. Ці межі визначають вертикальний діапазон впливу, інтегруючи поверхневі (атмосферні, статичні,



а б

Рис. 3. Епюри зміни напружено-деформованого стану геологічного середовища при статичних навантаженнях від споруд (*а*); при динамічних навантаженнях від руху транспорту на дорожнє покриття (*б*).

Fig. 3. Diagrams showing changes in the stress-strain state of the geological environment under static loads from structures (*а*) and dynamic loads from traffic on the road pavement (*б*).

динамічні навантаження) та глибинні процеси (геодинамічні, гідрогеологічні, навантаження, що поширюються від виробок глибокого залягання).

На рис. 4 представлено результати розрахунків нижньої межі геологічного середовища території буферної зони заповідника. На карті глибин (рис. 4) відображено вертикальний діапазон змін НДС ґрунтового масиву, спричинених статичними (забудова) та динамічними (рух транспорту) навантаженнями, без урахування дії метро. Створення 3D-моделі в модулі ArcGIS 3D Analyst дало змогу візуалізувати просторову взаємодію між поверхневими та глибинними процесами, зокрема зони впливу підземних споруд (дренажно-штольневі системи, траси метрополітену).

Максимальні глибини коливаються від 25 до 30 м, а з урахуванням метрополітену — до 90–130 м. Найбільша товщина геологічного середовища відповідає окремим ділянкам буферної зони, зокрема навколо Михайлівської площі, прилеглої до схилу зони та ділянок між вулицями Софіївська — Житомирська, Софіївська — А. Тарасової та Ярославів Вал — Житомирська.

Встановлення нижньої межі геологічного середовища має принципове значення для оцінки геотехнічних ризиків, тому що дає змогу визначити глибину, в межах якої відбувається трансформація НДС ґрунтового масиву під впливом техногенних чинників. Перевищення цієї межі під час проєктування підземних споруд може призводити до додаткових деформацій основ, нерівномірних осідань та опосередкованого впливу на фундаменти історичних будівель.

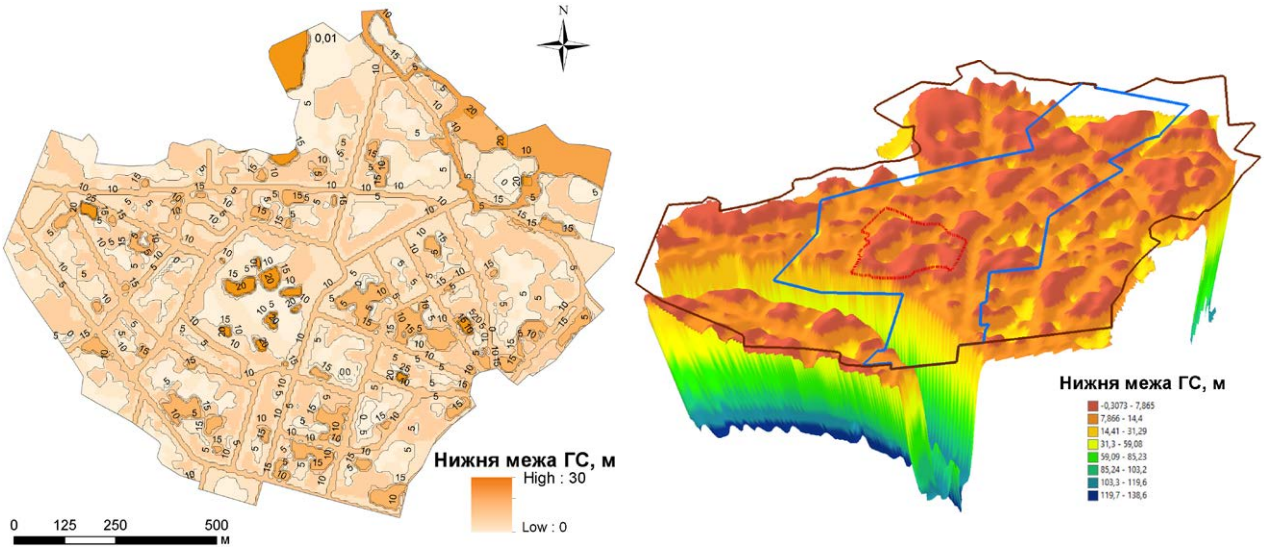
Принципи встановлення глибинних охоронних меж для територій історичних ареалів міст

Формування глибинних охоронних меж для територій історичних ареалів має базуватись на комплексному врахуванні геологічних, інженерно-геологічних і техногенних чинників, що визначають НДС ґрунтового масиву та умови збереження об'єктів культурної спадщини.

На підставі просторово-функціонального аналізу геологічного середовища буферної зони Національного заповідника «Софія Київська» та результатів математичного моделювання НДС ґрунтового масиву сформульовано основні принципи встановлення глибинних (вертикальних) охоронних зон для об'єктів історико-культурної спадщини в умовах інтенсивного освоєння підземного простору урбанізованих територій:

– **Принцип тривимірності регулювання та визначення меж геологічного середовища**. Охоронні зони слід розглядати як просторові (3D) об'єкти, що мають межі в плані і за глибиною, які визначають допустимий рівень підземного втручання. Верхня межа збігається з денною поверхнею, нижня — з максимальною глибиною поширення змін НДС під впливом усіх техногенних чинників (статичних від забудови, динамічних від транспорту, дренажно-штольневих систем і метрополітену). Для території дослідження нижня межа становить 25–30 м (без урахування положення метро) та 90–130 м (з його урахуванням).

– **Принцип стратифікованого використання підземного простору**. Охоронні зони формуються у вертикальному розрізі з поділом підземного простору на функціональні горизонти: верхній (охоронний) — зона збереження археологічних й історичних шарів (0–15 м); середній (обмеженого використання) — зона регламенто-



а б

Рис. 4. Потужність ґрунтів буферної зони «Софії Київської», що зазнає змін напружено-деформованого стану від техногенних чинників: без урахування тунелів метро (*а*); 3D модель нижньої межі геологічного середовища з урахуванням усіх техногенних чинників (*б*).

Fig. 4. Thickness of the soil mass in the buffer zone of St. Sophia of Kyiv affected by changes in the stress-strain state due to technogenic factors without consideration of metro tunnels (*a*) and 3D model of the lower boundary of the geological environment with account of all technogenic factors (*б*).

ваного будівництва; нижній (інженерного освоєння) — зона допустимого розміщення підземної інфраструктури за умови дотримання захисних відстаней. Ступінь деталізації стратифікації може визначатись залежно від інженерно-геологічних умов та рівня техногенного навантаження.

– **Принцип суперпозиції впливів.** При визначенні глибинних меж враховується сумарна дія всіх техногенних чинників, що формують складне поле напружень і деформацій у ґрунтовому масиві.

– **Принцип інженерно-геологічної обумовленості.** Глибинні межі встановлюються з урахуванням будови ґрунтового масиву, фізико-механічних властивостей ґрунтів (зокрема просадних лесів), гідрогеологічних умов та наявності небезпечних геологічних процесів (просідання, зсуви, підтоплення тощо).

– **Принцип напружено-деформаційної обґрунтованості.** Глибинні межі визначаються на підставі результатів чисельного моделювання НДС ґрунтового масиву. Критерієм є глибина активної зони впливу техногенних навантажень з урахуванням їх суперпозиції. Ключовим критерієм визначення глибинних обмежень є глибина поширення змін НДС ґрунтового масиву, яку встановлено за результатами чисельного моделювання. Нижня межа охоронної зони має перевищувати глибину активного впливу техногенних навантажень з урахуванням коефіцієнта запасу.

– **Принцип встановлення мінімальних захисних (режимних) відстаней.** Від нижньої межі геологічного середовища до запланованих підземних споруд (тунелі, паркінги, сховища) обов'язково передбачається захисна відстань, що виключає накладання зон змін НДС (не менш як 10–20 м залежно від типу ґрунтів і навантажень).

– **Принципи адаптивності та локальності.** Визначення меж проводиться з урахуванням конкретних інженерно-геологічних умов (лесові ґрунти, гідрогеологічний режим) та історії техногенного освоєння території з обов'язковим застосуванням 3D-ГІС-моделювання та чисельних методів (PLAXIS).

– **Принцип адаптивності та превентивного моніторингу.** Реалізація глибинного зонування має супроводжуватися системою геотехнічного та гідрогеологічного моніторингу для контролю змін стану ґрунтового масиву і забезпечення стабільності об'єктів культурної спадщини. Глибинні межі уточнюють за результатами інженерно-геологічного та гідрогеологічного моніторингу, їх

можна коригувати залежно від змін техногенного навантаження та стану геологічного середовища.

– **Принцип нормативної інтеграції.** Запропоновані глибинні обмеження повинні бути інтегровані у містобудівну та пам'яткоохоронну документацію (історико-архітектурні опорні плани, детальні плани територій, ДБН) як обов'язковий елемент регулювання підземного будівництва.

Таким чином, запропонована система принципів забезпечує науково обґрунтоване встановлення глибинних охоронних меж і створює основу для переходу до тривимірного регулювання підземного використання територій історичних ареалів.

ВИСНОВКИ

У роботі обґрунтовано підходи до встановлення глибинних охоронних зон для територій історико-культурної спадщини в умовах інтенсивного розвитку підземної інфраструктури сучасних міст. Традиційні двовимірні системи планування є недостатніми для захисту археологічних шарів і конструктивної стабільності історичних споруд, оскільки не враховують вертикальний вимір техногенного впливу.

На підставі аналізу інженерно-геологічних умов і техногенного навантаження встановлено, що формування НДС ґрунтового масиву визначається сукупною дією статичних і динамічних чинників, включаючи забудову, транспортну інфраструктуру та підземні споруди.

На прикладі буферної зони Національного заповідника «Софія Київська» встановлено просторову структуру геологічного середовища та визначено нижню межу змін НДС ґрунтів: 25–30 м від денної поверхні (без урахування метрополітену) та 90–130 м (з його урахуванням). Чисельне моделювання в PLAXIS 2D дало змогу кількісно оцінити вплив типових статичних та динамічних навантажень, глибину поширення змін НДС для типових груп навантажень, а також виконати просторову інтерполяцію та побудувати 3D модель нижньої межі геологічного середовища і підтвердило доцільність глибинно-функціональної типізації території.

Запропоновано систему принципів встановлення глибинних охоронних меж, яка ґрунтується на 3D результатах ГІС-аналізу, урахуванні інженерно-геологічних умов, результатах чисельного моделювання та типізації техногенних навантажень і на міжнародному досвіді (вертикальні буферні зони UNESCO, практика Афінського та Салонікського метрополітенів). Їх впровадження забезпечить баланс між збереженням культурної спадщини та стратегічним освоєнням підземного простору.

Результати роботи можуть бути використані для розробки доповнень до чинних будівельних норм України щодо вертикального регулювання підземного будівництва в історичних ареалах, а також для аналогічних досліджень інших об'єктів Всесвітньої спадщини ЮНЕСКО.

Реалізація запропонованого підходу сприяє забезпеченню науково обґрунтованого регулювання підземного будівництва в межах історичних ареалів міст та мінімізації ризиків негативного впливу на об'єкти культурної спадщини.

Дослідження виконано в рамках наукової теми III-5–23 «Інженерно-геологічні засади розбудови міст та стратегічного освоєння підземного простору», номер державної реєстрації 0123U100129.

REFERENCES

Ribin V. F., 2002. Vyvchennya hidrogeologichnykh ta inzhenerno-geologichnykh umov ta yikh vplyv na stan istoryko-arkhitekturnykh pam'yatnykiv na prykladi Natsionalnoho zapovidnyka "Sofiya Kyivska" [Study of hydrogeological and engineering-geological conditions and their impact on the state of historical and architectural monuments on the example of the National Reserve "St. Sophia of Kyiv"]. Report on R&D. Kyiv: Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, 184 p. (In Ukrainian).

Вивчення гідрогеологічних та інженерно-геологічних умов та їх вплив на стан історико-архітектурних пам'ятників на прикладі Національного заповідника «Софія Київська». Звіт про НДР. Кер. Рибін В. Ф. ІГН НАН України. Київ, 2002. 184 с.

Kolot E. I., Kuzishina L. P., Kutovoy V. I., Lavrik V. F., Marakhovskaya I. I., Selin Yu. I., Solovitsky V. N., Shestopalova E. V., 1984. Geologicheskaya karta Ukrainskoy SSR masshtaba 1:50 000. Kiyevskiy promyshlennyy rayon

Колот Э. И., Кузишина Л. П., Кутовой В. И., Лаврик В. Ф., Мараховская И. И., Селин Ю. И., Соловицкий В. Н., Шестопалова Е. В. Геологическая карта Украинской СССР масштаба 1:50 000. Киевский промышленный район. Киев, 1984.

[Geological map of the Ukrainian SSR at a scale of 1:50,000. Kyiv industrial region]. Kyiv. (In Russian)

Kril, T. V., Selivachova, U. M., 2024. Underground space as a resource for post-war urban recovery: engineering-geological perspectives. *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, No 17, Iss. 2, Pp. 155–172. (In Ukrainian). https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.321737.

Кріль Т. В., Селівачова У. М. Підземний простір як ресурс післявоєнної реконструкції міської забудови: інженерно-геологічні аспекти. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2024. Том 17. Вип. 2. С. 155–172. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.321737.

Kril, T. V., 2019. Depth-functional scheme of the geological environment for the development of underground space of urbanized territories. *Collection of Scientific Works of the Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine*, Vol. 12, Pp. 95–104. (In Ukrainian).https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185749 (In Ukrainian).

Кріль Т. В. Глибинно-функціональна схема геологічного середовища для освоєння підземного простору урбанізованих територій. *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України.* 2019. Вип. 12. С. 95–104. https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2019.185749.

Kril, T. V., 2015. *Technogenic dynamic influences on the geological environment of city (on an example of Kyiv)*. Kyiv: Naukova Dumka, 160 p. (In Ukrainian).

Кріль Т. В. Техногенні динамічні впливи на геологічне середовище міста (на прикладі м. Києва). Київ: Наукова думка, 2015. 160 с.

Paliyenko, V. P., Barshevskyi, M. Ye., Spitsya, R. O., 2000. Rozrobka proektu geodynamichnoyi merezhi m. Kyieva z metoyu sposterezhennia i zapobihannia vynyknenniu nadzvychaynykh zsuvonebezpechnykh sytuatsiy ta deformatsiynykh protsesiv na inzhenernykh sporudakh ta vysotnykh zhytlovykh budynkakh mista [Development of the project of the geodynamic network of Kyiv]. Scientific report, Vol. 2. Kyiv: KIIVD "Enerhoproekt". (In Ukrainian).

Палієнко В. П., Барщевський М. Є., Спиця Р. О. Розробка проекту геодинамічної мережі м. Києва з метою спостереження і запобігання виникненню надзвичайних зсувонебезпечних ситуацій та деформаційних процесів на інженерних спорудах та висотних житлових будинках міста. Науковий звіт. Київ: КІІВД «Енергопроект», 2000, Т. 2.

DBN V.2.3–7–2003, 2003. *Sporudy transportu. Metropliteny* [Transport structures. Metropolitans]. Kyiv: Minbud Ukrainy, 300 p. (State Building Norms of Ukraine) (In Ukrainian).

Споруди транспорту. Метрополітени: ДБН В.2.3–7–2003 [Чинний від 2004–01–01]. Київ: Мінбуд України, 2003. 300 с. (Держ. будів. норми України).

Demchyshyn, M.G., 2016. *Tekhnohenni vplyvy na heolohichne seredovyshche istorychnykh arealiv nadznachnykh i znachnykh mist Ukrainy* [Technogenic impacts on the geological environment of historical areas of the most significant and significant cities of Ukraine]. Report on R&D. Kyiv: Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, 305 p. (In Ukrainian).

Техногенні впливи на геологічне середовище історичних ареалів надзначних і значних міст України. Звіт про НДР. Кер. Демчишин М. Г. ІГН НАН України. Київ, 2016. 305 с.

Beer, G., Duenser, C., Mallardo, V., 2021. Efficient and realistic 3-D boundary element simulations of underground construction using isogeometric analysis. *Computers and Geotechnics*, No 134, Pp. 104055. https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.14489.

Beer G., Duenser C., & Mallardo V. (2021). Efficient and realistic 3-D boundary element simulations of underground construction using isogeometric analysis. *Computers and Geotechnics*. 134. 104055. https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.14489.

Bentley Systems, 2020. *PLAXIS 2D reference manual*. Bentley Systems Inc. Available at: https://docs.bentley.com/LiveContent/web/PLAXIS%202D-v12/en/GUID-.

Bentley Systems. PLAXIS 2D Reference manual. 2020. Bentley Systems Inc. https://docs.bentley.com/LiveContent/web/PLAXIS%202D-v12/en/GUID-.

Bogusz, W., 2024. Excavation and tunnelling impact on existing structures in the context of the second generation Eurocodes. In: *Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024: Geotechnical engineering challenges to meet current and emerging needs of society*. https://doi.org/10.1201/9781003431749-272.

Bogusz W. Excavation and tunnelling impact on existing structures in the context of the second generation Eurocodes. Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024. Geotechnical engineering challenges to meet current and emerging needs of society. 2024. DOI 10.1201/9781003431749-272.

Caudron, M., Heib, M.A., Emeriault, F., 2008. Collapses of underground cavities and soil-structure interactions: influences of the position of the structure relative to the cavity. https://doi.org/10.48550/arXiv.0810.5297.

Caudron M., Heib M. A., Emeriault F. Collapses of underground cavities and soil-structure interactions: influences of the position of the structure relative to the cavity. 2008. https://doi.org/10.48550/arXiv.0810.5297.

Darmawan, Y., Munawar Atmojo, D. A., Wahyujati, H., Nainggolan, L., 2023. Accuracy assessment of spatial interpolation methods using ArcGIS. *E3S Web of Conferences*, No 464. Article 09005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346409005.

Darmawan Y., Munawar Atmojo D. A., Wahyujati H., & Nainggolan L. Accuracy assessment of spatial interpolations methods using ArcGIS. 2023. *E3S Web of Conferences*. No 464, Article 09005. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346409005.

Elliniko Metro S. A., 2025. *Base project*. Available at: https://www.emetro.gr/?page_id=4172.

Elliniko Metro S. A., 2025a. *Archaeological excavations*. Available at: https://www.emetro.gr/?page_id=4199&lang=en.

Guler, D., 2024. 3D underground land administration by standardized geoinformation. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, No XLVIII-4/W9–2024. Pp. 213–219. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-213-2024.

Kitsakis, D., Kalogianni, E., Dimopoulou, E., 2022. Public law restrictions in the context of 3D land administration: review on legal and technical approaches. *Land*, No 11, Iss. 1, Pp. 88. https://doi.org/10.3390/land11010088.

Kontogianni, V., Stiros, S. C., 2020. Ground loss and static soil–structure interaction during urban tunnel excavation: evidence from the excavation of the Athens Metro. *Infrastructures*, No 5, Iss. 8, P. 64. https://doi.org/10.3390/infrastructures5080064.

Lemmen, C., Van Oosterom, P., Bennett, R., 2015. The land administration domain model. *Land Use Policy*, No 49, Pp. 535–545. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.014.

Saeidian, B., Rajabifard, A., Atazadeh, B., Kalantari, M., 2021. Underground land administration from 2D to 3D: critical challenges and future research directions. *Land*, No 10, Iss. 10, P. 1101. https://doi.org/10.3390/land10101101.

UNESCO World Heritage Centre, 2025. *Frontiers of the Roman Empire — Dacia (Romania) No 1718*. Available at: https://whc.unesco.org/document/208505.

Xiao, Y., Gu, X., Yin, S., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q., Niu, Y., 2016. Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. *SpringerPlus*, No 5, P. 425. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2073-0.

Zhang, D., 2023. Influences of deep foundation pit excavation on the stability of adjacent ancient buildings. *Buildings*, No 13, Iss. 8. https://doi.org/10.3390/buildings13082004.

Elliniko Metro S. A. Base Project. URL: https://www.emetro.gr/?page_id=4172.

Elliniko Metro S. A. *Archaeological Excavations*. 2025a. URL: https://www.emetro.gr/?page_id=4199&lang=en.

Guler D. 3D underground land administration by standardized geoinformation, Int. Arch. Photogramm. 2024. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLVIII-4/W9–2024, 213–219, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W9-2024-213-2024.

Kitsakis D., Kalogianni E., & Dimopoulou E. Public Law Restrictions in the Context of 3D Land Administration — Review on Legal and Technical Approaches. 2022. *Land*. No 11(1). 88. https://doi.org/10.3390/land11010088.

Kontogianni V., & Stiros S. C. Ground Loss and Static Soil–Structure Interaction during Urban Tunnel Excavation: Evidence from the Excavation of the Athens Metro. *Infrastructures*. 2020. 5(8), 64. https://doi.org/10.3390/infrastructures5080064.

Lemmen C., Van Oosterom P., & Bennett R. The Land Administration Domain Model. *Land Use Policy*. 2015. No 49. Pp. 535–545. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.01.014.

Saeidian, B., Rajabifard, A., Atazadeh, B., & Kalantari, M. Underground Land Administration from 2D to 3D: Critical Challenges and Future Research Directions. 2021. *Land*. No 10 (10). P. 1101. https://doi.org/10.3390/land10101101.

UNESCO World Heritage Centre. Frontiers of the Roman Empire — Dacia (Romania). 2025. No 1718. https://whc.unesco.org › lisURL: https://whc.unesco.org/document/208505.

Xiao Y., Gu X., Yin S., Shao J., Cui Y., Zhang Q., & Niu Y. Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. SpringerPlus 2016. No 5, Article 425. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2073-0.

Zhang D. Influences of Deep Foundation Pit Excavation on the Stability of Adjacent Ancient Buildings. Buildings. 2023. No 13(8). https://doi.org/10.3390/buildings13082004.

Manuscript received September 10, 2025;
revision accepted November 29, 2025.

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна