



СТРОИТЕЛЬСТВО ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОСВОЕНИЕ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>**Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков****Е. В. Потапова***Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва, Россия*✉ elka23sp@yandex.ru**Аннотация**

Управление рисками является важной составляющей деятельности современного предприятия. В настоящее время менеджмент рисков должен включаться в общую систему менеджмента качества строительной организации. Геотехническое строительство и, в частности, строительство метрополитенов, также должно осуществляться с учетом возможных рисков. Строительство метрополитена сопряжено с наличием неопределенностей со стороны внешней среды – породного массива, и специфических геотехнических рисков, которые могут приводить к проявлению рискованных ситуаций с различными последствиями. Для прогноза потенциальных опасностей на всех стадиях жизненного цикла сооружения метрополитена требуется умение управлять рисками. Качество управления связано с детальностью идентификации риска, которая предшествует этапу определения вероятности наступления рискованной ситуации (этапу оценки риска). Для идентификации объекта требуется определение его состава, свойств, природы возникновения. Методом такого познания риска с разделением на группы посредством определения существенных признаков (оснований) является классификация. В настоящее время разработаны разные классификации рисков в строительстве. В статье рассмотрены различные подходы к классификации рисков в подземном строительстве, проанализирована возможность адаптации данных классификаций применительно к анализу геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена. Предложены принципы классификации геотехнических рисков. Обоснована типология сооружений метрополитена как основа классификации геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена. Представлены результаты разработки общей формы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена.

Ключевые слова

горное дело, подземные сооружения, строительство, метрополитен, геотехнические риски, кластерный анализ

Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.т.н., проф. Е. Ю. Куликовой за помощь в проведении исследования и рекомендации при подготовке статьи.

Для цитирования

Потапова Е. В. Типология сооружений метрополитена для задач классификации геотехнических рисков. *Горные науки и технологии*. 2021;6(1):52–60. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>

CONSTRUCTION OF MINING ENTERPRISES AND UNDERGROUND SPACE DEVELOPMENT

Research article

Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification**E. V. Potapova***Rosatom State Nuclear Energy Corporation, Moscow, Russian Federation*elka23sp@yandex.ru**Abstract**

Risk management is an important part of a modern enterprise activity. Currently, risk management should be included in the overall quality management system of a construction organization. Geotechnical construction, for instance, construction of metro, should also be carried out taking into account possible risks. Metro construction is connected with a number of uncertainties related to enclosing rock mass conditions, and specific geotechnical risks, which can lead to materialization of hazards with various consequences. Predicting possible hazards at all stages of a metro structure life cycle requires the ability to manage risks. The effectiveness of risk



management requires detailed risk identification, which precedes the stage of determining the probability of risk (the risk assessment stage). To identify an object, it is required to determine its composition, properties, physical origin. The method of such risk cognition with division into groups through determining the essential features (grounds) is classification. To date, different classifications of risks in construction activity have been developed. The paper discusses various approaches to the classification of risks in underground construction, analyzes the feasibility of adapting these classifications to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities. The principles of classification of geotechnical risks were proposed. The typology of metro structures has been substantiated as the basis for the classification of geotechnical risks in the construction of metro facilities. The results of the development of a general form for classification of geotechnical risks during a metro construction have been presented.

Key words

mining, underground structures, construction, metro, subway, geotechnical risks, cluster analysis

Acknowledgements

The author thanks Prof. E. Yu. Kulikova for her help in conducting experiments and recommendations during the preparation of the article.

For citation

Potapova E. V. Typology of metro structures for the tasks of geotechnical risk classification. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(1):52–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-1-52-60>

Введение

Анализ данных по авариям и инцидентам в подземном строительстве показывает [1–7], что их сценарии характеризуются значительным разнообразием с точки зрения первопричин (рискообразующих факторов), развития дальнейших событий (проявления рискованной ситуации) и последствий. Все сценарии обладают индивидуальностью, обусловленной спецификой объектов, на которых они локализируются. Для дальнейшего анализа рисков необходимо глубокое их изучение путем определения состава, свойств, природы возникновения, принципов формирования связей. Методом подобного познания посредством определения существенных признаков (оснований) является классификация [8]. В практике исследований предложены различные подходы к классификации рисков при строительстве подземных сооружений. Актуальной задачей является создание адаптированной классификации, отражающей специфику конкретных сооружений метрополитена и предназначенной для решения конкретных задач строительства метрополитена, которая позволит с достаточной степенью достоверности произвести идентификацию рискообразующих факторов, рискованных ситуаций и возможных последствий для целей последующего анализа.

Целью представленного исследования являлось научное обоснование типологии сооружений метрополитена на основе классификации геотехнических рисков и их кластерного анализа.

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выявление основных составляющих геотехнических рисков и принципов их классификации в подземном строительстве.
2. Установление количественных признаков классификации геотехнических рисков.
3. Обоснование критериев классификации геотехнических рисков и рискообразующих факторов.
4. Проведение кластерного анализа для выявления характерных типов сооружений метрополитена.

Подходы к классификации геотехнических рисков

Практика исследований предлагает различные подходы к классификации рисков при строительстве подземных сооружений. Предложенные классификации охватывают широкий диапазон признаков различного характера. Авторами [9] впервые классифицированы риски при строительстве городских подземных сооружений с разделением рисков на 8 групп: строительные, экологические, управленческие/исполнительские, коммерческие, экономические, контрактные, социальные и эксплуатационные. Важно отметить, что в [9] классификации подвергаются также рискообразующие факторы. Автором [10] предложена классификация, основанная на следующих критериях: масштаб воздействия, степень воздействия, степень зависимости от исходного события, тип информации, место проявления, размер ущерба и т.д. Автор приводит качественную характеристику риска для возможности отнесения его к той или иной группе. Автор [11] предлагает первый уровень классификации по следующим критериям (основаниям): по времени возникновения, факторам возникновения, характеру последствий, методам оценки.

Анализ различных подходов позволяет определить общие черты и выделить три составляющие геотехнического риска (рискованной ситуации):

- 1) **причина** (фактор, рискообразующий фактор, фактор возникновения, исходное событие),
- 2) **проявление** (проявление рискованной ситуации, место проявления, воздействие, распространение, длительность, рискованная ситуация),
- 3) **последствие** (характер последствий, размер ущерба, реализация каскадного сценария развития).

Следует отметить, что определению вероятности наступления рискованной ситуации предшествует идентификация (этап качественного анализа), которая будет основываться на классификации. На этапе качественного анализа важно изучить факторы возникновения и возможные последствия с оценкой их размера.

Сформулируем общие принципы классификации геотехнических рисков при строительстве метрополитена:

1. Структура классификации – многоуровневая.
2. Основанием (признаком, критерием) первого уровня классификации будет тип строящегося сооружения метрополитена (типологическая классификация).
3. Классификация выполняется по трем направлениям (составляющим рискованной ситуации):
 - 1 – классификация рискообразующих факторов;
 - 2 – классификация проявления рискованных ситуаций;
 - 3 – классификация последствий рискованных ситуаций.
4. Учет специфики природно-технической геосистемы (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда» [12–15] при назначении критериев второго и последующих уровней и состава классификационных групп.

Типологическая классификация (типологии) сооружений метрополитена

Подземная линия метрополитена является элементом сложной природно-технической геосистемы (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда». Наиболее значимыми для рассмотрения являются этапы строительства и эксплуатации линии. На этапе строительства рассматривается подземное сооружение, находящееся в процессе создания. Помимо отсутствия при строительстве перевозки пассажиров и работы постоянных инженерных систем отличительной особенностью является наличие изменений, происходящих с сооружением во времени, в породном массиве, в окружающей среде, а также связанные с этим процессом проектные ситуации и предельные состояния. Также отметим, что характерной особенностью строительства метрополитена является изменение функций одного и того же сооружения в зависимости от стадии жизненного цикла проекта. Например, при строительстве и эксплуатации подземной линии метрополитена вертикальные стволы могут выполнять следующие функции: вскрывающая и обслуживающая выработка для сооружения подходов к выработкам (этап строительства) и вентиляция (этап эксплуатации). Необходимость строительства временных горных выработок является еще одной особенностью подземных сооружений метрополитена при строительстве линий глубокого заложения. Это выработки околоствольных дворов рабочих стволов (обгонные выработки, камеры водоотливных и вентиляционных установок, подземные склады взрывчатых материалов, камеры ремонтных депо и т.д.), подходы и вспомогательные выработки. При этом размеры и сложность возведения этих выработок практически не отличаются от постоянных сооружений метрополитена. Таким образом, подземные сооружения метрополитена включают в себя особенности природно-технической геосистемы (ПТГС) с одной стороны, и транспортной системы – с другой (рис. 1), и представляют собой отдельное множество подземных сооружений.

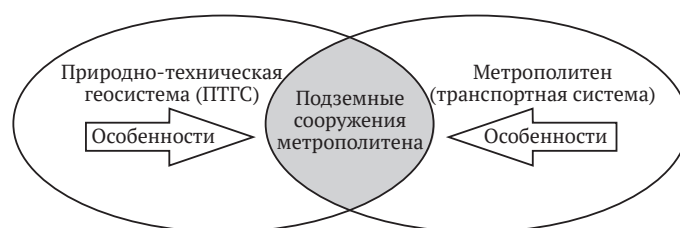


Рис. 1. Положение сооружения метрополитена в природно-технической геосистеме и транспортной системе

Fig. 1. The position of a metro structure in natural-and-technical geosystem and transport system

Проведенный в ходе исследования анализ позволяет выявить отсутствие общей типологической классификации подземных сооружений метрополитена. В то же время типологические классификации (типологии) существуют для большинства наземных промышленно-гражданских сооружений, транспортных сооружений [16–18]. Очевидно, что для такой сложной по технологии строительства, составу, структуре, функционалу системы, как метрополитен, необходима типологическая классификация (типология) сооружений на основании наиболее характерных признаков для каждой типологической группы. Для дальнейшей разработки классификации геотехнических рисков при строительстве сооружений метрополитена рассмотрим возможность разделения сооружений на устойчивые группы.

Используя практический опыт строительства, теоретические основы метрополитеностроения и утверждение о принадлежности сооружений метрополитена к природно-технической геосистеме (ПТГС) «массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда», можно выделить две основные группы классификационных признаков:

- 1 – признаки, зависящие от технологии строительства сооружения;
- 2 – признаки, зависящие от объемно-планировочных и конструктивных особенностей сооружения.

К 1-й группе признаков отнесем технологические масштабы вскрытия земной поверхности и пересечение геологических слоев. Ко 2-й – характеристики продольных и поперечных размеров, объем сооружаемых конструкций, пространственное положение в породном массиве. Всего выбрано пять определяющих признаков (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Признаки типологической классификации сооружений метрополитена

Parameters of the typological classification of metro structures

Наименование признака	Измеримость	Обозначение
Разнообразие геологических условий	Количественный	X_1
Степень нарушения целостности дневной поверхности, м ²	Количественный	X_2
Пропорции сооружения	Количественный	X_3
Объем сооружения, м ³	Количественный	X_4
Пространственное положение	Качественный	X_5

Далее необходимо преобразовать выбранные признаки для возможности дальнейшей сравнительной оценки и классификации. Для примера рассмотрим признаки X_1, X_2, X_3 :

1. Разнообразие геологических условий X_1 .

Количественный признак, который характеризуется количеством пересекаемых грунтовых слоев с различными литологией, гидрогеологией, инженерно-геологическими свойствами на 1 м наибольшего габарита сооружения:

$$X_1 = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{\Gamma_{\max}}, \quad (1)$$

где $\sum_{i=1}^n a_i$ – сумма пересекаемых различных геологических слоев (a_i – отдельный геологический слой), шт. (определяется данными геологического разреза участка линии); Γ_{\max} – наибольший габарит сооружения, м (например, глубина вертикального ствола, длина перегонного тоннеля, длина станции).

2. Степень нарушения целостности дневной поверхности X_2 .

Количественный признак, который характеризуется площадью вскрытия земной поверхности:

$$X_2 = S_{\text{вскр.з.п}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{вскр.з.п}}$ – площадь вскрытия земной поверхности в процессе возведения сооружения, м^2 (определяется технологией).

3. Пропорции сооружения X_3 .

Количественный признак, который характеризуется соотношением площади поперечного сечения к наибольшему габариту сооружения:

$$X_3 = \frac{S_{\text{попер.сеч}}}{\Gamma_{\max}}, \quad (3)$$

где $S_{\text{попер.сеч}}$ – площадь поперечного сечения сооружения, м^2 ; Γ_{\max} – наибольший габарит сооружения, м (например, глубина вертикального ствола, длина перегонного тоннеля, длина станции).

4. Объем сооружения X_4 .

Количественный признак, который характеризуется занимаемым объемом сооружения в породном массиве по наружному контуру:

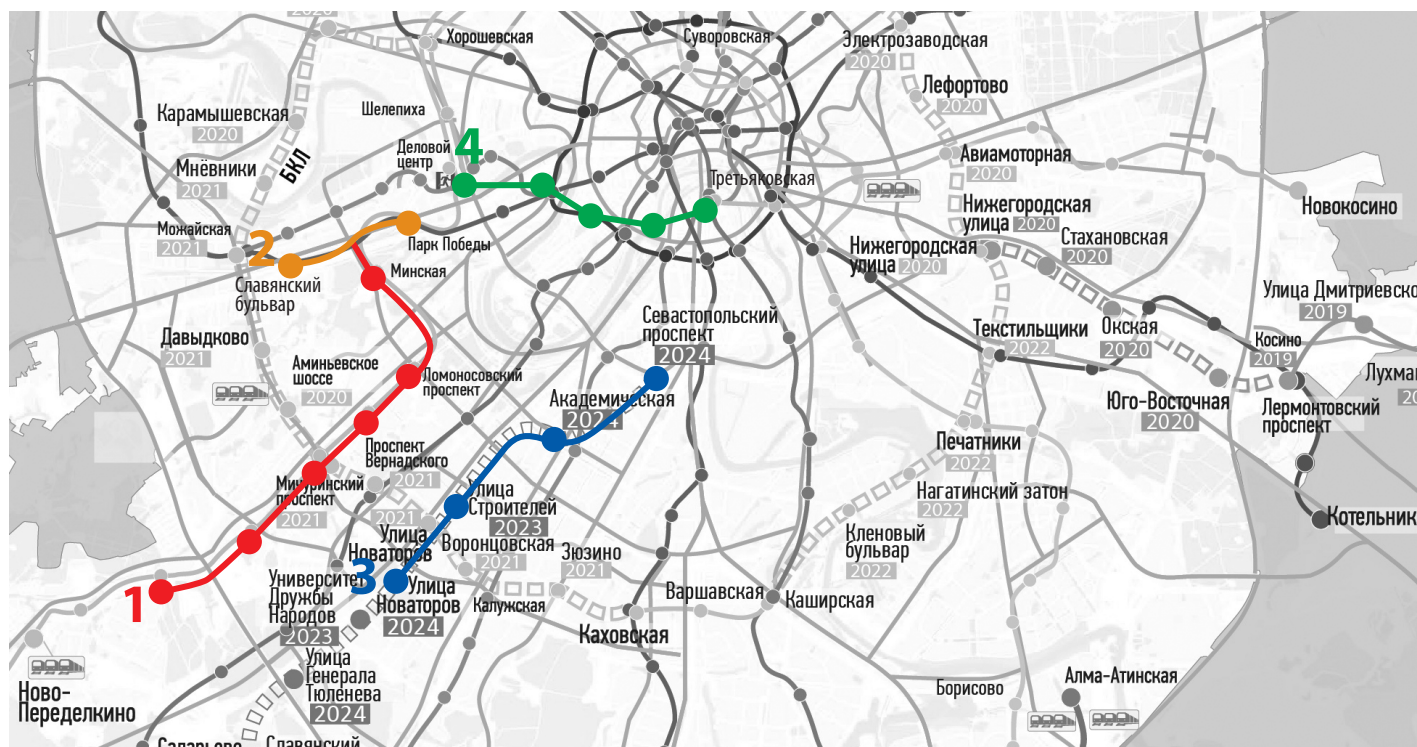
$$X_4 = V_{\text{соор}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{соор}}$ – объем, который занимает сооружение в породном массиве по наружному контуру, м^3 .

5. Пространственное положение X_5 .

Качественный признак, который характеризуется положением центральной оси сооружения в пространстве породного массива (вертикальное, горизонтальное, наклонное) и имеет геометрический смысл.

Для определения возможных значений признаков рассмотрены сооружения метрополитена города Москвы, расположенные на четырех проектируемых, строящихся и построенных участках линий мелкого и глубокого заложения (рис. 2). Всего выбрано 40 со-



- 1 – участок Калининско-Солнцевской линии (ст. «Парк Победы» – ст. «Солнцево»)
- 2 – участок Арбатско-Покровской линии (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский бульвар»)
- 3 – участок Коммунарской линии (ст. «Улица Новаторов» – ст. «Севастопольский проспект»)
- 4 – участок Калининско-Солнцевской линии (ст. «Деловой центр» – ст. «Третьяковская»)

Рис. 2. Пространственное положение анализируемых участков линий метрополитена г. Москвы

Fig. 2. The spatial position of the analyzed sections of the Moscow metro lines

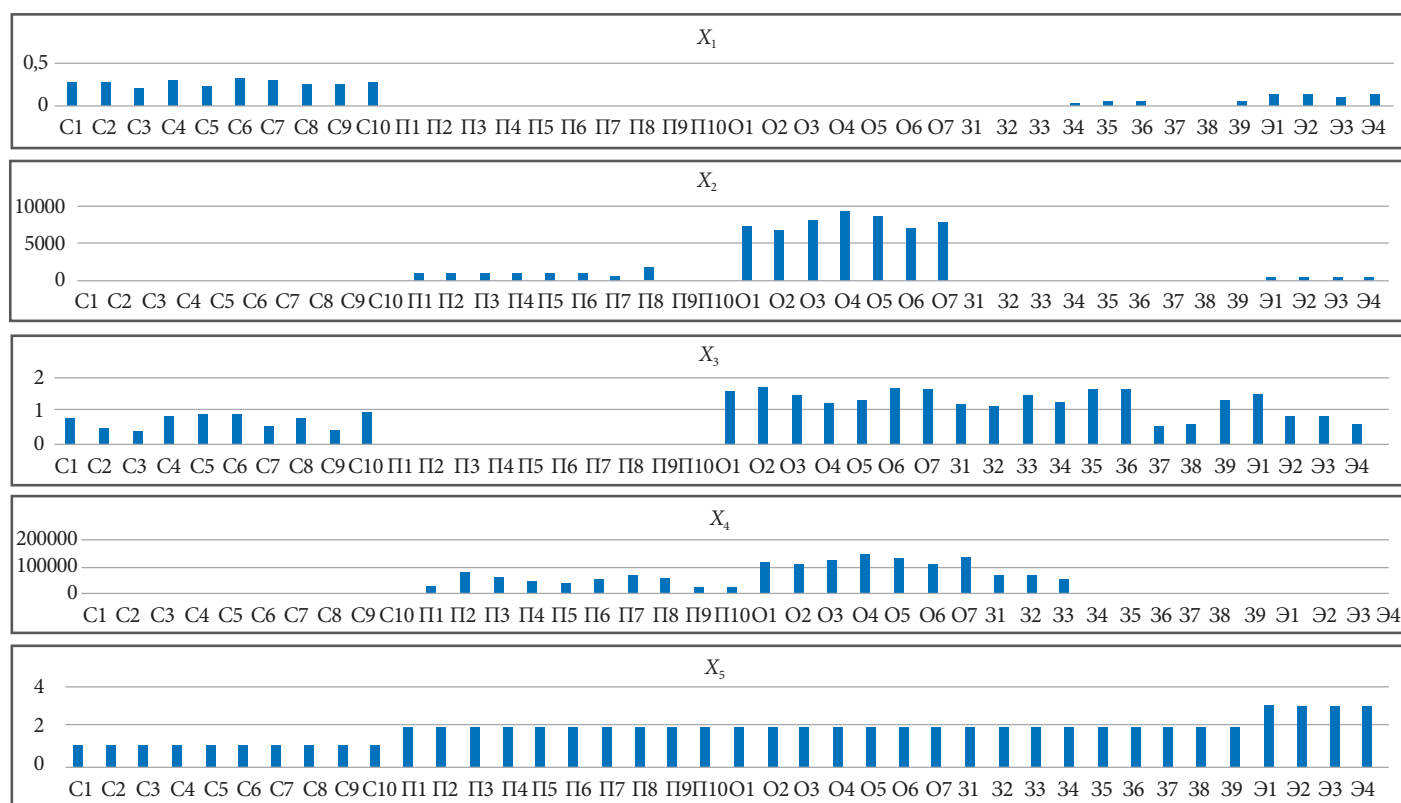


Таблица 2 / Table 2

Значения признаков типологической классификации (на примере сооружений метрополитена г. Москвы)

Values of the typological classification parameters (as exemplified by Moscow metro structures)

№	Сооружение	Обозначение	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	Ствол ш. 463 (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский бульвар»)	C1	0,2721	268,6663	0,7716	4168,6444	Вертикальное
2	Ствол ш. 463а (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский бульвар»)	C2	0,2920	268,6663	0,4548	2134,2244	Вертикальное
:	:	:	:	:	:	:	:
10	Ствол ВШ (ст. «Академическая» – ст. «Севастопольский пр-т»)	C10	0,2712	268,6663	0,9613	3346,2588	Вертикальное
11	Перегонный тоннель ст. «Раменки» – ст. «Ломоносовский пр-т»	П1	0,0025	1 001	0,0233	34335,9	Горизонтальное
12	Перегонный тоннель ст. «Ломоносовский пр-т» – ст. «Минская»	П2	0,0015	1 013	0,0104	77008,5	Горизонтальное
:	:	:	:	:	:	:	:
20	Перегонный тоннель от ст. «Дорогомиловская» до ст. «Плющиха»	П10	0,0019	268,66625	0,0268	29757,78	Горизонтальное
21	Станция «Улица Строителей»	O1	0,0101	7400	1,6216	113664	Горизонтальное
22	Станция «Академическая»	O2	0,0218	6875	1,7455	105600	Горизонтальное
:	:	:	:	:	:	:	:
27	Станция «Ломоносовский проспект»	O7	0,0156	7856	1,658	135600	Горизонтальное
28	Станция «Волхонка»	31	0,0165	268,6663	1,2178	71460,8000	Горизонтальное
29	Станция «Плющиха»	32	0,0161	208,5667	1,1895	73160,0000	Горизонтальное
:	:	:	:	:	:	:	:
36	Венткамера (ст. «Парк Победы» – ст. «Славянский б.-р»)	39	0,0732	122,6563	1,3833	2325,3663	Горизонтальное
37	Эскалаторный тоннель ст. «Волхонка»	Э1	0,1400	400	1,5240	3808,1331	Наклонное
:	:	:	:	:	:	:	:
40	Эскалаторный тоннель ст. «Парк Победы»	Э4	0,1328	400	0,5953	9748,8208	Наклонное

Рис. 3. Диаграммы признаков X_1 – X_5 Fig. 3. Diagrams of X_1 – X_5 parameters



оружий: вертикальные стволы, эскалаторные тоннели, перегонные тоннели, станционные сооружения. Рассчитанные по формулам (1)–(4) значения признаков сведены в табл. 2.

В целях предварительной проверки предположения о наличии характерных типов сооружений построим столбчатые диаграммы признаков X_1 – X_5 (рис. 3).

Из рисунка видно, что в совокупности сооружений выделяются несколько групп в зависимости от признака. Однако нужно целостное разделение на основании всех признаков. В теории классификации выделяются три подобласти: кластеризация (кластер-анализ) и группировка, статистический анализ классификаций, дискриминация (дискриминантный анализ) [19]. Для целей нашего исследования применим методы кластерного анализа [20]. Последовательно проведен-

ная кластеризация с использованием программного комплекса Statistica с алгоритмом объединения «ближайший сосед» и евклидовой метрикой построения расстояний между объектами показала, что данные структурно неплохо разделены на пять основных кластеров. При уровне схожести приблизительно 0,42 хорошо отделены пять групп объектов на дендрограмме (рис. 4): (11–20); (21–27); (37–40); (1–10); (28–36). Данные группы соответствуют обозначениям наблюдений С1–С10, П1–П10, О1–О7, 31–39 и Э1–Э4 (табл. 2). При этом группа С1–С10 соответствует вертикальным стволам, П1–П10 – горизонтальным перегонным тоннелям, О1–О7 – станциям мелкого заложения, сооружаемым открытым способом, 31–39 – станциям глубокого заложения, сооружаемым закрытым способом, Э1–Э4 – эскалаторным тоннелям.

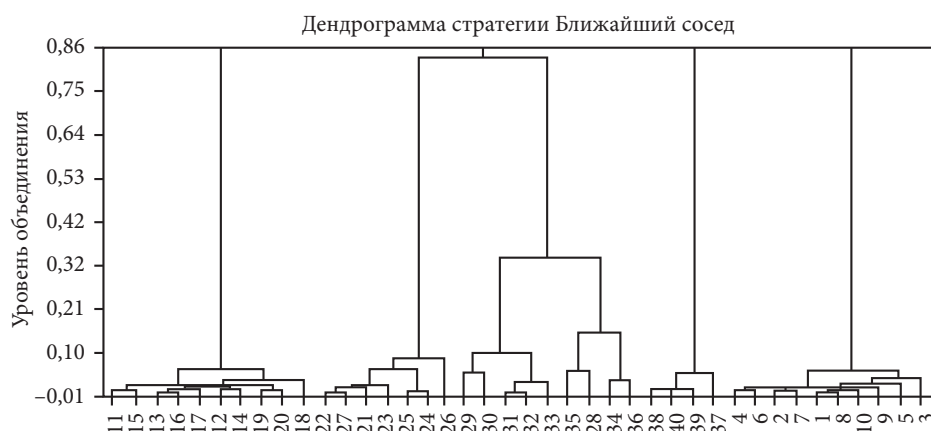


Рис. 4. Дендрограмма с выделенными кластерами

Fig. 4. Dendrogram with distinguished clusters

I уровень			II уровень			III уровень			IV уровень		
Критерий			Критерий			Критерий			Критерий		
№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа	№	Наименование	Группа
1	По типу сооружения	Вертикальный ствол									
		Горизонтальный (перегонный) тоннель									
		Сооружение станционного и дополнительного назначения мелкого заложения (открытый способ)									
		Сооружение станционного и дополнительного назначения глубокого заложения (закрытый способ)									
		Наклонный (эскалаторный) тоннель									
			2	По характеру происхождения							
			3	По характеру проявления							
									4	По месту проявления	
									3.1	По виду деформации	
									3.2	По виду разрушения	
									4.1	По точке локализации	

Рис. 5. Общая форма классификации (на примере классификации проявления рисков ситуаций)

Fig. 5. The classification general form (as exemplified by the classification of hazard materialization)



Таким образом, выполненный кластерный анализ подтверждает наличие характерных типов сооружений метрополитена. В табл. 3 представлена типологическая классификация (типология) сооружений метрополитена.

Таблица 3 / Table 3

Типологическая классификация (типология) сооружений метрополитена

Typological classification (typology) of metro structures

Вертикальный ствол	Горизонтальный (перегонный) тоннель	Сооружение станционного и дополнительного назначения мелкого заложения (открытый способ)	Сооружение станционного и дополнительного назначения глубокого заложения (закрытый способ)	Наклонный (эскалаторный) тоннель

Учитывая установленные принципы и критерии классификации, рассмотрим общую форму классификации на примере классификации проявления рисков ситуаций (рис. 5). Типология сооружений метрополитена является основанием (критерием) первого уровня.

Заключение

1. Предложенная типология основывается на учете особенностей метрополитена как природно-технической геосистемы с одной стороны, и как сложной подземной транспортной системы – с другой стороны. Типология составляет основу адаптированной

классификации геотехнических рисков при строительстве объектов метрополитена, которая будет использоваться в методике анализа риска на основании экспертно-статистического подхода при формировании шифра рисков ситуации в информационно-аналитическом архиве рисков и идентификации рисков при экспертной оценке [21].

2. Типология рассматривает сооружения метрополитена не только с позиции их функционального назначения после ввода в эксплуатацию. Она учитывает динамическую природу процесса строительства подземного объекта, изменение его функций на различных стадиях жизненного цикла. Такой подход соответствует задачам управления геотехническими рисками, так как наличие данных рисков определяется как неотъемлемый элемент процесса строительства подземного сооружения.

3. Исходя из типологии будут определяться рискообразующие факторы, проявления рисков ситуаций, последствия проявлений, а также формироваться классификационные группы критериев следующих уровней. Это позволит более точно производить идентификацию и прогноз возможного геотехнического риска, подбирать наиболее эффективные мероприятия по его минимизации, определять максимально приемлемый размер ущерба.

4. Предложенная типология сооружений метрополитена актуальна для включения в образовательные программы подготовки горных инженеров и риск-менеджеров для формирования необходимых компетенций в области управления рисками при комплексном освоении подземного пространства городов.

Список литературы

1. Кауфман Л. Л., Лысиков Б. А. *Геотехнические риски в подземном строительстве (обзор зарубежного опыта)*. Донецк: Норд-Пресс; 2009. 362 с.
2. Власов С. Н., Маковский Л. В., Меркин В. Е. *Аварийные ситуации при строительстве и эксплуатации транспортных тоннелей и метрополитенов*. М.: ТИМР; 2000. 197 с.
3. Гарбер В. А. Нештатные ситуации в подземных транспортных сооружениях. *Подземные горизонты*. 2018;(16):20–25.
4. Мазаник Т. А., Потапов М. А., Потапова Е. В. Рекомендации по минимизации деформаций земной поверхности (на примере применения стволопроходческого комплекса для строительства метро. *Метро и тоннели*. 2016;(3):12–16.
5. Потапов М. А., Потапова Е. В. Стволопроходческие комплексы: практика применения для проходки вертикальных стволов московского метрополитена за последние 10 лет. *Метро и тоннели*. 2016;(2):12–16.
6. Rita L. Sousa. *Risk Analysis for Tunneling Projects: Thesis (Ph. D.)* Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/58282>
7. Atkins W.S. *The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground*. HSE Books; 2006. 78 p. URL: <https://www.hse.gov.uk/Research/rpdf/rr453.pdf>
8. Понкин И. В., Редькина А. И. Классификация как метод научного исследования, в частности в юридической науке. *Вестник Пермского университета. Юридические науки*. 2017;37:249–259. <https://doi.org/10.17072/1995-4190-2017-37-249-259>
9. Куликова Е. Ю., Корчак А. В., Левченко А. Н. *Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве*. М.: Изд-во Моск. гос. гор. ун-та, 2005. 206 с.
10. Кофан. О. С. *Повышение качества и безопасности строительства тоннелей метрополитена на основе анализа риска: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11*. СПб.; 2002. 146 с.
11. Чунюк Д. Ю. Особенности классификации и составляющие геотехнического риска в строительстве. *Промышленное и гражданское строительство*. 2013;(9):42–44.



12. Куликова Е. Ю. Методика интегральной оценки риска в шахтном и подземном строительстве. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(2-1):124–133. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133>
13. Kulikova E. Yu. Defects of urban underground structure and their prediction. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451(1):012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012108>
14. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
15. Куликова Е. Ю., Виноградова О. В. Риски как причина снижения промышленной безопасности при строительстве подземных сооружений. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020;(7):146–154. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-146-154>
16. Рачкова О. Г. *Архитектура транспортных сооружений*. 2-е изд. М.: Юрайт; 2018. 197 с.
17. Мубаракшина Ф. Д., Рачкова О. Г. К вопросу о современной типологии и некоторых проблемах архитектуры транспортных сооружений. *Известия КГАСУ*. 2012;(1):17–23.
18. Калабин А. В. Типология жилых зданий малой и средней этажности: современное состояние. *Академический вестник УРАЛНИИПРОЕКТ РААСН*. 2014;(1):63–69.
19. Орлов А. И. Математические методы теории классификации. *Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ*. 2014;95:23–45.
20. Енюкова И. С. (ред.) *Факторный, дискриминантный и кластерный анализ*. М.: Финансы и статистика; 1989. 215 с.
21. Potapova E. V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). 6–12 September 2020. Sochi*. 2020;962:042052.

References

1. Kaufman L. L., Lysikov B. A. *Geotechnical Risks in Underground Construction (Review of Foreign Experience)*. Donetsk: Nord-Press; 2009. 362 p. (In Russ.).
2. Vlasov S. N., Makovsky L. V., Merkin V. E. *Emergency situations during the construction and operation of transport tunnels and subways*. Moscow: TIMP; 2000. 197 p. (In Russ.).
3. Garber V. A. Abnormal situations at underground transport facilities. *Podzemnye gorizonty*. 2018;(16):20–25. (In Russ.).
4. Mazanik T. A., Potapov M. A., Potapova E. V. Recommendations to minimize deformations of earth's surface (for example use of vsm complex for subway building). *Metro i tonneli*. 2016;(3):12–16.
5. Potapov M. A., Potapova E. V. Vertical shaft sinking machine: application practice for sinking vertical shafts of the moscow metro over last 10 years. *Metro i tonneli*. 2016;(2):12–16.
6. Rita L. Sousa. *Risk Analysis for Tunneling Projects: Thesis (Ph. D.)* Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2010. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/58282>
7. Atkins W.S. *The risk to third parties from bored tunnelling in soft ground*. HSE Books; 2006. 78 p. URL: <https://www.hse.gov.uk/Research/rpdp/rr453.pdf>
8. Ponkin I. V., Redkina A. I. Classification as a method of scientific research, particularly in jurisprudence *Perm university herald. Juridical sciences*. 2017;37:249–259. <https://doi.org/10.17072/1995-4190-2017-37-249-259>
9. Kulikova E. Yu., Korchak A. V., Levchenko A. N. *Risk management strategy in urban underground construction activity*. Moscow: MSU Publ. House; 2005. 206 p. (In Russ.).
10. Kofan O. S. *Improving the quality and safety of metro tunnel construction based on risk analysis: Ph.D. thesis in Engineering Science*. 05.23.11. St. Petersburg; 2002. 146 p. (In Russ.).
11. Chunyuk D. Yu. Features of classification and components of geotechnical risk in construction. *Industrial and civil engineering*. 2013;(9):42–44 (In Russ.).
12. Kulikova E. Yu. Methods of forming an integral risk assessment in mine and underground construction. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(2-1):124–133. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2021-21-0-124-133>
13. Kulikova E. Yu. Defects of urban underground structure and their prediction. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;451(1):012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012108>
14. Kulikova E. Yu., Balovtsev S. V. Risk control system for the construction of urban underground structures. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;962(4):042020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/962/4/042020>
15. Kulikova E. Yu., Vinogradova O. V. Risks as a cause of industrial safety inhibition in underground construction. *MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2020;(7):146–154. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-7-0-146-154>



16. Rachkova O. G. *Architecture of transport structures*. 2nd ed. Moscow: Yurait; 2018. 197 p. (In Russ.).
17. Mubarakshina F. D., Rachkova O. G. Modern typology and some problems of the architecture of transport facilities resume. *Izvestiya KGASU*. 2012;(1):17–23. (In Russ.)
18. Kalabin A. V. Typology of residential buildings, small and medium number of storeys: current status. *Akademicheskij vestnik uralniiproekt RAASN*. 2014;(1):63–69.
19. Orlov A. I. Mathematical methods of classification theory. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2014;95:23–45.
20. Enyukova I. S. (ed.) *Factorial, Discriminant, and Cluster Analysis*. Moscow: Finansy i Statistika; 1989. (In Russ.)
21. Potapova E. V. Expert-statistical approach to the analysis of geotechnical risks in the construction of metro facilities. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). 6–12 September 2020. Sochi. 2020;962:042052*.

Информация об авторе

Елена Владимировна Потапова – главный специалист производственно-технического отдела, Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», г. Москва, Россия, e-mail: elka23sp@yandex.ru

Information about the author

Elena V. Potapova – Chief Specialist of the Production and Technical Department, Rosatom State Nuclear Energy Corporation, Moscow, Russian Federation; e-mail: elka23sp@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.01.2021

Поступила после рецензирования 10.03.2021

Принята к публикации 12.03.2021

Received 09.01.2021

Revised 10.03.2021

Accepted 12.03.2021