

УДК 519.876.2

Геннадій Іванович Гайко,

д. т. н., професор, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03056, Україна,
e-mail: gayko.kpi@meta.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7471-3431>;

Іван Олександрович Матвійчук,

аспірант, НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
e-mail: matveychuk593@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-3262-8762>;

Володимир Стефанович Білецький,

д. т. н., професор НТУ «Харківський політехнічний інститут»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна,
e-mail: biletsk@i.ua, <http://orcid.org/0000-0003-2936-9680>;

Пьотр Салуґа,

д. т. н., професор кафедри управління в енергетиці,
Краківська гірничо-металургійна академія ім. С. Сташці,
ал. А. Міцкевича, 30, м. Краків, 30-059, Польща,
e-mail: psaluga@zarz.agh.edu.pl, Scopus (author ID): 6506800622

МЕТОДИ ПРОГНОЗНОЇ ОЦІНКИ СПРИЯТЛИВОСТІ ГЕОЛОГІЧНОГО СЕРЕДОВИЩА БУДІВНИЦТВУ ОБ'ЄКТІВ ПІДЗЕМНОЇ УРБАНІСТИКИ

Стисло окреслено перспективи освоєння підземного простору мегаполісів. Проаналізовано природничо-технічну систему «геоурбаністика – геологічне середовище». Представлено методіку типізації геологічного середовища і градацію його сприятливості освоєнню підземного простору. Наведено результати типізації та для ділянки в Шевченківському районі Києва. Візуалізовано тематичні карти для окремих факторів впливу. Розкрито особливості методу морфологічного аналізу для оцінки ризиків розвитку підземної урбаністики, показані його можливості для прогнозу оцінки сприятливості ділянок для геобудівництва. Представлена морфологічна таблиця загальної характеристики та ризиків освоєння підземного простору. Надано аналіз визначених груп факторів. Означено методичні аспекти застосування методу Монте-Карло в геомеханіці. Доведена можливість доповнення поширеного в проектуванні інженерних об'єктів методу скінчених елементів та різних програмних комплексів його реалізації програмним інструментарієм методу Монте-Карло, зокрема в оцінці змінності властивостей геологічного середовища.

Ключові слова: геологічне середовище, геоурбаністика, підземний простір, системний підхід, прогнозна оцінка, метод типізації, морфологічний аналіз, морфологічні таблиці, геомеханічні ризики, метод Монте-Карло.

Г. І. Гайко, І. А. Матвійчук, В. С. Білецький, П. Салуґа. МЕТОДЫ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ БЛАГОПРИЯТСТВОВАНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ СТРОИТЕЛЬСТВУ ОБЪЕКТОВ ПОДЗЕМНОЙ УРБАНИСТИКИ. Кратко намечены перспективы освоения подземного пространства мегаполисов. Проанализирована природно-техническая система «геоурбаністика - геологическая среда». Представлена методика типизации геологической среды и градация ее благоприятности освоению подземного пространства. Приведены результаты типизации геологической среды для участка в Шевченковском районе Киева. Визуализированы тематические карты для отдельных факторов влияния. Раскрыты особенности метода морфологического анализа для оценки рисков развития подземной урбанистики, показаны его возможности для прогнозной оценки благоприятности участков для геостроительства. Представлена морфологическая таблица общей характеристики и рисков освоения подземного пространства. Дан анализ выделенных групп факторов. Отмечены методические аспекты применения метода Монте-Карло в геомеханике. Показана возможность дополнения распространенного в проектировании инженерных объектов метода конечных элементов и различных программных комплексов его реализации программным инструментарием метода Монте-Карло, в частности в оценке изменчивости свойств геологической среды.

Ключевые слова: геологическая среда, геоурбаністика, подземное пространство, системный подход, прогнозная оценка, метод типизации, морфологический анализ, морфологические таблицы, геомеханические риски, метод Монте-Карло.

Постановка проблеми. Зростання великих міст є проявом сталих історичних закономірностей і веде не тільки до збільшення їх розмірів, але й до суттєвого ускладнення функціонально-просторової організації. Вирішення низки гострих проблем, пов'язаних з інтенсивним зростанням мегаполісів в останні десятиріччя, може бути розв'язане шляхом будівельного освоєння міського підземного простору. Інструментами управління розвитку міст слугують генеральні плани, плани капітального будівництва, комплексні схеми транспорту, програми соціально-економічного розвитку, а також майстер-плани розвитку підзе-

мної урбаністики, які характеризуються стратегічним баченням довгострокової перспективи освоєння георесурсів міста. Проте, велика складність, різноманітність, нестабільність, часом невизначений (або випадковий) характер взаємодій між геологічним середовищем, у якому розміщуються наземні та підземні будівельні об'єкти, техногенними впливами та структурно-функціональними факторами життєдіяльності міста суттєво ускладнюють існуючі плани, потребують їх вдосконалення із застосуванням системного підходу. Останній може стати базовою науковою методологією для вирішення територі-

альних, транспортних, енергетичних, екологічних та інших міських проблем при мінімальних техніко-економічних ризиках та раціональному використанні георесурсів. Масштабне підземне будівництво, заплановане в середньостроковій перспективі в Києві, Харкові, Дніпрі, Одесі, Львові потребує прогностичної оцінки геологічного середовища територій цих міст для прийняття рішень щодо можливості та економічної доцільності будівництва підземних комплексів. Тому обґрунтування й аналіз можливостей наукових методів оцінки сприятливості геологічного середовища розвитку підземної урбаністики бачиться вельми актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільш доцільною для планування сучасних мегаполісів авторам бачиться комплексна природничо-технічна система «геоурбаністика – геологічне середовище», яка охоплює всю складність і різноманітність взаємин технічних і природних чинників розвитку геоурбаністики мегаполісу [1–4]. Важливою складовою виділеної системи виступає геологічне середовище, яке є багатокомпонентною, дискретною, динамічною природною системою, різноманітно та енергійно взаємодіючою зі спорудами. Вона складається з системи геологічних тіл різних рівнів, різного складу, тектонічної порушеності, обводненості, які поділяються на формації, субформації, стратиграфолітологічні комплекси, петрографічні типи (пачки, товщі) та моноприродні системи. У загальному визначенні, геологічне середовище охоплює частину простору, зайнятого геологічними тілами, які зверху обмежуються денною поверхнею, а знизу – поверхнею, що відділяє породи змінні за будь-яким параметром складу, фізико-механічних, хімічних та інших властивостей в результаті прямих і опосередкованих впливів діяльності людини від таких, що не зазнали цих змін [5–7].

Характерною рисою геологічного середовища мегаполісу є те, що у цьому просторі природні геологічні утворення частково замінені наземними та підземними спорудами й антропогенними накопиченнями. Інженерно-геологічні процеси, які тут перебігають, підпорядковуються як природним так і техногенним чинникам. Геологічне середовище урбанізованої території зростає шляхом заглиблення інженерних споруд і утворення підземних комплексів, що характеризується переміщенням ґрунтових мас та створенням нових геологічних умов. Активне використання підземного простору впливає на гірські породи (ґрунти), які слугують їхньою основою. У результаті формується область взаємодії наземних і підземних споруд та гірських порід (ґрунтів), у

межах якої відбуваються зміни стану й властивостей порід та гідрогеологічних умов [8].

Для оцінки сприятливості геологічного середовища урбанізованих територій до будівництва комплексів підземних споруд доцільно розробити методику його типізації й районування, яка на відміну від існуючих [6, 7] розглядала б змінність властивостей не тільки поверхневого шару на виділеній території (що є нагальною потребою для планування наземного будівництва), а й усієї товщі геологічного середовища. Важливим є врахування техногенних впливів [9], причому серед великого їх розмаїття (рис. 1) необхідно обрати найбільш впливові фактори на геологічне середовище та міські підземні споруди.

Застосування системного підходу знаходило різноманітні реалізації для планування поверхневої забудови великих міст [10], проте для підземної урбаністики не йшло далі загальної постановки завдань і аналізу методів досліджень [2, 11]. Перспективним для оцінки ризиків і ступеню придатності міських територій для освоєння підземного простору є застосування методу морфологічного аналізу (ММА), який дозволяє оцінити ступінь (імовірність) і рівень ризику, тобто економічні втрати від реалізації несприятливих сценаріїв [12, 13].

Перспективним є також застосування методу Монте-Карло, який доповнює прийняті комп'ютерні моделі для більш точної оцінки імовірнісної природи факторів впливу геологічного середовища при типізації міських територій для підземного будівництва [14–17]. Важливим є поєднання цього методу з проектним інструментарієм для уточнення конструктивних параметрів підземних споруд.

Мета статті полягає у розкритті нових можливостей застосування методів типізації, системного аналізу та імовірнісних методів для оцінки сприятливості геологічного середовища розвитку підземної урбаністики.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Типізація геологічного середовища.

Для оцінки сприятливості геологічного середовища урбанізованих територій до будівництва комплексів підземних споруд розроблена нова методика типізації, зорієнтована на освоєння підземного простору [18]. Зокрема, виділені природні чинники: геологічна будова (вік гірських порід, їх походження, склад, будова, походження і закономірності просторового розміщення осадів, тектонічні порушення форми первинного залягання гірських порід); морфологію рельєфу (обриси, розміри, будова елементів рельєфу); характеристика ґрунтів та гірських порід (зокрема, їх мінералогічний та петрографічний склад); фізичні властивості гірських порід, зокрема, механічні

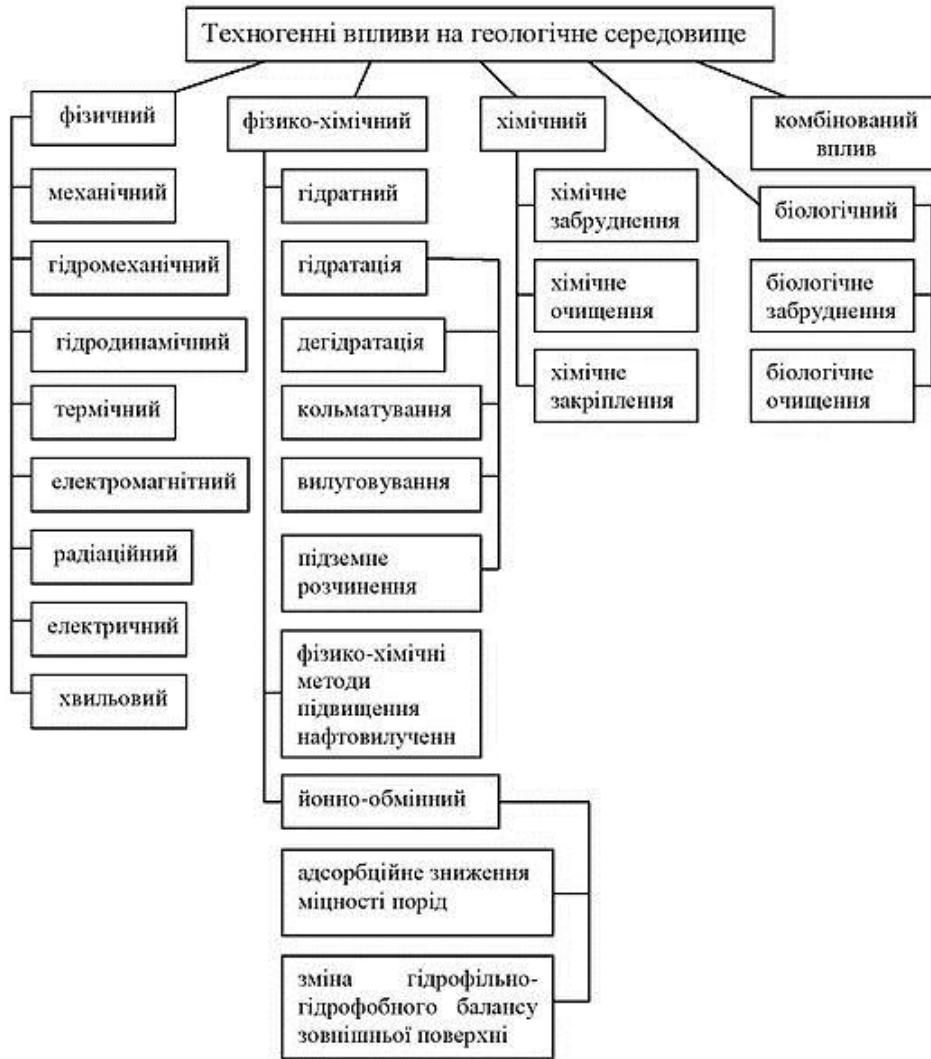


Рис. 1. Класифікація техногенних впливів на геологічне середовище

характеристики та гідрофільно-гідрофобний баланс поверхні, водонисиченість, водопоглинання; порушеність масиву (тріщинуватість, пористість); геодинамічна (тектонічна) обстановка; гідродинамічні умови (визначаються глибинними і поверхневими гідрогеологічними факторами живлення). У розробленій класифікації техногенних впливів на геологічне середовище виділені найбільш значимі: статичне навантаження (що визначається щільністю забудови і поверховістю споруд); динамічні впливи (визначаються характеристикою транспорту, промисловими впливами, наявністю підричних робіт); фактор підземних споруд і їх характеристики (зокрема, конструкція, просторові розміри); фактор геобудівельних робіт; наявність і масштаб гідротехнічних (наприклад, дамби, греблі) і теплотехнічних споруд (ТЕС, ДРЕС) споруд; наявність і характеристики техногенних родовищ, сховищ вторинних ресурсів (терикони, відвали, хвостосховища, шламонакопичувачі).

Розроблена класифікація обумовлює можливість системного моніторингу еволюції геологічного середовища в межах міста, урбанізованих районів. Зокрема, виділяють зони, що характерні відмінними умовами протікання геологічних процесів, умовами розвитку техногенезу. Простежується специфіка взаємодії природних та техногенних факторів впливу на геологічне середовище. Виділення цих зон здійснюється за сумою балів, якими оцінюють вказані чинники впливу. Така методика є універсальною, так як поєднує вплив природних і техногенних факторів на геологічне середовище з метою оцінки сприятливості їх підземному будівництву. Зупинимося на застосуванні запропонованої методики.

Показники основних факторів будемо оцінювати у балах (рейтингом) від 1 до 4 (чим кращі умови, тим менший бал) у відповідності до якісних станів геологічного середовища: 4 бали – геологічне середовище несприятливе для підземного будівництва (на більшій частині траси чи місця розташування споруди спостерігаються

загрозливі впливи природничих і техногенних факторів, або саме будівництво загрожує важливим об'єктам на поверхні чи провокує небезпечні геологічні процеси); 3 бали – недостатньо сприятливе (частина підземної виробки потрапляє на небезпечну ділянку, що потребує спеціальних способів її спорудження й додаткових витрат); 2 бали – сприятливе (відсутні найбільш загрозливі впливи й небезпечні явища, а рівень будівельних і експлуатаційних витрат наближений до середнього значення); 1 бал – вельми сприятливе (значна швидкість і економічність проведення виробки, мінімальні витрати на кріплення й підтримання споруди).

З виділених якісних станів тільки перший виключає доцільність підземного будівництва й потребує «обходу» несприятливої ділянки з боків чи з глибини або значних матеріальних витрат на покращення умов будівництва, технічну і економічну доцільність яких треба обраховувати окремо. Усі інші передбачають можливість освоєння підземного простору на розглянутій території, але з різними економічними показниками будівництва й різними ризиками щодо проектних помилок першого й другого роду. Введений вперше для подібних досліджень стан найбільшої сприятливості (бал дорівнює одиниці) дозволить запобігти проектним помилкам першого роду, коли

сприятливі умови помилково вважають несприятливими, що веде до невиправданого збільшення матеріаломісткості кріплення, закладає більш потужні та енергоємні прохідницькі засоби ніж потрібно. При типовому прогностичному оперуванні лише двома, або навіть трьома станами запобігти помилці першого роду вдавалося не завжди.

Там, де є можливість кількісної оцінки фактора впливу (наприклад, фактор механічної міцності порід або щільності забудови), загальні межі можливої зміни кількісних характеристик параметра розбиваються на діапазони у відповідності до виділених станів, яким присвоюється відповідний бал. При цьому доцільно використовувати існуючі стандарти, нормативні документи, класифікації станів породних масивів та ін. Там де відсутня можливість кількісної характеристики фактора, декларується відсутність або прояв наявності його впливу, а рішення щодо сприятливості тієї чи іншої альтернативи визначається шляхом експертної оцінки.

Чим більшу кількість факторів впливу вдається розглянути, тим більш обґрунтовану оцінку потенціалу інженерно-геологічного освоєння підземного простору буде отримано. Сумарні діапазони балів, наведені у таблиці 1, характеризують той чи інший стан сприятливості з урахуванням кількості факторів.

Таблиця 1

Градація сприятливості геологічного середовища освоєнню підземного простору за сумарним значенням балів факторів

Тип геологічного середовища	I_{sum}^*	Позначка у банку даних, Type_GS
вельми сприятливе	$\leq 1,5n^{**}$	1
сприятливе	$1,5n < I_{sum} \leq 2,5n$	2
недостатньо сприятливе	$2,5n \leq I_{sum} < 3,5n$	3
несприятливе середовище	$\geq 3,5n$	4

* I_{sum} – сумарна кількість балів за всіма факторами;

** n – кількість розглянутих факторів впливу.

При проведенні типізації та візуалізації його результатів використовувався геоінформаційний підхід, який передбачав створення у геоінформаційній системі банку даних природних та техногенних факторів. Виходячи з того, що фактографічна геологічна інформація нерозривно пов'язана з просторовим положенням того чи іншого геологічного об'єкту, банк даних заснований на декількох базових модулях, один з яких – географічна інформаційна система (ГІС) на базі програмного продукту MapInfo, Excel та база даних науково-технічної інформації. В MapInfo для зберігання й подання географічних даних (векторних і растрових) використовується об'єктно-реляційна модель даних, названа базою геоданих (БГД). Структура бази геоданих (набори класів об'єктів, класи просторових об'єктів, топологія й

інші елементи) дозволяє проектувати географічні бази даних. Для проектування БГД в MapInfo використовується мова програмування SQL, і, як візуальне середовище розробки, використовується Visual Basic, Power Builder, Delphi.

Практичне впровадження розробленої методики типізації геологічного середовища для організації підземних об'єктів мілкого закладання було апробовано на ділянці в центрі міста Києва, у Шевченківському районі поряд з Повітрофлотським шляхопроводом (рис. 2). Розміри ділянки у плані 2x2 км, крок сітки 100 м. Для кожного фактору з природного та техногенного блоку створювались тематичні шари. Для визначення типу геологічного середовища кожного з 400 квадратів ділянки (Type_GS) за визначеним діапазоном (див. табл. 1), з тематичних карт за допомогою

SQL-запитів «MapInfo» відбиралось значення балу та проводилось їх сумування (рис. 3). Аналіз даних таблиць і карт вказує, що на виділеній ділянці переважають умови сприятливі для пі

дземного будівництва (71,25 % від площі ділянки), або навіть вельми сприятливі в північній і північно-східній частині ділянки (28,75%), рис. 4.

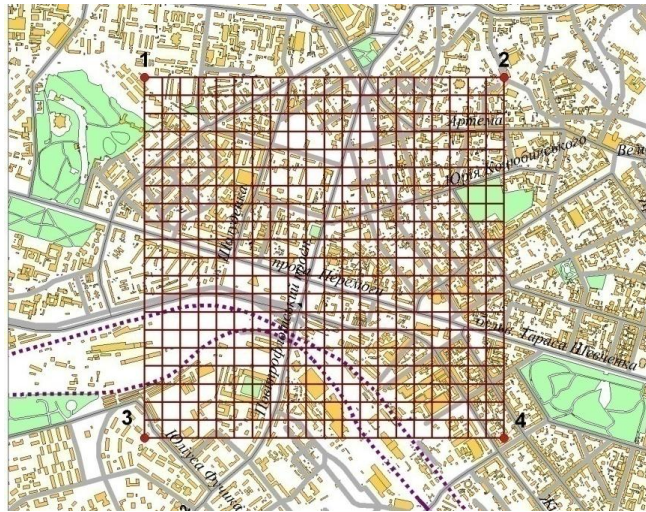


Рис. 2. Схема району досліджень

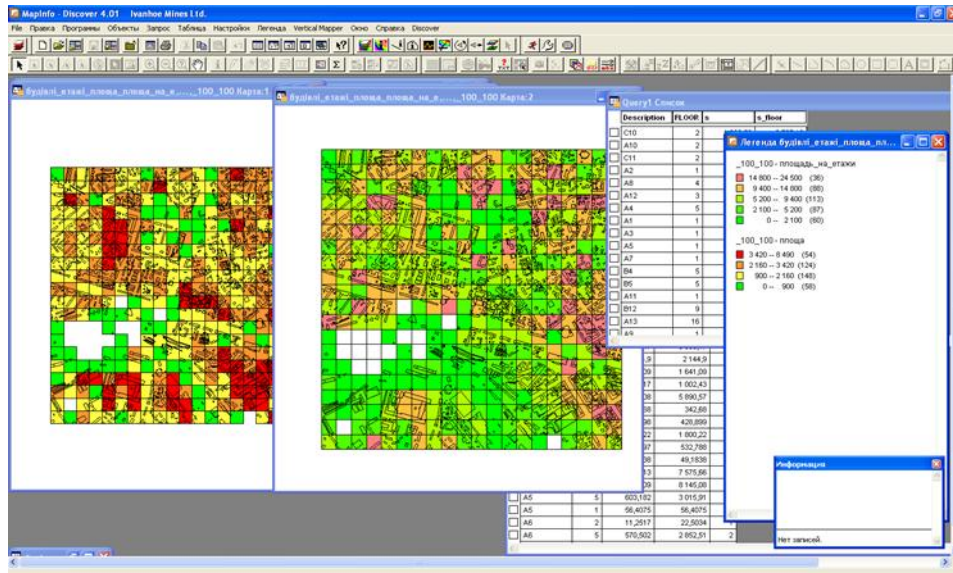


Рис. 3. Тематичні карти за факторами «щільність забудови» та «поверховість»

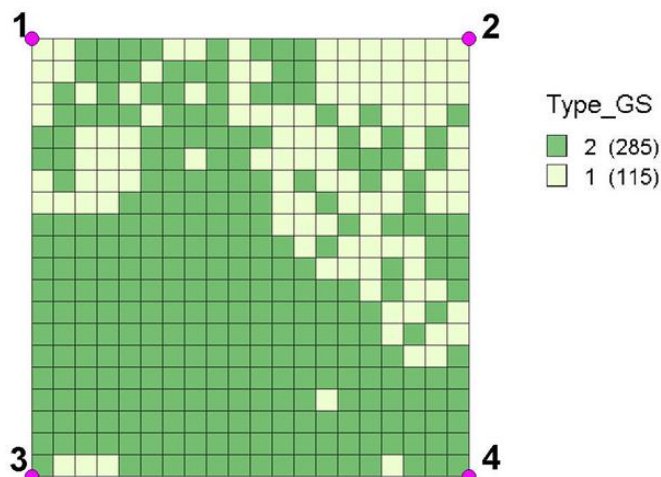


Рис. 4. Схема оцінки сприятливості геологічного середовища освоєнню підземного простору на виділеній ділянці м. Києва (1 – вельми сприятливе; 2 – сприятливе)

Високий рівень сприятливості підземному будівництву на розглянутій ділянці зумовлений здебільшого незначною щільністю забудови (середнє значення в межах ділянки 20,7%) та малою поверховістю забудови (середня кількість поверхів – 3), допустимим рівнем транспортних вібрацій (53-73 дБ), відсутністю техногенних накопичень на більшій частині виділеної ділянки. З іншого боку, в межах виділеної площі майже 90% складають ґрунти, оцінені за властивостями балом 3 (пухкі типи водонасичених відкладів русла Либіді) і лише 10% складено сприятливими для будівництва ґрунтами – глинами та пісками середньої щільності, причому алювіальні необхідні відклади представлені різнозернистими пісками.

Слід зауважити, що техніко-економічні ризики від впливу різних факторів можуть суттєво відрізнятися, що в перспективі повинно бути враховано відповідними ваговими коефіцієнтами, прийнятими шляхом експертних оцінок. Зокрема, фактор «тип ґрунтових відкладів» повинен отримати більший вплив на загальну оцінку сприятливості підземному будівництву. Складністю застосування методу є також створення бази даних, яка потребує передусім детального дослідження властивостей ґрунтів виділеної ділянки на задану глибину освоєння підземного простору, що зазвичай можна отримати в разі фінансування проектних інженерно-геологічних пошукувань.

Морфологічний аналіз ризиків. Більшість управлінських рішень при освоєнні підземного простору приймається в умовах неповноти інформації про об'єкт управління та характер його взаємодії з іншими складовими системи. Тому існує небезпека не повного досягнення цілей освоєння підземного простору, або реалізації небажаних сценаріїв спорудження об'єктів геоурбаністики, наслідки яких призводять до значного збільшення будівельних витрат. Ризики підземного будівництва можна умовно поділити на геотехнічні, що враховують взаємодію підземних комплексів і геологічного середовища, а також операційні, інвестиційні, правові тощо. Ми зосередимося на найбільш значимих геотехнічних ризиках. Для визначення величини кожного з них (R_i) використовують базову формулу [19]:

$$R_i = P_i \times Y_i, \quad (1)$$

де P_i – імовірність виникнення несприятливої події (в нашому випадку це – неприпустимі зміщення порід і руйнівні деформації конструкцій, збільшення строків будівництва, активізація небезпечних інженерно-геологічних процесів тощо);

Y_i – математичне очікування втрат від несприятливої події.

Методологічною основою врахування ризиків може бути морфологічний аналіз запропонованої природничо-технічної системи «геоурбаністика – геологічне середовище», що дозволить визначити значимі комбінації факторів впливу та ймовірності реалізації несприятливих подій і відповідних економічних втрат за допомоги експертних оцінок. Метод морфологічного аналізу (ММА) на відміну від екстраполяційних методів, які за своєю суттю є продовженням попередніх тенденцій, враховує в задачах передбачення можливі якісні зміни нелінійного характеру. Ідея методу полягає в знаходженні найбільшої кількості, а гранично – й усіх можливих способів вирішення поставленої задачі комбінуванням основних структурних елементів систем або ознак рішень та оцінці найбільш сприятливих за обраним критерієм [2, 13]. За допомогою цього методу можна проводити ймовірнісний аналіз характеристик розвитку складних об'єктів, оцінювати альтернативи рішень, які доцільно приймати в умовах множини потенційних конфігурацій об'єкта. Цілями морфологічного аналізу та синтезу є:

- відбір критичних параметрів, які найбільш впливають на розв'язання поставленої задачі;
- системне дослідження всіх можливих варіантів розв'язання задачі, що впливають із задання, закономірностей побудови і суперечливих вимог до створення об'єкта;
- реалізація сукупності операцій пошуку на морфологічній множині варіантів описів об'єкта дослідження, що відповідають первісним вимогам.

Районування території мегаполісу за сприятливістю умов підземного будівництва дозволить вже на етапі планування розвитку геоурбаністики отримати кількісні оцінки ймовірностей, оцінити ризики й розглянути множини можливих рішень проектної задачі. ММА передбачає залучення для оцінювання експертів, які можуть приймати рішення, базуючись на досвіді, інтуїції і відносно невеликій кількості наявної інформації про ділянку.

Побудова моделі в ММА має такі кроки:

- визначення об'єктів (сутностей), яким відповідатимуть морфологічні таблиці, та зв'язків між ними;
- побудова морфологічних таблиць (МТ) для кожного з об'єктів;
- оцінювання залежностей між параметрами морфологічних таблиць.

Морфологічний аналіз доцільно проводити за допомогою мережі з трьох морфологічних таблиць, пов'язаних між собою (рис. 5).

При цьому перша морфологічна таблиця відображає з максимальною об'єктивністю вплив

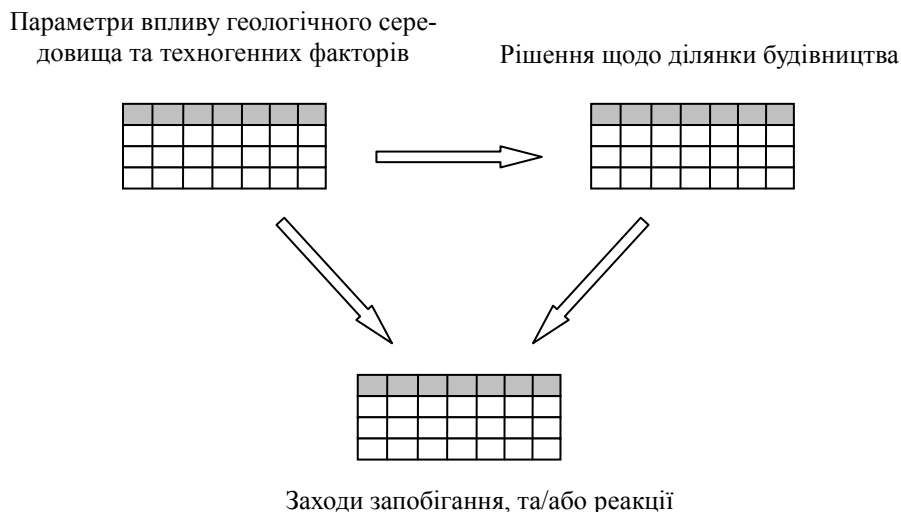


Рис. 5. Схема взаємозв'язку морфологічних таблиць

геологічного середовища і техногенних факторів на ризики підземного будівництва та експлуатації підземних споруд. Такими параметрами можуть бути: рівень динамічного навантаження; показник статичного навантаження від поверхневої забудови; показник статичного навантаження оточуючого ґрунтового масиву; вплив існуючих підземних об'єктів; генетичний тип та літологічний склад ґрунтів; розрахунковий опір ґрунту, вплив водоносних горизонтів і верховодки, тип рельєфу і морфометрія; інженерно-геологічні процеси; геобудівельні технології.

В другу МТ увійшли параметри рішення, яке доцільно приймати для ділянки, що розглядається. Усього обрано 6 параметрів (табл. 2). Друга морфологічна таблиця описує альтернативи можливих наслідків для підземного міста й залежить від першої таблиці. Третя морфологічна таблиця містить заходи й способи запобігання та реакції на небажану подію, що виникла або може виникнути, й застосовується для підтримання прийняття рішень щодо планування розвитку георбаністики.

Таблиця 2

Морфологічна таблиця рішення щодо ділянки будівництва

Загальна характеристика		
А. Придатність ділянки	В. Масштаб об'єкту	С. Глибина забудови
A.1. Придатна	B.1. Площа перерізу до 10 м ²	C.1. 0...10 м
A.2. Непридатна	B.2. Площа перерізу до 35 м ²	C.2. 10...20 м
	B.3. Площа перерізу до 70 м ²	C.3. 20...50 м
	B.4. Площа перерізу до і більше 70 м ²	C.4. глибше 50 м
Ризики для забудови		
Д. Фактор ризику	Е. Ступінь ризику	Ф. Рівень ризику
D.1. Відмова конструкцій, порушення функціональності та безпеки підземних споруд	E.1. <3%	F.1. 0,1...5% Q
D.2. Небезпечний вплив на поверхневі чи сусідні підземні об'єкти	E.2. 3...10%	F.2. 5...20% Q
D.3. Ініціація зсувних явищ	E.3. 10...20%	F.3. 20...50%Q
D.4. Підтоплення	E.4. 20...50%	F.4. >50% Q
D.5. Екологічні ризики	E.5. >50%	
D.6. Транспортні проблеми		
D.7. Зростання вартості будівництва та експлуатації споруд		

До загальних характеристик Таблиці 2 віднесено параметри А, В, С. Параметр А (придатність ділянки) є інтегруючим, причому альтерна-

тива А.1 (придатність ділянки) охоплює вельми сприятливе, сприятливе та недостатньо сприятливе геологічне середовище, а альтернатива А.2

(непридатність ділянки) – несприятливе середовище, пов'язане з високими значеннями факторів ризику (див. параметри D – F). Параметр В (масштаб об'єкту) характеризує типи підземних споруд, що проектуються, і відображує підземні об'єкти інженерної інфраструктури міста, між іншим – каналізаційні колектори (альтернатива В.1), транспортні комунікації (альтернатива В.2), багатофункціональні підземні споруди камерного типу (альтернатива В.3) та камери великих перерізів: підземні торгівельні комплекси, спортивні об'єкти, електростанції, виробничі підприємства тощо (альтернатива В.4). Оскільки в різних геологічних середовищах ступінь сприятливості підземному будівництву значною мірою залежить від масштабу підземної споруди, то для прийняття рішення щодо вибору об'єкту будівництва важливо враховувати альтернативи В. Глибина забудови (параметр С) пов'язана з функціональним призначенням споруди та прийнятою геобудівельною технологією і впливає на формування навантаження на кріплення (оправу) від гірського тиску, статичних і динамічних навантажень.

До ризиків підземного будівництва віднесені параметри D, E, F. Серед альтернатив факторів ризику виділено руйнування конструкцій і порушення функціональності та безпеки споруд (D.1), небезпечний вплив нових виробок на наземні та підземні об'єкти (D.2), ініціація зсувних явищ похилого рельєфу (D.3), підтоплення (D.4), екологічні ризики (D.5), транспортні проблеми (D.6), а також зростання вартості будівництва та експлуатації споруд (D.7). Ступінь ризику (параметр E) вказує на ймовірність реалізації небажаних подій (D.1...D.7), а рівень ризику (параметр F) оцінює економічні втрати від реалізації небажаних подій у відсотках від початкової вартості споруди Q.

Таким чином, морфологічний аналіз запропонованої природничо-технічної геосистеми здатен поєднати сукупність взаємодій природничих і техногенних факторів із факторами структурно-функціонального характеру освоєння підземного простору, відкриваючи нові можливості для стратегічного планування розвитку мегаполісу, економічних обґрунтувань і вдосконалення технологій міського підземного будівництва.

Використання методу Монте-Карло. Значна кількість факторів впливу на конструктивну надійність підземної споруди має ймовірнісну природу, для якої можуть бути встановлені різні категорії невизначеності: просторова мінливість і геологічні фактори, помилки, що виникають при змінах і оцінках геомеханічних параметрів, включаючи їх статистичний розподіл, неповний облік навантажень і упущення, що виникли в ході проектування і будівництва. Кожен підземний

об'єкт має свою вартість будівництва, яка визначається на початковому етапі його параметрами та ринком будівельних послуг, і коректується в ході будівництва фактичними геологічними умовами. Змінність геологічного середовища, окремих властивостей ґрунтів веде до суттєвих проектних помилок першого і другого роду й потребує врахування в проектних рішеннях.

Змінними можна вважати такі параметри як об'ємна вага, кут внутрішнього тертя, модуль деформації, коефіцієнт Пуасона, питома зчеплення, які не мають чіткого фіксованого значення навколо підземної споруди, а можуть приймати будь-які значення в можливих діапазонах змін. Не можна точно передбачити, яке значення матиме один з цих параметрів у будь-якому конкретному місці. Отже, ці параметри описуються як випадкові величини.

Нормальний або Гаусовий розподіл є найбільш поширеним типом функції розподілу ймовірностей, і розподіл багатьох випадкових величин відповідає цьому розподілу. Він зазвичай використовується для ймовірнісних досліджень в інженерній геотехніці, якщо немає вагомих підстав для вибору іншого розподілу. Зазвичай змінні, які виникають як сума ряду випадкових ефектів, жодна з яких не домінує над сумою, розподіляються таким чином.

Очевидно, що бажано включати якомога більший набір спостережень, але в геотехніці існують серйозні практичні і фінансові обмеження на обсяги даних, які можуть бути зібрані. Отже, часто буває необхідно робити оцінки на основі судження, досвіду або зіставлення з результатами, опублікованими іншими. Ці труднощі часто використовуються як привід для відмови від використання ймовірнісних інструментів в інженерній геотехніці, але, досвід демонструє, що корисні результати можуть бути отримані навіть з дуже обмежених виборок [14].

Перспективним напрямком є отримання кількісної оцінки ризику втрати носійної здатності геобудівельної конструкції шляхом використання синтезу двох сучасних способів моделювання – чисельного методу скінчених елементів (МСЕ) [20] і ймовірнісного методу Монте-Карло (ММК) [16, 17]. Переваги такого об'єднання полягають у переході від детермінованих методів вирішення складних геомеханічних задач до врахування ймовірнісних відхилень і оцінки ризиків.

Реалізація ідеї синтезу методів МСЕ + ММК може здійснюватися в трьох варіантах. Перший - використання єдиного програмного комплексу, що об'єднує відомі комп'ютерні технології МСЕ і ММК. Другий - генерація вхідної інформації по ММК, багаторазове рішення за МСЕ відповідно до виконаної генерації, інтерактивна обробка ви-

хідного інформаційного масиву. Третій варіант полягає в роздільному виконанні завдання методами чисельного та імітаційного моделювання з подальшим зіставленням отриманих результатів.

Як приклад розглянемо характерну задачу оцінки ризику обриву стіни в ґрунті при будівництві котловану, який споруджується в суцільному глинистому масиві шириною 80 м і висотою 20 м. Для вирішення даної задачі був обраний другий варіант синтезу зазначених методів, для реалізації якого було використано розрахунковий комплекс Plaxis 8.2 та інструмент аналізу даних «Генерація випадкових значень» у програмі Excel. Будівництво котловану моделю-

ється в середовищі Plaxis як поетапний процес. Розрахунок заглибленої споруди, що взаємодіє з ґрунтовим масивом являє собою складну геотехнічну систему. Поведінка ґрунтового масиву моделюється згідно відомій моделі міцності ґрунту, моделі Кулона – Мора. Моделювання ситуації залежить від ступеня подрібнення сітки скінченних елементів, у даній задачі обрано середня щільність сітки, скінченні елементи якої мають трикутну форму. На рис. 6 показана модель ґрунтового масиву.

У поставленій задачі ризик залежить від кількох детермінованих та стохастичних величин, які наведені в таблицях 3 і 4.

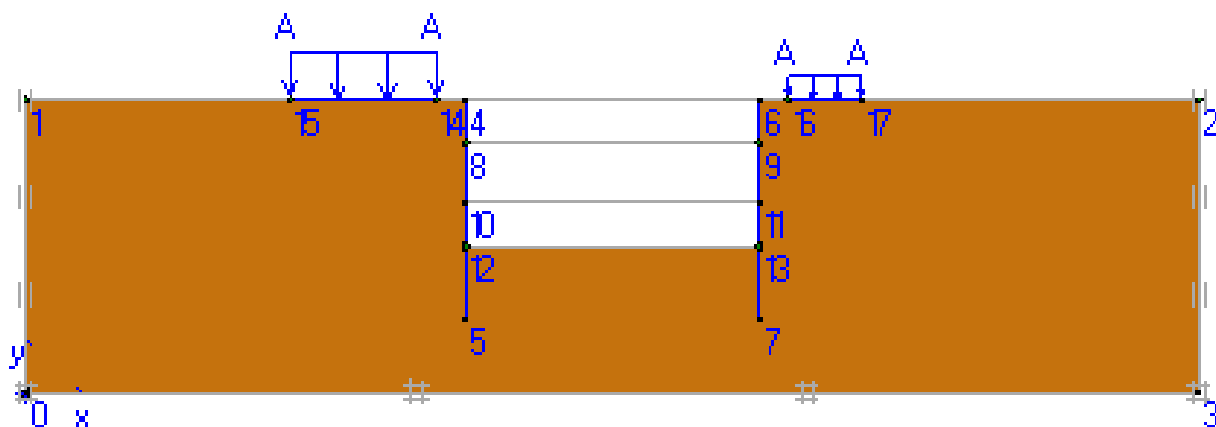


Рис. 6. Модель ґрунтового масиву

Таблиця 3

Детерміновані параметри моделі

Найменування параметра	Значення детермінованих параметрів
Глибина котловану H , м	10
Ширина котловану B , м	20
Довжина стіни в ґрунті h , м	15
Товщина стіни в ґрунті d , м	0,5
Нормальна жорсткість EA , кН	15000000
Згинальна жорсткість EI , кН/м ² /м	312000
Навантаження в лівій частині q , кН/м ²	10
Навантаження в правій частині q , кН/м ²	5

Таблиця 4

Статистичні параметри моделі

Найменування параметра	Значення випадкових параметрів	
	Середнє	Середньо-квадратичне відхилення
Питома вага ґрунту γ , кН/м ³	17,3	3
Коефіцієнт Пуассона ν	0,35	0,05
Модуль деформації E_{ref} , кН/м ²	17000	3000
Питоме зчеплення C_{ref} , кН/м ²	5	2
Кут внутрішнього тертя ϕ , °	23	5

Припускаємо, що значення стохастичних параметрів розподілені за нормальним розподілом. Окремо зупинимось на двох з них:

- Кут тертя φ . Середнє значення приймається рівним 23° , що є приблизним центром нормального розподілу передбачуваного діапазону міцності на зрушення. Зі стандартного відхилення 5° випливає, що близько 68% значень кута тертя будуть знаходитися між 18 і 28° .
- Когезійна сила C . Значення 5 т / м^2 було обрано в якості середньої сили зчеплення, і було встановлено стандартне відхилення 2 т / м^2 . Для забезпечення широкого діапазону можливих значень когезійної міцності

мінімальне і максимальне значення, що використовуються для усічення нормального розподілу, становлять 0 і 25 т/м^2 відповідно. Мінімальну кількість необхідних ітерацій визначимо за формулою [21]:

$$n = \left(\frac{d}{a}\right)^2 \frac{1-p}{p} \quad (2)$$

де n - кількість ітерацій;

d - нормальне стандартне відхилення за таблицею 3;

a - допустима помилка;

p - імовірність відмови.

Таблиця 5

Нормальне стандартне відхилення

Відсоток довіри (%)	Нормальне стандартне відхилення (d)
80	1,28
85	1,44
90	1,64
95	1,96
99	2,57

Імовірність відмови оцінюється як $p = 0,1$, що забезпечує достатньо високий для умов ґрунтового масиву показник. Розраховують кількість імітацій Монте-Карло, необхідних для оцінки ймовірності. Практика геобудівництва свідчить, що допустима помилка може складати 20%.

$$d = 1,64, \alpha = 0,2 \text{ і } p = 0,1$$

$$n = \left(\frac{1,64}{0,2}\right)^2 \frac{1-0,1}{0,1} = 605 \quad (3)$$

За результатами розрахунку бачимо, що мінімальна кількість ітерацій повинна бути не менше 605.

На основі цього було згенеровано масив даних вищезазначених випадкових параметрів (для кожного параметру по 605 значень). Розіграш випадкових (стохастичних) параметрів здійснювався за допомогою інструменту аналізу даних «Генерація випадкових значень» у пакеті EXCEL за нормальним законом розподілу окремо для кожного параметра. Відповідно до табл. 4 були задані середні та середньо-квадратичні відхилення.

Слід зазначити, що для імітаційного моделювання в середовищі PLAXIS послідовно змінювалися лише геомеханічні параметри (табл. 4), чим моделювалося змінне геологічне середовище, для детермінованого ж розрахунку були взяті лише середні значення.

Результати детермінованого розрахунку засвідчили, що максимальне відхилення стіни в ґрунті від вертикальної площини склало $6,27 \text{ см}$. Отримане значення не перевищує максимально допустиме відхилення, яке для залізобетонного кріплення в нашому випадку дорівнює 10 см , тобто споруда вважається надійною й спроектованою безпомилково. Проте детермінований підхід, як побачимо далі, не дозволяє кількісно оцінити надійність або зворотне значення – ризик.

Результати імітаційного моделювання (рис. 7) свідчать, що імовірність повного руйнування стіни в ґрунті склала $1,65\%$, а імовірність відхилення від горизонтальної площини більше нормативного значення (втрата стійкості) склала $6,11\%$. Сумарний ризик відмови склав $7,76\%$. Замовник, інвестор проекту повинні бути попереджені про існуючі ризики й можливі економічні наслідки їх реалізації й прийняти рішення щодо стратегії управління ризиками.

Таким чином, широко розповсюджений у проектуванні інженерних об'єктів метод скінчених елементів та різні програмні комплекси його реалізації можуть бути ефективно доповнені програмним інструментарієм імовірнісних методів. Оскільки геологічне середовище характеризується значною змінністю параметрів, висока варіативність яких пов'язана з невизначеністю поведінки ґрунтів і не може бути досліджена повністю, проектування геобудівельних споруд повинно



Рис. 7. Гістограма ризику

спиратися на синтез детермінованих та ймовірнісних методів розрахунків.

Висновки.

Розроблено методику типізації та районування геологічного середовища мегаполісу, яка вперше оцінює територію за сприятливістю підземному будівництву й розглядає змінність властивостей не тільки поверхневого шару на виділеній території, а й усієї товщі інженерно-геологічного середовища. Застосована методика морфологічного аналізу, яка вперше дозволяє оцінити різноманітні типи ризиків, імовірність реалізації негативних сценаріїв та додаткові ви-

трати, з ними пов'язані, ще на передпроектній стадії спорудження підземних об'єктів. При визначенні параметрів підземних споруд на проектній стадії доцільно застосовувати методи імітаційного моделювання, найпоширенішим з яких в геомеханіці є метод Монте-Карло. Його синтез з методом скінчених елементів відкриває нові можливості для уточнення результатів широкого кола задач підземного будівництва й визначення ризиків. Це дає в руки інвесторів та міських державних адміністрацій ефективний інструмент управління ризиками та інвестиціями при освоєнні підземного простору мегаполісів.

Література

1. Gilbert, P. H., and others. *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*, The National Academies Press – 2013. – 230 p.
2. Pankratova, N. *Problems of Megapolises Underground Space System Planning*/ N. Pankratova, G. Gayko, V. Kravets, I. Savchenko // *Journal of Automation and Information Sciences*. – Т. 48. – 2016. – № 4. – Р. 32-38.
3. Гайко, Г. І. Транспортноорієнтована природничо-технічна геосистема «геоурбаністика – геологічне середовище»/ Г. І. Гайко, В. Г. Кравець, В. П. Булгаков, Ю. І. Гайко // *Вісник НТУ «КПІ»*. Серія «Гірництво». – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – Випуск 29. – С. 18-24.
4. Гайко, Г. І. Проблеми системного планування підземного простору великих міст / Г. І. Гайко // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія «Гірництво». – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – Випуск 25. – С. 35 – 40.
5. СНиП 2.01.15-90. *Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения проектирования*. – М. : Госстрой, 1992.
6. Горбатюк, Н. В. *Районування урбанізованих територій на основі інтегральних оцінок інженерно-геологічних умов (на прикладі м. Сімферополя): дисертація канд. геол. наук* / Н. В. Горбатюк. – К., 2003.
7. Кріль Т.В. *Вплив техногенних динамічних навантажень на інженерно-геологічні умови урбанізованих територій (на прикладі м. Києва): Автореф. дис. канд. геол.-мінерал.* /Т.В. Кріль; [Інституту геологічних наук НАН України]. – К., 2012. – 23 с.
8. Бондарик, Г. К. *Общая теория инженерной (физической) геологии*/ Г. К. Бондарик. – М. : Недра – 1981. – 256 с.
9. Білецький, В. С. *Класифікація техногенних впливів на геологічне середовище*/ В.С. Білецький // *Нафтогазова інженерія*. – 2017. – №2. – С. 27 – 34.
10. Ресин, В. И. *Развитие больших городов в условиях переходной экономики. Системный подход*/ В. И. Ресин, Ю. С. Попков. – М. : Ленанд, 2013. – 328 с.

11. Картозия, Б. А. Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции / Б. А. Картозия // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 615 – 629.
12. Згуровский, М. З. Системный анализ: проблемы, методология, приложения. / М. З. Згуровский, Н. Д. Панкратова. – Київ : Наукова думка, 2011. – 744 с.
13. Панкратова, Н. Д. Морфологічний аналіз. Теорія, проблеми, застосування: Навчальний посібник / Н. Д. Панкратова, І. О. Савченко. – Київ : Наукова думка, 2015. – 245 с.
14. Шашенко, А. Н. Методы теории вероятности в геомеханике / А. Н. Шашенко, Н. С. Сургай, Л. Я. Парчевский. – К. : Техника, 1994. – 216 с.
15. Потапов, В. Д. Имитационное моделирование производственных процессов в горной промышленности / В. Д. Потапов, А. Д. Яризов. - М. : Высшая школа, 1981. – 191 с.
16. Смолич, С. В. Решение горно-геологических задач методом "Монте-Карло": Учеб. Пособие / С. В. Смолич, К. С. Смолич; ЧитГУ. – Ч. : Университет, 2004. – 103 с.
17. Бугров, А. К. Определение вероятностных характеристик активного давления грунта методом Монте-Карло / А. К. Бугров, В. Г. Шилин // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – 2002. – № 5.
18. Гайко, Г. І. Типізація геологічного середовища урбанізованих територій при освоєнні підземного простору / Г. І. Гайко, Т. В. Кріль // XIV міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях». – Київ, 2015. – С. 173 – 180.
19. Кауфман, Л. Л. Геотехнические риски подземного строительства: Монография / Л. Л. Кауфман, Б. А. Лысков. – Донецк : Норд-Пресс, 2009. – 362 с.
20. Толок, В. А. Метод конечных элементов: теория, алгоритмы, реализация / В. А. Толок, В. В. Кричевский, С. И. Гоменюк и др. – К. : Наук. Думка, 2003. – 316 с.
21. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М. : Мир, 1969. – 395 с.
22. Saluga P. Ocena ekonomiczna projektów i analiza ryzyka w górnictwie [Economic Evaluation and Risk Analysis of Mineral Projects]. Studia, Rozprawy, Monografie, nr 152, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 2009. – 278 p.

UDC 519.876.2

Hennadii Haiko,

Doctor (Technical Science), Professor,

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

Borschagivska str., 115, Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: gayko.kpi@meta.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7471-3431>;

Ivan Matviichuk,

PhD student, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

e-mail: gayko.kpi@meta.ua, <http://orcid.org/0000-0001-7471-3431>;

Volodymyr Biletskyi,

Doctor (Technical Science), Professor,

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",

Kyrychova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine,

e-mail: biletsk@i.ua, <http://orcid.org/0000-0003-2936-9680>;

Piotr Saluga,

Doctor (Technical Science), Professor,

Department of Management in Energy, AGH University of Science and Technology (Krakow),

al. A. Mickiewicza, 30, Krakow, 30-059, Poland,

e-mail: psaluga@zarz.agh.edu.pl, Scopus (author ID): 6506800622

FORECAST ASSESSMENT METHODS OF GEOLOGICAL ENVIRONMENT PROMOTION FOR THE CONSTRUCTION OF URBANISTICS SUBJECTS

The purpose of the paper is to reveal new opportunities and develop tools for applying typing methods, system analysis and probabilistic methods for assessing favorable geological environment of underground urban development.

A comprehensive method was used based on methods of geological environment typification, morphological analysis of underground construction sites, Monte Carlo synthesis and finite elements methods, taking into account variability of soil properties in the geocoding area.

Scientific results include: a new method of geological environment typification, which examines variability of properties not only of the surface layer in the allocated area, but also the entire thickness of the geological environment for the first time, where the underground object is located; scientific tool for morphological analysis methods to assess the favorable urban conditions for underground construction; synthesis of the Monte Carlo method and the finite element method in order to take into account the probabilistic nature of soils properties when developing the underground space.

Practical results: Geological environment on the territories in Shevchenko district of Kyiv was typified; thematic maps for individual factors of influence were created; morphological tables with the analysis of risks for development were constructed, dependencies between the parameters of morphological tables were constructed, specified parameters of underground structures taking into account the probabilistic nature of the properties of the geological environment were calculated. This provides investors and city government administrations with an effective risk management and investment tool for underground urban development.

Keywords: geological environment, geourbanism, underground space, system approach, forecast estimation, typifying method, morphological analysis, morphological tables, geomechanical risks, Monte Carlo method.

References

1. Gilbert, P. H., and others, (2013). *Underground Engineering for Sustainable Urban Development*. The National Academies Press, 230.
2. Pankratova, N. D., Gayko, G. I., Kravets, V. G., Savchenko I. A., (2016). *Problems of Megapolises' Underground Space System Planning*. *Journal of Automation and Information Sciences*, 48, 32–38.
3. Haiko, H. I., Kravets, V. H., Bulhakov, V. P., Haiko, Yu. I. (2015). *Transit oriented natural-technical ecosystems «geourbanistics - geotechnical environment»* *Visnyk NTU «KPI». Series «Mining»*, 29, 18–24.
4. Haiko, H. I., (2014). *Problems of systematic planning of underground construction for large cities*. *Visnyk NTUU «KPI». Series «Mining»*, 25, 35–40.
5. *Construction Norms and Regulations 2.01.15-90. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes. Basic design provisions*. - Moscow: State construction, 1992.
6. Horbatiuk, N. V., (2003). *The zoning of urbanized territories based on integral estimates of engineering and geological conditions*, *The National Academy of Sciences, Institute of Geological Sciences of Ukraine*, Kyiv.
7. Kril, T. V., (2012). *Influence of man-made dynamic loads on engineering-geological conditions of urbanized territories (on the example of Kyiv)*. *The National Academy of Sciences, Institute of Geological Sciences of Ukraine*. Kyiv, 23.
8. Bondaryk H. K., (1981). *General theory of engineering (physical) geology*. Nedra, 256.
9. Biletskyi, V. S., (2017). *Classification of anthropogenic impact on geological environment*. *Oil and gas engineering*, 2, 27–34.
10. Resyn, V. Y., Popkov, Yu. S., (2013). *Development of large cities in a transition economy. System approach*. Moscow, Russia: Lenand, 328.
11. Kartozhya, B. A., (2015). *Mastering the underground space of large cities. New trends*. *Scientific and technical journal*, 1, 615–629.
12. Zghurovskiy, M. Z., Pankratova, N. D. (2011). *System analysis: problems, methodology, annexes*. Kyiv, Ukraine: *Scientific thought*, 742.
13. Pankratova, N. D., Savchenko, I. O. (2015). *Morphological analysis. Theory, problems, application: Tutorial*. Kyiv, Ukraine: *Scientific thought*, 245.
14. Shashenko, A.N., Surhai, N.S., Parchevskiy, L.Ia. (1994). *Methods of probability theory in geomechanics*. Kyiv, Ukraine: *Technique*, 216.
15. Potapov, V. D., Yaryzov, A. D. (1981). *Simulation modeling of production processes in the mining industry*. Moscow, Russia: *Higher School*, 191.
16. Smolych, S. V., Smolych, K. S. (2004). *Solution of mining and geological tasks using the Monte Carlo method*. Chita, Russia: *Chita State University*, 103.
17. Buhrov, A. K., Shylyn, V. H. (2002). *Determination of the probabilistic characteristics of the active soil pressure by the Monte Carlo method*. *Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 5.
18. Haiko, H. I., Kril, T. V. (2015). *Typization of the geological environment of urbanized territories during the development of underground space*. *XIV International Scientific and Practical Conference "Modern Information Technologies for Environmental Safety Management, Nature Use, Emergency Measures"*, 173–180.
19. Kaufman, L. L., Lisykov, B. A. (2009). *Geotechnical risks of underground construction: Monograph*. Donetsk, Ukraine: *Nord-Press*, 362.
20. Tolok, V.A., Krychevskiy, V.V. (2003). *Finite Element Method: Theory, Algorithms, Realization*. Kyiv, Ukraine: *Scientific thought*, 316.
21. Khan, H., Shapyro, S. (1969). *Statistical models in engineering problems*. Moscow, Russia: *Mir*, 395.
22. Saluga P. (2009). *Ocena ekonomiczna projektów i analiza ryzyka w górnictwie [Economic Evaluation and Risk Analysis of Mineral Projects]*. *Studia, Rozprawy, Monografie*, 152, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków, 278.