ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 624.131 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.286

© О.М. Шашенко[1], В.Г. Шаповал[1], Н.В. Хозяйкіна[1], К.С. Жабчик[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МЕТОДОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ГЕОТЕХНІЧНИХ РИЗИКІВ МІСЬКОЇ ЗАБУДОВИ В УМОВАХ ВОЄННИХ ВПЛИВІВ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

O. Shashenko[1], https://orcid.org/0000-0002-7012-6157
V. Shapoval[1], https://orcid.org/0000-0003-2993-1311
N. Khoziaikina[1], https://orcid.org/0000-0002-4747-3919
K. Zhabchyk[1] https://orcid.org/0000-0001-7296-9249
[1] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

METHODOLOGY FOR ASSESSING GEOTECHNICAL RISKS OF URBAN DEVELOPMENT UNDER WARTIME IMPACTS AND TERRITORIAL RECOVERY

Мета. Розроблення науково-методичного підходу до комплексного оцінювання геотехнічних ризиків міської забудови на територіях, що зазнали воєнних і пов'язаних із ними техногенних впливів, з урахуванням трансформації стану ґрунтового масиву та взаємодії системи «ґрунтовий масив–фундамент–споруда».

Методика. Застосовано системний та порівняльний аналіз сучасних підходів до оцінювання геотехнічних ризиків, взаємодії системи «ґрунтовий масив–фундамент–споруда» та зміни стану ґрунтового масиву під впливом воєнних і техногенних чинників. Використано структурно-логічне та концептуальне моделювання послідовної трансформації стану території, експертне ранжування факторів ризику та розроблення алгоритму їх комплексного оцінювання із залученням інженерних вишукувань, аналізу напружено-деформованого стану та геотехнічного моніторингу.

Результати. Запропоновано алгоритм оцінювання геотехнічного ризику, що включає аналіз історії території, комплексні інженерні вишукування, формування актуальної геотехнічної моделі, оцінювання НДС, визначення потенційних механізмів втрати стійкості, оцінювання впливу на існуючу забудову та вибір інженерних заходів. Визначено перспективний напрям подальших досліджень, пов'язаний із числовим моделюванням послідовної трансформації стану ґрунтового масиву під дією воєнних і техногенних факторів.

Наукова новизна. Встановлено закономірний зв'язок між характеристиками ґрунтового середовища, вразливістю споруди, інтенсивністю небезпечних процесів і рівнем ризику. На цій основі запропоновано комплексну модель оцінювання та алгоритм її реалізації зі зворотним зв'язком між результатами моніторингу і розрахунковою геотехнічною моделлю.

Практична значимість. Запропонований підхід може бути використаний під час інженерно-геологічних обстежень, реконструкції та нового будівництва на територіях, що зазнали воєнних впливів. Його застосування забезпечує виявлення найбільш небезпечних геотехнічних факторів, обґрунтування обсягів додаткових вишукувань, вибір розрахункових моделей і параметрів моніторингу, а також підтримує прийняття інженерних рішень щодо відновлення забудови та підвищення безпеки будівель і споруд.

Ключові слова: *геотехнічний ризик, міська забудова, воєнний вплив, ґрунтовий масив, напружено-деформований стан, осідання, деформації, стійкість, взаємодія «ґрунт–фундамент–споруда», числове моделювання, геотехнічний моніторинг.*

Вступ. Інтенсивна урбанізація та обмеженість вільних земельних ресурсів призводять до постійного ускладнення умов будівництва в межах сформованих міських територій. Нове будівництво дедалі частіше здійснюється в безпосередній близькості до існуючих будівель, інженерних мереж, підземних споруд, транспортної інфраструктури та ділянок із техногенно зміненими ґрунтами. За таких умов геотехнічна безпека визначається не лише несучою здатністю окремого фундаменту, а й характером взаємодії всієї системи «ґрунтовий масив–фундамент–споруда».

Для України зазначена проблема набуває додаткової актуальності внаслідок тривалого воєнного впливу. Пошкодження та руйнування будівель, порушення інженерних мереж, зміна рельєфу, проведення аварійних земляних робіт, демонтаж конструкцій і повторне будівництво формують додаткові передумови для зміни та просторової неоднорідності геотехнічного середовища. За даними оновленої оцінки RDNA4, станом на 31 грудня 2024 року потреби України у відновленні та реконструкції протягом наступного десятиліття оцінювалися приблизно у 524 млрд доларів США, причому значна частина потреб пов'язана з житловою, транспортною, енергетичною та іншою інфраструктурою [1].

Водночас кількісна оцінка фізичних пошкоджень не характеризує повною мірою стан геологічного середовища, на якому розміщені пошкоджені або запроєктовані до відновлення споруди. Внаслідок воєнних і пов'язаних із ними техногенних впливів можуть змінюватися щільність, вологість, деформативність і міцність ґрунтів. Додатковими чинниками є замочування основи внаслідок пошкодження водопровідних та каналізаційних мереж, потрапляння атмосферних і пожежних вод, локальне розущільнення, поява насипних матеріалів та залишкових підземних конструкцій. Дослідження геотехнічних ризиків реконструкції споруд, пошкоджених вибухами, також вказують на необхідність контрольних спостережень, геотехнічних випробувань і повторної перевірки стійкості конструкцій [2].

Таким чином, воєнний вплив доцільно розглядати не тільки як причину пошкодження надземної частини будівлі, але і як фактор трансформації геотехнічного стану території. Це зумовлює необхідність удосконалення підходів до оцінювання геотехнічних ризиків міської забудови в умовах воєнних впливів та подальшого відновлення територій.

Аналіз попередніх досліджень має класичний підхід до геотехнічного проєктування, і передбачає встановлення інженерно-геологічних умов будівельного майданчика за результатами інженерних вишукувань до початку проєктування. Сучасні підходи до геотехнічного проєктування, зокрема положення другого покоління Eurocode 7, орієнтовані на формування інтегрованої Ground Model шляхом послідовного поєднання камерального аналізу, огляду майданчика, польових досліджень і лабораторних випробувань [3, 4]. Для територій, що зазнали воєнного впливу, така модель потребує врахування не лише геологічної будови та фізико-механічних властивостей ґрунтів, а й історії техногенного перетворення території.

Сучасні дослідження числового моделювання підтверджують доцільність комплексного аналізу взаємодії системи «ґрунт–фундамент–споруда». Зокрема, метод скінченних елементів (FEM) застосовується для оцінювання взаємодії будівлі з ґрунтовою основою з урахуванням реальних деформаційних характеристик ґрунтів, отриманих за результатами компресійних випробувань [5]. Для моделювання складної тривимірної взаємодії ґрунту та конструкцій використовуються гібридні підходи MPM-FEM, що поєднують метод матеріальних точок і метод скінченних елементів [6]. Інший напрям представлений безсітковими та частинковими підходами, зокрема FEM-SPH, які застосовуються для дослідження розвитку склепінчастого ефекту та перерозподілу напружень у ґрунтовому масиві [7].

Числові дослідження фундаментів різних типів демонструють відмінності у перерозподілі навантажень і деформаціях будівель залежно від жорсткості ґрунтової основи, типу фундаменту та просторової взаємодії елементів системи [8, 9].

Значну увагу в сучасних геотехнічних дослідженнях приділено динамічній взаємодії фундаментів із шаруватими та неоднорідними ґрунтовими масивами. Показано, що локальна неоднорідність основи може впливати на розподіл переміщень і динамічну жорсткість фундаменту [10]. Для умов воєнного часу ці результати мають методологічне значення, хоча динамічні впливи, пов’язані з вибухами та іншими воєнними подіями, не слід безпосередньо ототожнювати із сейсмічними впливами через відмінність їх фізичної природи та характеристик.

Інший важливий напрям стосується впливу нового будівництва на існуючу забудову. Дослідження, виконані для умов ущільненої міської забудови, розглядають осідання та деформації існуючих споруд у зоні впливу нового будівництва [11]. Числове моделювання поведінки існуючих пальових груп під час розробки прилеглих котлованів також підтверджує необхідність урахування послідовності будівельних робіт і взаємодії фундаментів із переміщеннями ґрунту [12].

Для міських територій, розташованих на схилах, додатковою складовою геотехнічного ризику є зміна загальної стійкості ґрунтового масиву. Воєнні та техногенні фактори можуть змінювати геометрію схилу, рівень ґрунтових вод, навантаження на бровку, властивості ґрунтів та умови дренування. Дослідження взаємодії «схил–фундамент–споруда» із застосуванням скінченно-елементного моделювання показують, що положення споруди відносно схилу може істотно впливати на напружено-деформований стан системи [13].

Наведений аналіз показує, що сучасні дослідження охоплюють окремі аспекти геотехнічної безпеки: формування геотехнічної моделі, числове моделювання взаємодії «ґрунт–фундамент–споруда», оцінювання деформацій основ, динамічні впливи, вплив нового будівництва на існуючу забудову та стійкість схилів [3–13].

Водночас для територій, що зазнали воєнного впливу, недостатньо розробленим залишається підхід, за якого геотехнічний ризик оцінюється з урахуванням послідовної історії трансформації території. Фактичний стан ґрунтового масиву є результатом тривалої послідовної дії природних, техногенних і воєнних

факторів, що включають природні умови формування основи, вплив існуючої забудови, наслідки воєнних пошкоджень, зміни водного режиму території, демонтаж зруйнованих об'єктів та здійснення нового будівництва. Тому характеристики основи, отримані під час нового інженерно-геологічного дослідження, не завжди можуть розглядатися як такі, що повністю відображають її попередню історію навантаження та техногенного перетворення.

Метою статті є розроблення методологічного підходу до комплексного оцінювання геотехнічних ризиків міської забудови в умовах воєнних впливів та відновлення територій з урахуванням послідовної зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, деформаційних процесів, динамічних факторів, впливу нового будівництва та стійкості схилових територій.

Основна частина (Результати).

Запропонований у роботі підхід ґрунтується на розгляді геотехнічного стану міської території як результату послідовної взаємодії природних, техногенних та воєнних факторів. На відміну від традиційного підходу, за якого розрахункова ситуація формується переважно на основі поточного стану майданчика, запропонована методологія враховує попередню історію його трансформації.

Фактичний стан ґрунтового масиву на території забудови може формуватися внаслідок послідовної та взаємопов'язаної дії природних, техногенних і воєнних факторів. Вихідний природний стан ґрунтового середовища змінюється під впливом існуючої забудови та пов'язаних із нею навантажень. Подальший воєнний вплив може спричиняти пошкодження або руйнування будівель і споруд, порушення структури ґрунтів та зміну їх напружено-деформованого стану. Додатковим фактором може бути пошкодження підземних інженерних мереж, що призводить до зміни водного режиму території, локального замочування або перезволоження ґрунтів і, як наслідок, зміни їх фізико-механічних характеристик. На наступному етапі демонтаж пошкоджених або зруйнованих об'єктів може супроводжуватися видаленням чи збереженням залишкових фундаментів, порушенням структури верхніх шарів ґрунту та формуванням техногенно неоднорідної основи. Подальше нове будівництво створює новий розподіл навантажень і змінює напружено-деформований стан ґрунтового масиву. Таким чином, геотехнічний стан території, на якій планується нове будівництво або відновлення, доцільно оцінювати з урахуванням усієї попередньої історії її природного та техногенного перетворення.

Кожен етап може супроводжуватися зміною властивостей ґрунтового середовища, характеру навантаження та напружено-деформованого стану системи «ґрунтовий масив–фундамент–споруда». Тому геотехнічний стан території, на якій планується відновлення або нове будівництво, доцільно визначати з урахуванням усієї попередньої історії її природного та техногенного перетворення.

Під геотехнічним ризиком у роботі пропонується розуміти можливість виникнення небажаного геотехнічного процесу або перевищення допустимих параметрів деформацій, що може призвести до негативних наслідків для фундаментів, конструкцій будівель, інженерних мереж або сусідньої забудови.

До основних груп геотехнічних ризиків належать: надмірні або нерівномірні осідання, горизонтальні переміщення ґрунтового масиву, крени будівель, зниження несучої здатності основи, зсувні процеси, локальна втрата стійкості, зміна рівня ґрунтових вод, техногенне розущільнення або ущільнення ґрунтів, деформації від нового будівництва, негативний вплив котлованів на сусідню забудову, динамічні впливи та пов'язані з ними зміни напружено-деформованого стану.

Важливою особливістю є взаємозв'язок зазначених факторів. Наприклад, локальне замочування ґрунту може призвести до зниження його деформаційних характеристик та додаткового осідання. За наявності поруч будівлі з жорсткою фундаментною системою нерівномірність деформацій може спричинити перерозподіл зусиль у конструкціях.

Одним із центральних положень запропонованої методології є оцінювання зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву протягом послідовних етапів трансформації території.

У спрощеному вигляді загальний стан системи можна представити залежністю:

$$\{\sigma\},\ \{\varepsilon\},\ \{u\} = F(G, M, H, L), \tag{1}$$

де $\{\sigma\}$ – поле напружень; $\{\varepsilon\}$ – поле деформацій; $\{u\}$ – поле переміщень; G – геометричні та геологічні характеристики ґрунтового масиву; M – механічні характеристики ґрунтів; H – гідрогеологічні умови; L – система навантажень і техногенних впливів.

У звичайних умовах значна частина параметрів визначається в процесі інженерних вишукувань і приймається постійною протягом розрахункової ситуації. Для воєнно-техногенно змінених територій такий підхід потребує уточнення, оскільки окремі параметри системи можуть змінюватися внаслідок пошкодження споруд, порушення інженерних мереж, зміни водного режиму, демонтажу конструкцій та нового будівництва.

Тому в роботі запропоновано розглядати послідовність станів:

$$S_o \to S_1 \to S_2 \to S_3 \to S_4, \tag{2}$$

де: S_0 – початковий стан території; S_1 – стан після воєнного впливу; S_2 – стан після зміни водного режиму або техногенного порушення; S_3 – стан після демонтажу та підготовки території; S_4 – стан після нового будівництва.

Така постановка дозволяє перейти від оцінювання окремого розрахункового стану до аналізу еволюції напружено-деформованого стану ґрунтового масиву. Для кожного етапу можуть уточнюватися геометричні, механічні та гідрогеологічні параметри, а також система діючих навантажень.

При цьому результати попереднього етапу розглядаються як вихідні умови для наступного. Це дає можливість враховувати накопичення деформацій та зміну умов роботи основи протягом усього життєвого циклу трансформованої території.

Для практичного оцінювання геотехнічного ризику одним із найбільш інформативних показників є деформаційний стан системи. Основними параметрами можуть бути абсолютне осідання S, нерівномірність осідання Δs, крен і, горизонтальне переміщення $h_{гориз}$, швидкість розвитку деформацій $\frac{ds}{dt}$ та деформації прилеглого ґрунтового масиву.

Важливим показником є не лише абсолютна величина деформацій, а й їх просторовий градієнт, який характеризує нерівномірність деформування ґрунтового масиву та може бути безпосередньо пов'язаний із розвитком диференційованих осідань фундаментів $\frac{ds}{dx}$.

Для будівлі, яка отримує приблизно однакове вертикальне переміщення всіх фундаментів, наслідки можуть принципово відрізнятися від ситуації, коли окремі частини споруди переміщуються з різною швидкістю та величиною. Тому оцінювання геотехнічного ризику доцільно здійснювати не тільки за величиною максимального осідання $S_{\max}$, а й з урахуванням відносної нерівномірності деформацій: $\frac{\Delta s}{L}$, де L – характерна відстань між точками спостереження.

Такий підхід дозволяє враховувати не тільки абсолютний рівень деформацій, а й характер їх просторового розподілу.

Окремою складовою геотехнічного ризику є динамічні впливи. Умови воєнного часу можуть супроводжуватися повторюваними динамічними навантаженнями, які за характером відрізняються від звичайних експлуатаційних впливів.

У геотехнічному аспекті необхідно оцінювати не тільки безпосереднє сприйняття динамічного імпульсу конструкцією, а й можливу реакцію ґрунтового середовища. Динамічна дія може призводити до зміни контактних напружень, локальних переміщень, деградації жорсткості ґрунту, зміни напруженого стану, появи залишкових деформацій та зміни умов роботи фундаменту.

При цьому воєнні динамічні впливи не слід ототожнювати із сейсмічними, оскільки вони мають різну фізичну природу та характеристики. Водночас методологічні положення дослідження динамічної взаємодії «ґрунт–фундамент–споруда» можуть бути використані для побудови відповідних розрахункових моделей.

Особливої уваги потребують ситуації, коли нове будівництво здійснюється поруч із будівлями, які вже мають пошкодження або накопичені деформації. Влаштування котлованів, підпірних конструкцій, забивання або занурення паль, зміна рівня ґрунтових вод та прикладання нових навантажень можуть змінювати напружено-деформований стан ґрунтового масиву.

Для умов ущільненої міської забудови принципово важливим стає поняття зони геотехнічного впливу. У межах цієї зони необхідно оцінювати зміни напружень, вертикальні та горизонтальні переміщення, зміни рівня ґрунтових вод, додаткові деформації фундаментів та можливі зміни технічного стану існуючих будівель.

Послідовність виконання будівельних робіт також має розглядатися як складова розрахункової ситуації. Зміна геометрії котловану, поетапне встановлення або демонтаж конструкцій, зміна рівня ґрунтових вод та прикладання навантажень можуть формувати різні проміжні стани ґрунтового масиву. Тому оцінювання впливу нового будівництва доцільно виконувати з урахуванням технологічної послідовності робіт.

Для міських територій, розташованих на схилах, геотехнічний ризик може бути пов'язаний не тільки з осіданнями, але й зі зміною загальної стійкості ґрунтового масиву.

Воєнні та техногенні фактори можуть змінювати геометрію схилу, рівень ґрунтових вод, навантаження на бровку, властивості ґрунтів та умови дренування. Внаслідок цього може змінюватися коефіцієнт стійкості схилу.

Для аналізу таких задач доцільним є поєднання традиційних методів оцінювання стійкості та числового моделювання. Для територій, на яких планується відновлення або нове будівництво, необхідно оцінювати не тільки локальну стійкість фундаменту, але й загальну стійкість ґрунтового масиву.

На основі проведеного аналізу запропоновано розглядати геотехнічний ризик як результат взаємодії чотирьох складових:

$$R_g = f(H, G, V, C), \tag{3}$$

де H – небезпечний геотехнічний процес; G – характеристики ґрунтового середовища; V – вразливість споруди; C – потенційні наслідки.

У спрощеному практичному підході кожна складова може оцінюватися за трирівневою шкалою: низький, середній та високий ризик. При цьому таке ранжування не повинно замінювати числовий розрахунок. Його доцільно використовувати на попередньому етапі для визначення необхідної глибини інженерних досліджень та складності подальшої розрахункової моделі.

Запропоноване ранжування територій з урахуванням основних геотехнічних факторів і стійкості споруд наведено в табл. 1.

Таким чином, запропонована модель дозволяє перейти від оцінювання окремого геотехнічного фактору до комплексного врахування небезпечного процесу, характеристик ґрунтового середовища, вразливості споруди та потенційних наслідків.

Далі запропоновано алгоритм оцінювання геотехнічного ризику. На основі запропонованої моделі сформовано послідовність оцінювання геотехнічного ризику для територій, що зазнали воєнного або іншого значного техногенного впливу.

Першим етапом є збір та аналіз інформації про попередній стан території: матеріалів інженерних вишукувань, проєктної документації, даних про існуючу забудову, інженерні мережі та попередні деформації.

Таблиця 1

Ранжування територій з урахуванням геотехнічних факторів і стійкості споруд

Геотехнічний фактор	Інтенсивність	Вразливість об'єкта	Ризик
Нерівномірне осідання	висока	висока	високий
Локальне замочування	середня	висока	високий
Горизонтальне переміщення ґрунту	середня	середня	середній
Неоднорідність техногенних ґрунтів	висока	середня	високий
Зміна рівня ґрунтових вод	низька	середня	низький/середній
Динамічний вплив	висока	висока	високий

Другий етап передбачає встановлення факторів трансформації території, зокрема пошкоджень і руйнувань будівель, порушень інженерних мереж, зміни водного режиму, демонтажу конструкцій та формування техногенно неоднорідних ґрунтів.

На третьому етапі виконується актуалізація інженерно-геологічної та геотехнічної моделі території з урахуванням встановлених змін.

Четвертий етап полягає у визначенні потенційно небезпечних геотехнічних процесів та оцінюванні вразливості існуючих або запроєктованих споруд.

На п'ятому етапі визначаються необхідні розрахункові ситуації та виконується числове моделювання зміни напружено-деформованого стану системи «ґрунт–фундамент–споруда».

Шостий етап передбачає комплексне ранжування геотехнічного ризику та визначення необхідних заходів щодо додаткових досліджень, моніторингу або коригування проєктних рішень.

Схематично запропонований алгоритм наведено на рис. 1.

Ключовою особливістю алгоритму є наявність зворотного зв'язку між моніторингом і розрахунковою моделлю. Це відповідає сучасній концепції геотехнічного проєктування, у якій результати спостережень під час виконання робіт і експлуатації можуть використовуватися для уточнення прогнозу поведінки системи [3]. У рекомендаціях JRC щодо другого покоління Eurocode 7 окремо підкреслюється необхідність врахування стадії виконання та періоду експлуатації геотехнічної споруди [3].

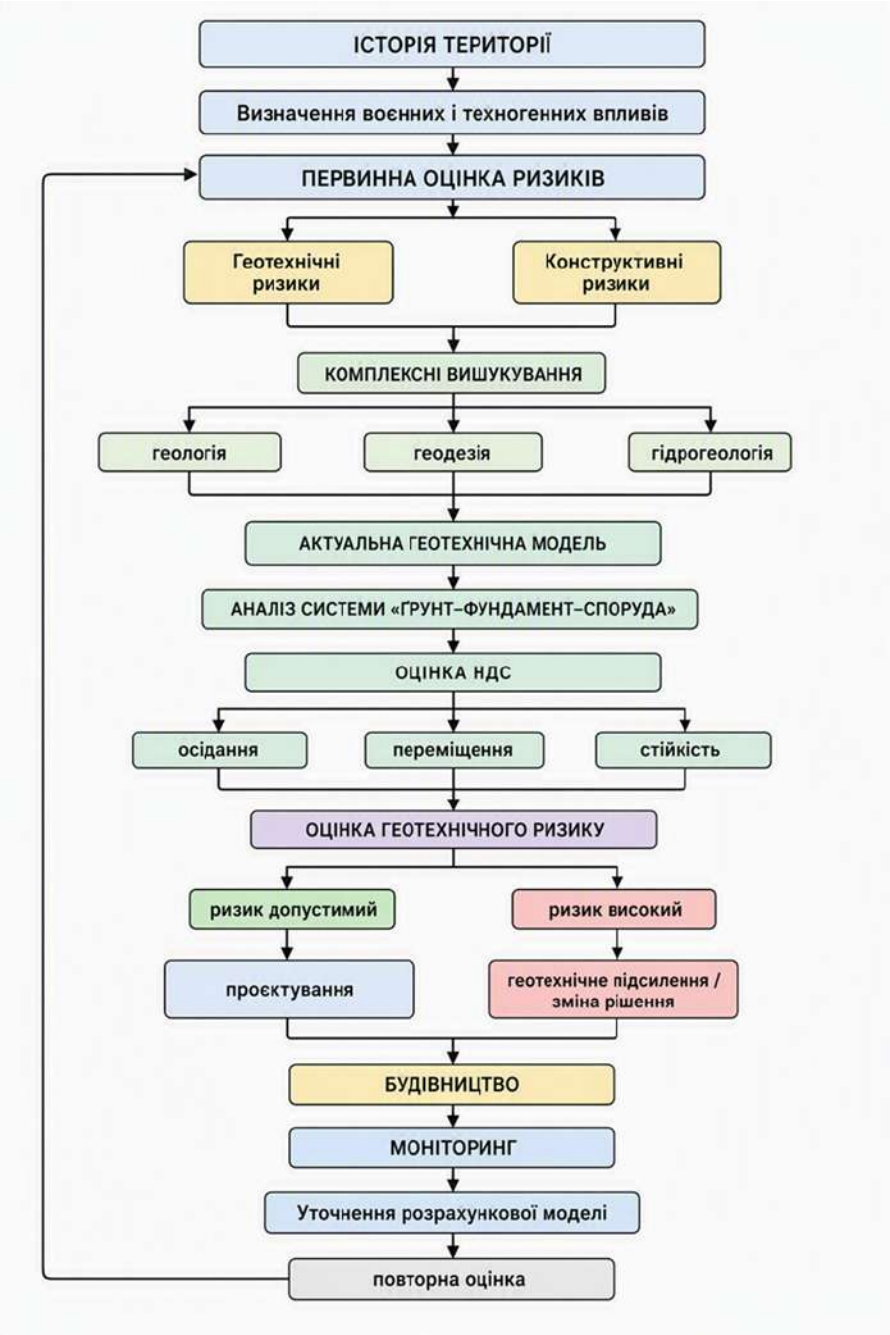


Рис. 1. Алгоритм комплексного оцінювання геотехнічного ризику міської території

Завершальним елементом методології є моніторинг. Для територій зі встановленими геотехнічними ризиками доцільним є контроль розвитку деформацій, горизонтальних переміщень, кренів, рівня ґрунтових вод та інших параметрів, визначених за результатами попереднього оцінювання.

Моніторинг як складова управління геотехнічним ризиком. Для територій із підвищеним рівнем невизначеності моніторинг повинен розглядатися не як допоміжна процедура, а як складова системи управління геотехнічним ризиком. До основних контрольованих параметрів можуть належати: вертикальні переміщення, горизонтальні переміщення, крени, розкриття тріщин, деформації

фундаментів, рівень ґрунтових вод; деформації підпірних конструкцій; переміщення поверхні території. Особливо перспективним є поєднання геотехнічного та геодезичного моніторингу.

У разі виявлення тенденції до прискорення деформацій або зміни інших контрольованих параметрів результати моніторингу мають використовуватися для уточнення розрахункової моделі та повторного оцінювання геотехнічного ризику.

У дослідженні 2025 року, присвяченому воєнно пошкодженій багатоповерховій будівлі в Києві, запропоновано методику деформаційного та геодезичного моніторингу із використанням сучасних інструментальних методів. Дослідження проводилося протягом п'ятирічного періоду на майданчику в умовах щільної міської забудови [14].Отримані підходи можуть бути інтегровані в систему контролю геотехнічного стану території.

Це дозволяє визначити: коли виникають критичні деформації, який фактор є домінуючим, наскільки чутливою є система до зміни властивостей ґрунту, як змінюється зона пластичних деформацій, який тип фундаменту забезпечує менші деформації, як змінюється вплив на сусідню забудову. Подібний підхід відповідає сучасному розвитку геотехнічного аналізу, де все більшого значення набувають числові моделі та ймовірнісне оцінювання невизначеності параметрів ґрунтів [15, 16].

Таким чином, запропонована методологія передбачає не одноразове визначення геотехнічного стану території, а послідовний цикл, який складається з дослідження, моделювання, оцінювання, моніторингу, уточнення моделі, що відповідає характеру трансформованого міського середовища.

Така схема може бути реалізована у програмних комплексах числового моделювання методом скінченних елементів. У цьому випадку предметом дослідження стає не тільки кінцеве переміщення, а траєкторія зміни НДС.

Розроблений підхід створює основу для проведення подальших досліджень за такими напрямами:

1. Числове моделювання трансформації НДС ґрунтового масиву на різних етапах воєнного та техногенного впливу.

2. Дослідження впливу зміни фізико-механічних характеристик ґрунтів на осідання та нерівномірні деформації фундаментів.

3. Оцінювання впливу динамічних навантажень на систему «ґрунт–фундамент–споруда».

4. Моделювання взаємодії нової та існуючої забудови з урахуванням різного технічного стану будівель.

5. Дослідження зсувонебезпечних територій, на яких воєнні або техногенні фактори можуть змінювати умови стійкості.

6. Розроблення цифрової геотехнічної моделі території, яка може оновлюватися за результатами моніторингу.

7. Формування кількісної системи оцінювання геотехнічного ризику, яка поєднуватиме ймовірність виникнення небезпечного процесу, величину деформацій і наслідки для об'єкта.

Таким чином, воєнний вплив на міську територію доцільно розглядати не лише як безпосереднє навантаження на будівлі та споруди, а як фактор трансформації геотехнічних умов майданчика. Зміна напружено-деформованого стану ґрунтового масиву може супроводжуватися розвитком вертикальних і горизонтальних переміщень, нерівномірних деформацій, локальних зон втрати стійкості та зміною умов роботи фундаментів. Узагальнену схему взаємозв'язку цих процесів наведено на рис. 2.

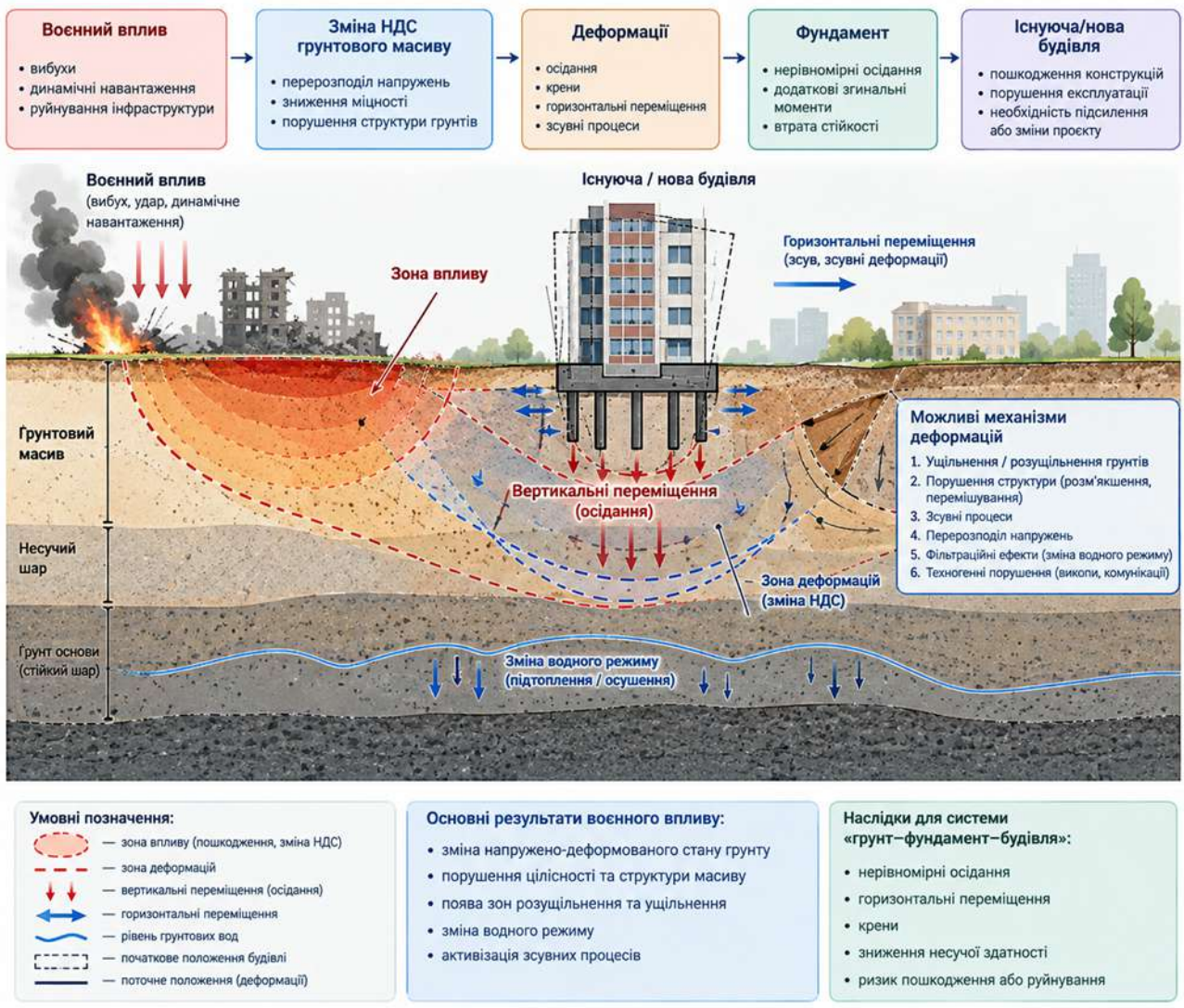


Рис. 2. Концептуальна геомеханічна схема впливу наслідків бойових дій на зміну НДС ґрунтового масиву, деформацію фундаментних конструкцій та самої існуючої/нової будівлі

Окремим перспективним напрямом є поєднання геотехнічного моніторингу з цифровими моделями будівель. Сучасні дослідження вже демонструють можливість використання BIM та цифрових моделей для оцінювання пошкоджених будівель і прийняття рішень щодо їх стабілізації та подальшого відновлення [17].

Висновки. Обґрунтовано необхідність розглядати геотехнічний стан міської території в умовах воєнних впливів як змінну систему, характеристики якої

формуються послідовною взаємодією природних, техногенних і пов'язаних із пошкодженням території факторів. Встановлено, що оцінювання ризику має враховувати не лише технічний стан споруд, а й трансформацію ґрунтового масиву, гідрогеологічних умов та напружено-деформованого стану основ.

Сформовано методологічний підхід до оцінювання геотехнічного ризику, який передбачає врахування послідовної трансформації території від її початкового стану через вплив воєнних факторів, зміни інженерно-геологічних і гідрогеологічних умов, демонтаж та підготовку території до нового будівництва. Такий підхід дає змогу враховувати історію зміни геотехнічного стану території під час формування розрахункової моделі та визначення розрахункових ситуацій.

Визначено основні показники, за якими доцільно оцінювати геотехнічний ризик: абсолютні та диференційні осідання, крен, горизонтальні переміщення, швидкість розвитку деформацій, зміни напружено-деформованого стану ґрунтового масиву, стійкість схилів та вплив будівельних робіт на прилеглу забудову. Особливого значення набуває оцінювання просторової нерівномірності деформацій, оскільки саме диференційні переміщення можуть визначати рівень впливу на існуючі споруди.

Запропоновано комплексну модель оцінювання геотехнічного ризику, що враховує небезпечний геотехнічний процес, характеристики ґрунтового середовища, вразливість споруди та потенційні наслідки. Результатом оцінювання є визначення рівня ризику та обґрунтування необхідної глибини інженерно-геологічних досліджень, складності розрахункової моделі й обсягу подальшого геотехнічного моніторингу.

Встановлено, що для територій, які зазнали воєнних і техногенних впливів, оцінювання геотехнічного ризику доцільно здійснювати циклічно, поєднуючи результати інженерних досліджень, чисельного моделювання, оцінювання ризику та геотехнічного моніторингу. Отримані результати моніторингу мають використовуватися для уточнення розрахункової моделі та повторного оцінювання геотехнічного стану території. Такий підхід забезпечує можливість врахування фактичної зміни стану ґрунтового масиву, гідрогеологічних умов і прилеглої забудови під час планування та проєктування відновлення міських територій.

Перелік посилань

1. World Bank, Government of Ukraine, European Commission, United Nations. Ukraine – *Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4)*: February 2022 – December 2024. Washington, DC: World Bank, (2025). https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099022025114040022
2. Khrapatova, I., Strizhelchik, G., Shokarev, V., Liapin, O., & Bondarenko, O. (2025). Geotechnical risks in the reconstruction of buildings and structures affected by explosions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1499*(1), 12019. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012019
3. Bogusz, W., Caplane, C., Hard, D. (Ed.) et al. (2024). *Implementation of Design during Execution & Service Life*: Guidelines for the application of the second generation of Eurocode 7: Geotechnical design. Luxembourg: Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/8383117

4. Estaire, J., Muralha, J., Segalini, A., Johansson, E., Nuijten, G., & Heintz, R. (2023). Rock engineering design in tomorrow's geotechnical toolbox: Eurocode 7 – Ground properties (EN 1997-2:2024). *Geomechanics and Tunnelling, 16*(5), 510–523. Portico. https://doi.org/10.1002/geot.202300023
5. Литвин О. (2024). Оцінка взаємодії будівлі з основою методом скінченних елементів із використанням даних компресійних випробувань ґрунтів. *Основи і фундаменти, 49*, 69–76. https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.69-76
6. Lei, Z., Wu, B., Wu, S., Nie, Y., Cheng, S., & Zhang, C. (2022). A material point-finite element (MPM-FEM) model for simulating three-dimensional soil-structure interactions with the hybrid contact method. *Computers and Geotechnics, 152*, 105009 https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105009
7. Xiong, H., Qiu, Y., Shi, X., Wang, X., & Chen, X. (2024). Arching development above active trapdoor: insight from multi-scale analysis using FEM–SPH. *Acta Geotechnica* https://doi.org/10.1007/s11440-023-02148-0
8. Xu, J., Yu, Z., Li, Y., & Ni, J. (2026). Effects of foundation types on structural response to tunnelling in sand: a numerical investigation. *Computers and Geotechnics, 190*, 107723. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107723
9. Patrício, J. D., Gusmão, A. D., Ferreira, S. R. M., Silva, F. A. N., Kafshgarkolaei, H. J., Azevedo, A. C., & Delgado, J. M. P. Q. (2024). Settlement Analysis of Concrete-Walled Buildings Using Soil–Structure Interactions and Finite Element Modeling. *Buildings, 14*(3), 746. https://doi.org/10.3390/buildings14030746
10. Freisinger, J., Radišić, M., Taddei, F., & Müller, G. (2022). Dynamic response of three-dimensional rigid and flexible foundations on layered soils with local inhomogeneities. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 153*, 107007. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.107007
11. Ручківський В. (2024). Дослідження впливу нового будівництва на напружено-деформований стан ґрунтової основи фундаментів існуючої забудови. *Основи і фундаменти, 49*, 62–68. https://doi.org/10.32347/0475-1132.49.2024.62-68
12. Mohamed G. I. Shaaban, Mamdouh A. Kenawi, Abdel-Aziz A. Senoon & Mostafa A. Abd El-Naiem. (2023). Effects of excavation and construction sequence on behavior of existing pile groups. *Innovative Infrastructure Solutions, 8*, Article 223. https://doi.org/10.1007/s41062-023-01193-8
13. Bahuguna, A., & Firoj, M. (2022). Numerical simulation of seismic response of Slope–Foundation–Structure interaction for mid–rise RC buildings at various locations. *Structures, 44*, 343–356. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.011
14. Berchun, Y., & Kaliukh, I. (2025). Application of geodetic methods to refine boundary conditions in digital twins of war-damaged multi-story buildings. *EUREKA: Physics and Engineering*. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003951
15. Bozkurt, S., & Akbas, S.O. (2023). Finite element-based geotechnical risk analysis for anchor-supported deep excavations. *Arabian Journal of Geosciences, 16*, Article 470. https://doi.org/10.1007/s12517-023-11463-5
16. Amendola, C., & Pitilakis, D. (2022). Urban scale risk assessment including SSI and site amplification. *Bulletin of Earthquake Engineering, 21*(4), 1821–1846. https://doi.org/10.1007/s10518-022-01575-w
17. Hryhorovskyi, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., & Hryhorovskyi, A. (2022). A BIM-Based Method for Structural Stability Assessment and Emergency Repairs of Large-Panel Buildings Damaged by Military Actions and Explosions: Evidence from Ukraine. *Buildings, 12*(11), 1817. https://doi.org/10.3390/buildings12111817

ABSTRACT

Purpose. Development of a scientific and methodological approach to the comprehensive assessment of geotechnical risks in urban development areas affected by military and related technogenic impacts, taking into account the transformation of the soil mass condition and the interaction within the “soil mass–foundation–structure” system.

The methods. Systematic and comparative analyses of current approaches to geotechnical risk assessment, soil–foundation–structure interaction, and changes in the state of the soil mass under military and anthropogenic impacts were performed. Structural-logical and conceptual modelling of the sequential transformation of territorial conditions, expert ranking of risk factors, and development of an algorithm for their integrated assessment were applied, incorporating site investigations, stress-strain state analysis, and geotechnical monitoring.

Findings. A geotechnical risk assessment algorithm was developed that integrates analysis of the territory's transformation history, comprehensive site investigations, development of an updated geotechnical model, stress-strain state assessment, identification of potential instability mechanisms, evaluation of impacts on existing structures, and selection of engineering mitigation measures. Future research should focus on numerical modelling of the sequential transformation of the soil mass under military and technogenic impacts.

The originality. A correlation was established between ground conditions, structural vulnerability, the intensity of hazardous processes, and the level of geotechnical risk. Based on this relationship, an integrated risk assessment model and an implementation algorithm incorporating feedback between monitoring data and the computational geotechnical model were developed.

Practical implementation. The proposed approach can be applied to geotechnical site investigations, reconstruction projects, and new construction in areas affected by military impacts. Its application enables the identification of the most critical geotechnical hazards, justification of additional site investigation requirements, selection of appropriate computational models and monitoring parameters, and supports engineering decision-making for urban recovery and the improvement of building and infrastructure safety.

Keywords: *geotechnical risk; urban development; military impact; soil mass; stress-strain state; settlement; deformation; stability; soil-foundation-structure interaction; numerical modeling; geotechnical monitoring.*

дата першого надходження статті до видання	14.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	18.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. O. Shashenko, V. Shapoval, N. Khoziaikina, K. Zhabchyk
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.