

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

УДК 519.876.2

Н.Д. Панкратова, И.А. Савченко, Г.И. Гайко, В.Г. Кравец

ОЦЕНИВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ГОРОДСКОГО ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА*

Введение

Кардинальные изменения, произошедшие в последние десятилетия в жизни больших городов, требуют научного осмысления новых реалий и наиболее вероятных перспектив их дальнейшего развития. Подземная урбанистика, которая является неотъемлемой составляющей современного мегаполиса, вышла за пределы отдельных локальных объектов и становится системным фактором развития городов. Предвидение будущих изменений, соответствующая городская политика, планирование и управление развитием мегаполисов должны опираться на надежный научно-методологический фундамент, призванный обеспечить системное развитие наземной и подземной урбанистики как единого целого [1].

Один из наиболее эффективных подходов к современной планировке мегаполисов — обеспечение устойчивого развития города. Оно предполагает способность удовлетворять нынешним потребностям общества без ущерба и потерь для будущих поколений. Существенный аспект устойчивого развития — возможность своевременно реагировать на потенциальные изменения природной среды и минимизировать техногенные и экологические воздействия. Данная концепция меняет стратегию многих инженерных проектов и предусматривает изменение традиционного видения локальных задач, рассматривая проекты с позиций крупных природно-технических и социальных систем.

Подземное пространство может обеспечить трехмерную свободу передвижения людей, материальных, водных и энергетических ресурсов к малодоступным объектам в плотно застроенных районах города. Миллионы людей полагаются сегодня на подземные коммуникации, надежно обеспечивающие удобство и комфорт. Таким образом, внедрение концепции новой подземной инфраструктуры стимулирует и поддерживает устойчивое развитие городов, становится его неотъемлемой частью. При этом эффективно спланированная и правильно эксплуатируемая подземная инфраструктура повышает качество жизни, энергетическую эффективность и экологическую безопасность в большей степени, чем аналогичная система на поверхности.

Как показывает опыт ведущих стран мира, система управления процессом освоения подземного пространства должна базироваться на мастер-плане развития подземной урбанистики [2, 3]. В отличие от генеральных планов развития го-

* Представленные результаты получены в рамках научно-исследовательского проекта МОН Украины № 0117U002414 «Развитие подземной урбанистики как системы освоения георесурсов крупных городов».

© Н.Д. ПАНКРАТОВА, И.А. САВЧЕНКО, Г.И. ГАЙКО, В.Г. КРАВЕЦ, 2018

*Международный научно-технический журнал
«Проблемы управления и информатики», 2018, № 5*

родов, мастер-план основывается на целеполагании значения (смыслов) конкретного города и согласованных задачах будущего развития. Он предусматривает значительно большие временные периоды планирования (долгосрочные стратегии), большую степень концептуализации (при уменьшении детализации объектов) и привлечение к планированию не только узких специалистов, но и более широкого круга экспертов и общественных организаций. Данный подход значительно расширяет круг вопросов и факторов влияния, свойственных процессу планирования, и требует активного привлечения методов прикладного системного анализа [4]. Известны различные пути реализации системного подхода при планировании поверхностной застройки крупных городов [5], однако для подземной урбанистики до сих пор оно не шло дальше общей постановки задач и анализа методов исследований [3,6].

При оценивании перспектив городского подземного строительства перспективными видятся возможности применения метода морфологического анализа для оценки степени пригодности городских территорий для освоения подземного пространства, что в будущем может использоваться для построения мастер-плана «подземного города».

Разработка инструментария на основе модифицированного метода морфологического анализа для оценки предпочтительности городских территорий для подземного строительства

Задача оценки территории с точки зрения предпочтительности для подземного строительства имеет ряд факторов, которым присуща неопределенность разной природы, для которой характерны такие особенности:

- точная оценка всех факторов влияния требует существенных затрат времени и ресурсов, связанных с определенными инженерными или геологическими работами и тщательными измерениями, поэтому не всегда экономически целесообразна на этапе выбора участка для строительства;

- большинство участков разнотипны по своей структуре и соответственно имеют характеристики, изменяющиеся в пространстве и времени.

Для оценки в условиях неопределенности привлекаются эксперты, которые могут принимать решения, основываясь на опыте, интуиции и относительно небольшом количестве имеющейся информации об участке. Цель настоящей работы — создание инструментария, основанного на формализации и сопровождении процесса принятия решения по целесообразному использованию земельного участка для подземного строительства и позволяющего понизить вероятность ошибки прогнозирования.

В качестве основы для такого инструментария выбран модифицированный метод морфологического анализа (МММА) [7], который хорошо зарекомендовал себя при моделировании объектов, связанных с большим количеством альтернативных конфигураций за счет комбинирования различных значений параметров.

Рассмотрим шаги построения модели в МММА:

- определение объектов (сущностей), которым будут соответствовать морфологические таблицы, и связей между ними;

- построение морфологических таблиц (МТ) для каждого объекта;

- оценка зависимостей между параметрами морфологических таблиц.

После этого модель считается построенной и может использоваться для оценки альтернативных параметров конкретного объекта на основе введенной экспертной информации по этому объекту.

Для данной задачи выбрана двухэтапная процедура МММА [8], т.е. используется две МТ с причинной связью между ними: первая описывает потенциальный участок строительства (геологическую и техногенную среду), вторая — структуру и альтернативы решения по данному территориальному участку.

Описание морфологических таблиц

Для построения МТ используют классификацию объекта по различным характеристикам, релевантным относительно принимаемого решения. Каждый разрез классификации становится параметром МТ, а возможные значения или диапазоны значений этого параметра — альтернативами этого параметра МТ. Нужно отметить, что таких параметров может быть очень большое количество, что делает процедуру МММА слишком громоздкой для экспертной оценки и расчета. Поэтому некоторые множества характеристик, которые однотипно влияют на результат, в данном исследовании агрегированы в отдельные параметры.

Окончательный вид МТ приведен в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Альтернативы параметра
1. Уровень динамической нагрузки	1.1. Низкий (46...53 дБ)
	1.2. Средний (53...73 дБ)
	1.3. Повышенный (73... 96 дБ)
	1.4. Высокий (более 96 дБ)
2. Показатель статической нагрузки от поверхностной застройки	2.1. Незначительный ($K_{sl} < 1$)
	2.2. Умеренный ($1 < K_{sl} < 2$)
	2.3. Относительно высокий ($2 < K_{sl} < 3,5$)
	2.4. Высокий ($K_{sl} > 3,5$)
3. Показатель статической нагрузки грунтового массива (давление на отделку)	3.1. Незначительный ($K_{mas} < 0,05$, МПа)
	3.2. Умеренный ($0,05 < K_{mas} < 0,3$, МПа)
	3.3. Высокий ($0,3 < K_{mas} < 0,5$, МПа)
	3.4. Очень высокий ($K_{mas} > 0,5$, МПа)
4. Влияние существующих подземных объектов	4.1. Отсутствует (расстояние свыше 50 м)
	4.2. Незначительное (расстояние 20... 50 м)
	4.3 Существенное (расстояние 10 ... 20 м)
	4.4 Угрожающее (расстояние до 10 м)
5. Генетический тип и литологический состав грунтов	5.1. Невыветрелые глины и пески средней плотности
	5.2. Техногенные отложения (намывные и насыпные уплотненные разновидности)
	5.3. Делювиальные глинистые почвы (водонасыщенные), обводненные надпойменные пески
	5.4. Просадочные грунты, почвы с особыми свойствами (лес, торф, ил)
6. Расчетное сопротивление грунта	6.1. Очень прочные грунтовые основания > 300 кПа
	6.2. Прочные 200...300 кПа
	6.3. Грунты средней прочности 150–200 кПа
	6.4. Относительно прочные грунты < 150 кПа
7. Влияние водоносных горизонтов и верховодки	7.1. Водоносные горизонты в $P-N_{lпр}$
	7.2. Глубина залегания грунтовых вод > 3 м, напорных > 10 м
	7.3. Глубина залегания грунтовых вод < 3 м, напорных < 10 м
	7.4. Присутствуют подтопленные участки с УГВ до 1 м
8. Тип рельефа и морфометрия	8.1. Плоские участки надпойменных террас, моренно-ледниковые равнины (наклон поверхности до 1°)
	8.2. Слабо наклоненные поверхности надпойменных террас, участки водоразделов (наклон поверхности $1...4^\circ$, плотность расчленованности рельефа $0...2$ км/км ²)
	8.3. Долины малых рек, слабо расчлененные склоны, высокая пойма (наклон поверхности $4...8^\circ$, плотность расчленованности рельефа $2...3$ км/км ²)
	8.4. Оползнеопасные участки склонов с активным развитием оврагов, провалов, низкая пойма (наклон поверхности $> 8^\circ$, плотность расчленованности рельефа $3...4$ км/км ²)
9. Инженерно-геологические процессы	9.1. Отсутствуют
	9.2. Процессы стабилизированы
	9.3. Проявление оползневых смещений незначительных объемов
	9.4. Активное проявление просадки, подтопления, гравитационных процессов
10. Геотехнологии строительства подземных сооружений	10.1. Открытые
	10.2. Подземные

Кратко рассмотрим выбранные параметры, цель которых — максимально объективно отразить влияние геологической среды и техногенных факторов на риски подземного строительства и эксплуатации подземных сооружений [9]. Параметры 1...4 и 6 характеризуют угрозы устойчивости (надежности) подземного сооружения и отражают влияние на нее динамической нагрузки (автомобильных трасс, железных дорог, метрополитена, промышленных предприятий и т.д.); статической нагрузки от поверхностной застройки (плотность застройки с учетом коэффициента этажности зданий), нагрузки от давления горных пород или грунтов на отделку сооружения (учитывает плотность грунта, глубину грунтового столба, влажность и коэффициент класса грунтов); геомеханического возмущения массива от близости других подземных сооружений и сопротивления грунта нагружению. Параметры 5, 7...9 характеризуют свойства и процессы геологической среды, которые в значительной степени влияют на стоимость и скорость сооружения выработок, условия безремонтной эксплуатации подземных сооружений и экологической безопасности. Авторы понимают возможное взаимное влияние принятых групп геологических и геомеханических факторов, однако обе группы крайне необходимы для анализа и будут одинаково учитываться для всех исследуемых территорий (участков строительства). Принятые диапазоны факторов соответствуют четырем альтернативам благоприятности геологической среды освоению подземного пространства: весьма благоприятное, благоприятное, недостаточно благоприятное и неблагоприятное.

Во вторую МТ вошли параметры принятия решения, которое целесообразно рассматривать для данного участка. Всего выбрано шесть параметров (табл. 2).

Таблица 2

Общая характеристика		
А. Пригодность участка	В. Масштаб объекта	С. Глубина заложения
А.1. Пригоден	В.1. Площадь сечения до 10 м ²	С.1. 0...10 м
А.2. непригоден	В.2. Площадь сечения до 35 м ²	С.2. 10...20 м
	В.3. Площадь сечения до 70 м ²	С.3. 20...50 м
	В.4. Площадь сечения до и свыше 70 м ²	С.4. глубже 50 м
Строительные риски		
Д. Фактор риска	Е. Степень риска	Ф. Уровень риска
Д.1. Отказ конструкций, нарушения функциональности и безопасности подземных сооружений	Е.1. < 3%	Ф.1. 0,1...5 % Q
Д.2. Опасное воздействие на поверхностные или соседние подземные объекты	Е.2. 3...10 %	Ф.2. 5...20 % Q
Д.3. Инициация оползневых явлений	Е.3. 10...20 %	Ф.3. 20...50 % Q
Д.4. Подтопление	Е.4. 20...50 %	Ф.4. > 50 % Q
Д.5. Экологические риски	Е.5. > 50 %	
Д.6. Транспортные проблемы		
Д.7. Рост стоимости строительства и эксплуатации сооружений		

К общим характеристикам отнесены параметры А, В, С. Параметр А (пригодность участка) интегрирующий, причем альтернатива А.1 охватывает весьма благоприятную, благоприятную и недостаточно благоприятную геологическую среду, а альтернатива А.2 (непригодность участка) — неблагоприятную среду, связанную с высокими значениями факторов риска (см. параметры Д...Ф). Параметр В (масштаб объекта) характеризует типы проектируемых подземных сооружений и отображает подземные объекты инженерной инфраструктуры города, в частности канализационные коллекторы и энергопроводы (альтернатива В.1), транспортные коммуникации (альтернатива В.2), многофункциональные подземные сооружения камерного типа (альтернатива В.3) и камеры больших сечений: подземные торговые комплексы, спортивные объекты, электростанции, производственные предприятия и т.д. (альтернатива В.4). Поскольку в различных геологических средах степень благоприятствования подземному строительству может зависеть от поперечных размеров сооружения, то для принятия решения по выбору

объекта строительства в тех или иных условиях важно учитывать альтернативы В (масштаб объекта). Глубина застройки (параметр С) связана с функциональным назначением сооружения и принятой геотехнической технологией, она влияет на формирование нагрузки на крепь (отделку) от давления грунта, статических и динамических воздействий.

К рискам подземного строительства отнесены параметры D, E, F. Среди альтернатив факторов риска выделены разрушения конструкций и нарушение функциональности и безопасности сооружений (D.1), опасное влияние новых выработок на наземные и подземные объекты (D.2), инициация оползневых явлений наклонного рельефа (D.3), подтопления (D.4), экологические риски (D.5), транспортные проблемы (D.6), а также рост стоимости строительства и эксплуатации сооружений (D.7). Степень риска (параметр E) указывает на вероятность реализации нежелательных событий (D.1...D.7), а уровень риска (параметр F) оценивает экономические потери от реализации нежелательных событий в процентах от первоначальной стоимости сооружения Q.

Оценивание связей между параметрами

После определения параметров и альтернатив МТ устанавливается сила связи между альтернативами различных параметров, если такая связь имеется. Различают связи двух типов: взаимозависимость альтернатив (между параметрами одной и той же МТ) и влияние одной альтернативы на другую (между параметрами из двух разных МТ).

Считается, что эксперт при оценке объекта дает независимое значение для вероятности альтернативы параметра, которое не учитывает влияние других альтернатив. Однако альтернативы могут быть определенным образом связаны, и тогда такие комбинации альтернатив будут более или менее вероятны при рассмотрении конфигураций объекта в целом. В соответствии с процедурами МММА оценка силы связи имеет значение в пределах $[-1; 1]$. Объяснение этих значений представлено в табл. 3.

Таблица 3

Оценка	Пояснение
-1	Альтернативы полностью несовместимы; конфигурация с этой парой альтернатив невозможна
(-1; 0)	Альтернативы частично несовместимы; выбор одной из них в определенной степени уменьшает вероятность выбора другой
0	Альтернативы независимы; выбор одной из них не влияет на выбор другой
(0; 1)	Альтернативы частично связаны; выбор одной из них в определенной степени увеличивает вероятность выбора другой
1	Альтернативы полностью связаны; выбор одной из них влечет за собой выбор другой

Для оценки связей между альтернативами специалисту в предметной области были предоставлены опросные формы для заполнения. Вопросы о парах альтернатив ставились в следующей форме (табл. 4):

Таблица 4

№ п/п	Есть ли связь между альтернативами 1.1. Низкая (46... 53 дБ) 3.1. Незначительная ($K_{max} < 0,05$, МПа)
1	Комбинация невозможна
2	Сильная отрицательная (комбинация маловероятна)
3	Умеренная отрицательная (вероятность комбинации уменьшена)
4	Слабая отрицательная (вероятность комбинации слегка уменьшена)
5	Нет связи
6	Слабая положительная (вероятность комбинации слегка увеличена)
7	Умеренная положительная (вероятность комбинации увеличена)
8	Сильная положительная (комбинация весьма вероятна)
9	Альтернативы полностью взаимозависимы

Эксперту необходимо было выбрать вариант ответа в каждом вопросе. После заполнения опросных форм ответы переводились в числовую форму, приведенную в табл. 5. Таким образом была получена матрица взаимосвязей альтернатив параметров. Фрагмент этой матрицы, показывающий взаимное влияние параметров 1 и 3, приведен в табл. 6. Такие же фрагменты имеются в матрице для всех остальных пар МТ.

Следует отметить, что не все параметры МТ прямо влияют один на другой. Вопросы о тех параметрах, между которыми, очевидно, отсутствует связь, не вошли в опросную форму в целях уменьшения нагрузки на эксперта. Комбинации параметров табл. 1, взаимодействие между которыми рассматривалось, приведены в табл. 7.

Таблица 5

Ответ эксперта о связи	Числовое значение
Комбинация невозможна	- 1
Сильная отрицательная	- 0,8
Умеренная отрицательная	- 0,5
Слабая отрицательная	- 0,2
Нет связи	0
Слабая положительная	0,2
Умеренная положительная	0,5
Сильная положительная	0,8
Альтернативы полностью взаимозависимы	1

Таблица 6

Альтернатива		3. Показатель статической нагрузки окружающего грунтового массива			
		3,1	3,2	3,3	3,4
1. Уровень динамической нагрузки	1,1	0,5	0,2	- 0,2	- 0,5
	1,2	0,2	0,5	0,5	0,2
	1,3	- 0,2	0,2	0,5	0,5
	1,4	- 0,2	0,2	0,8	0,8

Таблица 7

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1			+	+					+	
2			+			+	+		+	+
3	+	+		+	+	+	+	+	+	+
4	+		+				+		+	+
5			+			+	+	+	+	
6		+	+		+					
7		+	+	+	+				+	
8			+		+				+	+
9	+	+	+	+	+		+	+		
10		+	+	+				+		

Далее оценивалось влияние параметров МТ первого этапа (см. табл. 1) на параметры МТ второго этапа (см. табл. 2). Для описания влияния использовались оценки в пределах [- 1; 1], значения которых объясняются табл. 8.

Таблица 8

Оценка	Пояснение
- 1	Альтернатива параметра независимой морфологической таблицы исключает выбор альтернативы параметра зависимой таблицы
(- 1; 0)	Альтернатива параметра независимой морфологической таблицы уменьшает вероятность выбора альтернативы параметра зависимой таблицы
0	Альтернатива параметра независимой морфологической таблицы никак не влияет на выбор альтернативы параметра зависимой таблицы
(0; 1)	Альтернатива параметра независимой морфологической таблицы увеличивает вероятность выбора альтернативы параметра зависимой таблицы
1	Альтернатива параметра независимой морфологической таблицы гарантирует выбор альтернативы параметра зависимой таблицы

Вопросы о влиянии альтернатив МТ независимых параметров на альтернативы МТ зависимых параметров были поставлены специалисту в предметной области в виде табл. 9.

Таблица 9

№ п/п	Влияет ли?
	1.1. Низкий (46 – 53 дБ) на вес А.1. Пригоден
1	Очень сильно уменьшает
2	Сильно уменьшает
3	Умеренно уменьшает
4	Слегка уменьшает
5	Не влияет
6	Слегка увеличивает
7	Умеренно увеличивает
8	Сильно увеличивает
9	Очень сильно увеличивает

По шкале, аналогичной табл. 5, ответы были переведены в числовую форму и занесены в матрицу связей, фрагмент которой представлен в табл. 10.

Таблица 10

Альтернатива		А. Пригодность участка		В. Масштаб объекта				С. Глубина застройки			
		А.1	А.2	В.1	В.2	В.3	В.4	С.1	С.2	С.3	С.4
1. Уровень динамической нагрузки	1.1	0,5	-0,5	0	0	0	0	0,5	0,2	0	0
	1.2	0,2	-0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2
	1.3	-0,2	0,2	0,2	0,2	-0,5	-0,8	-0,5	-0,5	0,5	0,5
	1.4	-0,8	0,8	0,2	-0,2	-0,5	-0,8	-0,8	-0,5	0,5	0,8

Морфологические таблицы, приведенные в табл. 1 и 2, совместно с оцененными матрицей взаимосвязи и матрицей связи между двумя МТ представляют собой модель оценивания решений относительно любого выбранного строительного участка для подземного строительства.

Использование разработанной модели для оценки участков строительства

Созданная модель позволяет оценивать участки для строительства. Исходными данными для такой задачи являются экспертные мнения относительно вероятностей альтернатив первой МТ (см. табл. 1), т.е. характеристик участка. Процедура оценивания состоит из следующих основных шагов:

- 1) получение информации от эксперта с помощью опросной формы;
- 2) перевод ответов эксперта в числовую форму и расчет оценок альтернатив первой МТ с учетом взаимозависимостей между ними;
- 3) расчет оценок второй МТ на основе множества возможных конфигураций первой МТ и матрицы связей.

На первом этапе эксперту предоставляется опросная форма по участку, который необходимо оценить. В этой опросной форме приводятся вопросы касательно соответствия каждой альтернативы каждого параметра исследуемому участку. Возможная форма постановки подобных вопросов следующая.

1. Укажите, насколько рассматриваемому участку соответствуют различные значения параметра «Уровень динамической нагрузки»:

1.1) верно ли утверждение, что для участка Уровень динамической нагрузки — низкий (46–53 дБ);

Однозначно неверно	Преимущественно неверно	Скорее неверно, чем верно	В равной степени верно и неверно	Скорее верно, чем неверно	Преимущественно верно	Однозначно верно
--------------------	-------------------------	---------------------------	----------------------------------	---------------------------	-----------------------	------------------

1.2) верно ли утверждение, что для участка Уровень динамической нагрузки — средний (53–73 дБ);

Однозначно неверно	Преимущественно неверно	Скорее неверно, чем верно	В равной степени верно и неверно	Скорее верно, чем неверно	Преимущественно верно	Однозначно верно
--------------------	-------------------------	---------------------------	----------------------------------	---------------------------	-----------------------	------------------

1.3) верно ли утверждение, что для участка Уровень динамической нагрузки — повышенный (73–96 дБ);

Однозначно неверно	Преимущественно неверно	Скорее неверно, чем верно	В равной степени верно и неверно	Скорее верно, чем неверно	Преимущественно верно	Однозначно верно
--------------------	-------------------------	---------------------------	----------------------------------	---------------------------	-----------------------	------------------

1.4) верно ли утверждение, что для участка Уровень динамической нагрузки — высокий (больше 96 дБ);

Однозначно неверно	Преимущественно неверно	Скорее неверно, чем верно	В равной степени верно и неверно	Скорее верно, чем неверно	Преимущественно верно	Однозначно верно
--------------------	-------------------------	---------------------------	----------------------------------	---------------------------	-----------------------	------------------

Эксперт выбирает ответы, которые, по его мнению, наиболее точно характеризуют вероятность появления соответствующей альтернативы для рассматриваемой области. Если информация относительно соответствующего параметра участка точно известна, эксперт может выбрать ответ «Однозначно да» для одной из альтернатив и «Однозначно нет» для всех остальных. Количество вопросов в опросной форме соответствует общему количеству альтернатив первой МТ. В данном исследовании анкета для участка строительства состояла из 38 вопросов.

Оценки эксперта переводятся в числовую форму по шкале табл. 11, после чего нормируются.

Таблица 11

Ответ эксперта относительно утверждения	Числовое значение
Однозначно неверно	0
Преимущественно неверно	0,2
Скорее неверно, чем верно	0,35
В равной степени верно и неверно	0,5
Скорее верно, чем неверно	0,65
Преимущественно верно	0,8
Однозначно верно	1

Обозначим параметры первой МТ как $F_i, i \in [1, N]$, где N — количество параметров (в данном исследовании $N = 10$). Альтернативы параметра F_i обозначим $a_j^{(i)}, i \in [1, N], j \in [1, n_i]$, где n_i — количество альтернатив параметра F_i . Нормированные экспертные оценки альтернатив параметров обозначим $p_j^{(i)}$.

Отметим, что ответы эксперта не учитывают взаимосвязи между альтернативами, поэтому оценки альтернатив пересчитываются с использованием матрицы взаимосвязей, описанной ранее. Расчеты основаны на решении системы уравнений для вероятностей. При этом значения условной вероятности аппроксимируются на основе значений предварительной (независимой) вероятности и значений матриц взаимосвязей с соблюдением ряда правил [10]:

$$P(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)}) = \frac{P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)})}{\sum_{k_2=1}^{n_2} \sum_{k_3=1}^{n_3} \dots \sum_{k_N=1}^{n_N} P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{k_2}^{(2)}, \dots, a_{k_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)})}, \quad (1)$$

где

$$P'(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{j_1}^{(1)}) = \prod_{m=2}^N p_{j_m}^{(m)} \cdot \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N c_{mj_m, l j_l}.$$

Система уравнений для вероятностей имеет вид

$$\begin{cases} \bar{x}_1 = P_1 \bar{x}_2; \|\bar{x}_1\| = 1; \\ \bar{x}_2 = P_2 \bar{x}_3; \|\bar{x}_2\| = 1; \\ \dots \\ \bar{x}_{N-1} = P_{N-1} \bar{x}_N; \|\bar{x}_{N-1}\| = 1; \\ \bar{x}_N = P_N \bar{x}_1; \|\bar{x}_N\| = 1. \end{cases} \quad (2)$$

Элементами матриц коэффициентов P_i являются суммы условных вероятностей конфигураций (1), соответствующих переменным. Например,

$$P_1 = \begin{pmatrix} \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P'(\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_1^{(2)}) & \dots & \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P'(\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{n_2}^{(2)}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P'(\{a_{n_1}^{(1)}, a_1^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_1^{(2)}) & \dots & \sum_{j_3=1}^{n_3} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} P'(\{a_{n_1}^{(1)}, a_1^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\} | a_{n_2}^{(2)}) \end{pmatrix}.$$

Для упрощения записи матриц коэффициентов P_i введем обозначения. Пусть C — многомерная матрица размерности N , элементами которой являются произведения значений матрицы конфигураций, соответствующие всем возможным парам альтернатив из этой конфигурации:

$$C_{j_1 j_2 \dots j_N} = \prod_{m=1}^{N-1} \prod_{l=m+1}^N c_{m_j m, l_j l}.$$

Введем также обозначение $C_{i_1 | i_2}$, где $i_1, i_2 \in [1, N]$ — номера параметров для матрицы C , умноженной по соответствующим измерениям на векторы независимых вероятностей всех остальных параметров $p_i, i \neq i_1, i \neq i_2$. Поскольку каждое такое умножение уменьшает размерность матрицы, результирующая матрица $C_{i_1 | i_2}$ является обычной двумерной матрицей. Тогда с учетом (1) матрицы P_i записываются в виде

$$P_i = \text{diag}(\bar{p}_i) \cdot C_{i | i+1} \cdot \text{diag}(C_{i | i+1}^T \cdot \bar{p}_i)^{-1}, \quad i \in [1; N-1];$$

$$P_N = \text{diag}(\bar{p}_N) \cdot C_{N | 1} \cdot \text{diag}(C_{N | 1}^T \cdot \bar{p}_N)^{-1}.$$

В [10] показано, что решением системы (2) является

$$\bar{x}_i = \text{diag}(C_{i | k} \cdot \bar{p}_k) \cdot \text{diag}(\bar{p}_i) \cdot \bar{1} = \text{diag}(C_{i | k} \cdot \bar{p}_k) \cdot \bar{p}_i, \\ i \in [1; N], \quad k \in [1; N], \quad k \neq i.$$

Учитывая способ построения $C_{i_1 | i_2}$, решение системы (2) можно записать в виде (3)

$$P_{j_k}^{(i_k)} = \frac{p_{j_k}^{(i_k)} \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_{k-1}=1}^{n_{k-1}} \sum_{j_{k+1}=1}^{n_{k+1}} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}. \quad (3)$$

Учитывая (1) и (3), также находим вероятность любой конфигурации:

$$P(\{a_{j_1}^{(1)}, a_{j_2}^{(2)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{C_{j_1 j_2 \dots j_N} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}. \quad (4)$$

Следующим шагом является вычисление оценок альтернатив второй МТ (см. табл. 2), т.е. ожидаемых результативностей вариантов решения относительно участка. Для оценивания альтернатив зависимой морфологической таблицы сначала определялась условная оценка альтернативы при каждой конкретной конфигурации независимой морфологической таблицы. В данном исследовании считалось, что альтернативы второй МТ без информации об участке одинаково значимы, поэтому для расчета условной результативности использовано соотношение (5)

$$R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) = \frac{\prod_{i=1}^N c_{ij_i, d1}}{\sum_{k=1}^{n_d} \prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk}}. \quad (5)$$

Здесь d — обозначение параметра второй МТ. Оценку $R(a_1^{(d)})$ альтернативы $a_1^{(d)}$ с учетом возможности появления произвольной конфигурации независимой морфологической таблицы определяем таким способом:

$$R(a_1^{(d)}) = \sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} R(a_1^{(d)} | \{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}) P(\{a_{j_1}^{(1)}, \dots, a_{j_N}^{(N)}\}). \quad (6)$$

Если обозначить $C_{j_1 j_2 \dots j_N}^{(d_k)} = \prod_{i=1}^N c_{ij_i, dk}$, то, учитывая (4)–(6), оценку некоторой альтернативы $a_1^{(d)}$ второй МТ легко найти в виде:

$$R(a_1^{(d)}) = \frac{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} C_{j_1 j_2 \dots j_N}^{(d_1)} C_{j_1 j_2 \dots j_N}^{(d_1)} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}{\sum_{j_1=1}^{n_1} \dots \sum_{j_N=1}^{n_N} \sum_{k=1}^{n_d} C_{j_1 j_2 \dots j_N}^{(d_k)} C_{j_1 j_2 \dots j_N}^{(d_k)} p_{j_1}^{(i_1)} \dots p_{j_N}^{(i_N)}}.$$

Оценки $R(a_1^{(d)})$ показывают долю результативности или вес альтернативы $a_1^{(d)}$ параметра F_d . Таким образом, сравнивая оценки $a_1^{(d)}, \dots, a_{n_d}^{(d)}$, можно определить, какие из альтернатив параметров табл. 2 в большей степени характеризуют участок, и какие между этими альтернативами соотношения. Данная информация чрезвычайно полезна для лиц, принимающих решения, поскольку дает наглядное представление об участке, учитывая все наиболее значимые факторы влияния.

Заключение

Основой инструментария анализа благоприятности городских территорий для подземного строительства выбран модифицированный метод морфологического анализа, который достаточно эффективно зарекомендовал себя при моделировании проблем, объекты которых могут иметь большое количество альтернативных конфигураций за счет комбинирования различных значений параметров. Он позволил, опираясь на выделенные группы геологических и техногенных факторов, рассмотреть ряд решений и групп рисков для оценки целесообразности развития подземной урбанистики на рассматриваемых участках. Данная методика впервые позволяет оценить различные риски, вероятность реализации негативных сценариев и дополнительные расходы, связанные с ними, еще на предпроектной стадии рассмотрения подземных объектов. В результате инвесторы и городские власти получают эффективный инструмент управления рисками и инвестициями при освоении подземного пространства мегаполисов. Разработанная методика и инструментарий будут использованы для построения мастер-планов развития «подземного Киева» и других крупных городов Украины.

Н.Д. Панкратова, І.О. Савченко, Г.І. Гайко, В.Г. Кравець

ОЦІНЮВАННЯ ПЕРСПЕКТИВ МІСЬКОГО ПІДЗЕМНОГО БУДІВНИЦТВА НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ

Розглянуто проблему планування міського підземного будівництва в рамках сталого розвитку, що дозволяє своєчасно реагувати на потенційні зміни природного середовища і мінімізувати техногенні та екологічні впливи. На основі

методології передбачення розробляється інструментарій підтримки прийняття рішення про доцільність використання території (геологічного середовища) для міського підземного будівництва. Інструментарій базується на модифікованому методі морфологічного аналізу урбанізованих територій. Запропоновано морфологічну модель, що враховує групи геологічних і техногенних факторів, для оцінки рішень з урахуванням багатофакторних ризиків щодо ділянок будівництва підземних об'єктів.

N.D. Pankratova, I.A. Savchenko, G.I. Gayko, V.G. Kravets

EVALUATING PERSPECTIVES OF URBAN UNDERGROUND CONSTRUCTION USING MODIFIED MORPHOLOGICAL ANALYSIS METHOD

The problem of urban underground construction is considered in the sustainable development framework, allowing to react timely to the potential changes in the environment and minimize technogenic and natural impact. Using the foresight methodology, the development of a tool set for decision support regarding the advisability of a terrain (geological environment) usage for urban underground construction is considered. The tool set is based on the modified morphological analysis method for urbanized territories. A morphological model is designed that considers groups of geological and technogenic factors for evaluating decisions and risk groups regarding the construction sites for underground objects.

1. *Underground Engineering for sustainable urban development/* P.H. Gilbert and others. — Washington : The National Academies Press, 2013. — 230 p.
2. *Vähäaho I.* Underground space planning in Helsinki // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* — 2014. — № 6. — P. 387–398.
3. *Проблемы системного планирования подземного пространства мегаполисов /* Н.Д. Панкратова, Г.И. Гайко, В.Г. Кравец, И.А. Савченко // *Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики».* — 2016. — № 2. — С. 101–107.
4. *Згуровский М.З., Панкратова Н.Д.* Системный анализ: проблемы, методология, приложения. — Киев : Наук. думка, 2011. — 728 с.
5. *Ресин В.И., Попков Ю.С.* Развитие больших городов в условиях переходной экономики. Системный подход. — М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. — 328 с.
6. *Картозия Б.А.* Освоение подземного пространства крупных городов. Новые тенденции // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* — 2015. — № 1. — С. 615–629.
7. *Панкратова Н.Д., Савченко И.О.* Морфологічний аналіз. Проблеми, теорія, застосування. — Київ : Наук. думка, — 2015. — 245 с.
8. *Савченко И.А.* Методологическое и математическое обеспечение решения задач предвидения на основе модифицированного метода морфологического анализа // *Инновационное развитие социально-экономических систем на основе методологий предвидения и когнитивного моделирования /* Под ред. Г.В. Гореловой, Н.Д. Панкратовой. — Киев : Наук. думка, 2015. — С. 427–441.
9. *Гайко Г.И., Криль Т.В.* Типізація геологічного середовища урбанізованих територій при освоєнні підземного простору // *XIV міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях».* — Київ, 2015. — С. 173–180.
10. *Savchenko I.O.* Estimating the solution sensitivity in application of the modified morphological analysis method // *Cybernetics and Systems Analysis.* — 2016. — 52, N 5. — P. 782–790.

Получено 20.03.2018