Статья поступила в редакцию: 16.08.2026
Статья принята к публикации: 17.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 624.15+577.4+338.2

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23602

Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и методы его минимизации

Киптенко Роман Юрьевич
независимый исследователь
Российская Федерация, г. Москва
E-mail: keeptenko@gmail.com

Criteria for assessing the impact of underground construction on the urban ecosystem and methods for its mitigation

Kiptenko Roman
independent researcher
Russian Federation, Moscow

Аннотация

Цель исследования состоит в систематизации критериев оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и обосновании методов снижения возникающих экологических, геотехнических и социально-экономических рисков. Исследование основано на сравнительном анализе научных публикаций, материалов территориального планирования и работ, посвященных использованию городского подземного пространства, изменению грунтовых вод, деформациям земной поверхности и экологическим последствиям строительства. Выделены шесть групп критериев: гидрологические, геотехнические, загрязняющие и ресурсные, биологические, градостроительные и социально-экономические. Предложено проводить оценку на предпроектном, строительном и эксплуатационном этапах с обязательным сопоставлением фактических показателей с исходными и предельно допустимыми значениями. Сформирована последовательность мероприятий по минимизации воздействия, включающая выбор участка и глубины размещения, инженерную защиту, снижение загрязнения, инструментальный мониторинг и восстановление нарушенных территорий. Предложен интегральный индекс экологического влияния, позволяющий сопоставлять варианты проекта и динамику состояния среды. Сделан вывод о необходимости раннего учета природных ограничений и включения подземных объектов в систему городского планирования. Практическая значимость подхода связана с возможностью его

Библиографическое описание: Киптенко Р.Ю. Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и методы его минимизации // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23602

применения при экологическом обосновании подземных сооружений, выборе защитных мероприятий и контроле наиболее чувствительных компонентов городской среды в ходе строительства.

Abstract

The purpose of the study is to systematize criteria for assessing the impact of underground construction on the urban ecosystem and to substantiate methods for reducing related environmental, geotechnical, and socioeconomic risks. The study is based on a comparative analysis of scientific publications, territorial planning materials, and studies addressing urban underground space, groundwater changes, ground deformation, and environmental consequences of construction. Six groups of criteria are identified: hydrological, geotechnical, pollution and resource-related, biological, urban planning, and socioeconomic. The assessment is proposed for the pre-design, construction, and operational stages, with mandatory comparison of actual indicators with baseline and permissible values. A sequence of impact mitigation measures is developed, including site and depth selection, engineering protection, pollution reduction, instrumental monitoring, and restoration of disturbed areas. An integrated environmental impact index is proposed to compare project alternatives and changes in environmental conditions. The results confirm the importance of considering natural constraints at an early stage and integrating underground facilities into urban planning processes.

Ключевые слова: подземное строительство, городская экосистема, подземное пространство, грунтовые воды, осадка поверхности, экологический мониторинг, устойчивое развитие города.

Keywords: underground construction, urban ecosystem, underground space, groundwater, ground settlement, environmental monitoring, sustainable urban development.

Введение

Увеличение плотности городской застройки повышает потребность в размещении транспортных объектов, парковок, инженерных сетей и технических помещений под землей. Так, использование подземного пространства уменьшает нагрузку на дефицитные наземные территории, однако связано с необратимым преобразованием геологической среды. По этой причине подземное пространство должно рассматриваться как ограниченный городской ресурс, использование которого требует согласования с долгосрочными направлениями территориального развития [10].

В частности, подземные сооружения позволяют решать транспортные и инфраструктурные задачи современных городов, но способны изменять движение грунтовых вод, напряженное состояние массива, устойчивость зданий и условия функционирования наземных территорий. Риски затопления подземной инфраструктуры и необходимость учета климатических воздействий рассматриваются в современных исследованиях [1]. Экологическая оценка проекта не должна ограничиваться объемом выбросов и строительных отходов, т.к. целесообразно учитывать изменения, возникающие под землей и проявляющиеся на поверхности спустя продолжительный период.

Цель исследования состоит в систематизации критериев оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему и определении методов его минимизации.

Материалы и методы

Исследование основано на анализе научных публикаций по планированию городского подземного пространства, гидрогеологии, геотехнике и экологической оценке. Применялись методы сравнения, группировки и содержательного обобщения. Критерии отбирались по трем признакам: измеримость, связь с подземным строительством и возможность использования результата при выборе защитных мероприятий. Сопоставимость критериев при интегральной оценке обеспечивается нормированием исходных показателей и последующим объединением оценок внутри каждой группы.

Оценку предлагается проводить относительно исходного состояния территории. До начала работ фиксируются уровни грунтовых вод, параметры грунтов, состояние зданий, растительности, водных объектов, воздуха и акустической среды. В период строительства контролируются отклонения, а после ввода объекта оценивается устойчивость достигнутого состояния.

Результаты и обсуждение

Экологические последствия подземного строительства формируются на нескольких взаимосвязанных уровнях. В работах, посвященных вопросам городского подземного пространства, отмечается необходимость учитывать удобство городской среды, доступность территорий, состояние инфраструктуры и долгосрочные условия развития города [6]. Исследования устойчивого использования подземного пространства также показывают значимость долгосрочного планирования, сохранения подземных ресурсов и учета интересов будущего городского развития [3]. Поэтому критерии должны охватывать природные, технические и социально-экономические характеристики (табл. 1).

Таблица 1. Критерии оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему

Группа критериев	Оцениваемые показатели	Возможные последствия
Гидрологические	уровень и направление движения грунтовых вод; водоприток; радиус понижения; качество воды	подтопление или осушение территории; изменение водообмена; загрязнение вод
Геотехнические	осадка поверхности; горизонтальные перемещения; деформации зданий; вибрация; устойчивость массива	повреждение сооружений и коммуникаций; образование трещин; нарушение устойчивости грунта
Загрязнение и ресурсы	пыль; шум; качество почвы; строительные воды; объем извлеченного грунта; энергопотребление	ухудшение состояния воздуха и почвы; образование отходов; рост ресурсных затрат
Биологические	состояние растительности; площадь нарушенных участков; условия обитания животных; восстановление озеленения	повреждение корневых систем; сокращение зеленых зон; изменение мест обитания
Градостроительные	нарушение наземного использования; доступность территории; срок восстановления поверхности	ограничение городской мобильности; ухудшение качества общественных пространств
Социально-экономические	жалобы населения; риски для здоровья; ущерб зданиям; затраты на восстановление	рост расходов; снижение безопасности и качества городской среды

При этом существует связь между источниками воздействия, группами критериев и итоговым решением. Исходными факторами выступают выемка грунта, водопонижение, работа техники, транспортирование материалов и эксплуатация объекта. Их последствия оцениваются по показателям таблицы 1, после чего определяется допустимость воздействия и состав защитных мероприятий (см. рис. 1):

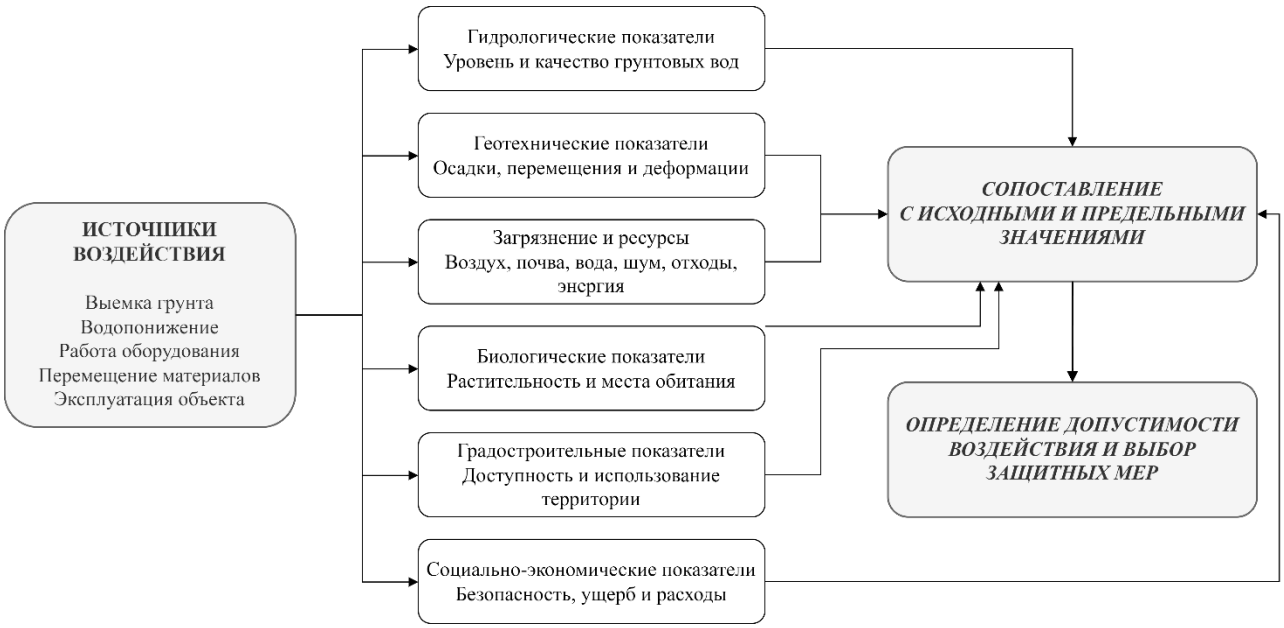

Рисунок 1. Система оценки влияния подземного строительства на городскую экосистему

Отметим, что социально-экологические потери могут быть связаны с изменением запасов грунтовых вод, геологических ресурсов, состояния организмов, исторической среды и возможности последующего использования подземного пространства [7]. Поэтому решение о размещении объекта должно учитывать ценность сохраняемых ресурсов и последствия для будущих проектов.

Особый интерес представляют гидрологические критерии; дренирование тоннелей способно приводить к снижению уровня грунтовых вод, изменению водного баланса, свойств почвы и состояния растительности [5]. Опыт Милана подтверждает, что изменение уровня грунтовых вод способно непосредственно взаимодействовать с подземными сооружениями и инфраструктурой, поэтому гидрогеологический мониторинг должен быть связан с оценкой эксплуатационных рисков [2]. Для участков со сложными гидрогеологическими условиями необходимо определять допустимое понижение уровня воды, контролировать водоприток и предусматривать противофильтрационные мероприятия.

Геотехническая оценка основывается на наблюдении за осадками, горизонтальными перемещениями, деформациями зданий и состоянием коммуникаций. Контроль должен начинаться до строительства, поскольку исходные дефекты необходимо отличать от изменений, вызванных работами. При приближении показателей к предупредительным значениям корректируются скорость проходки, давление на забой, параметры крепления и порядок водопонижения.

Минимизация воздействия предусматривает пять взаимосвязанных направлений:

1. выбор участка и глубины размещения с учетом гидрогеологических и градостроительных ограничений;

2. применение герметизации, предварительного закрепления грунта и регулируемого водоотлива;

3. снижение шума, пыли и вибрации, очистку строительных вод и контролируемое обращение с извлеченным грунтом;

4. инструментальный мониторинг грунтовых вод, поверхности, зданий и инженерных сетей;

5. восстановление покрытий, почвы и растительности после завершения работ.

Анализ временных рядов грунтовых вод и пространственная группировка участков позволяют выделять зоны с различными режимами и устанавливать для них отдельные правила подземного строительства [8], что повышает обоснованность решений и позволяет сосредоточить наблюдение на территориях с повышенной чувствительностью.

Последовательность управления воздействием представлена на рис. 2. При превышении допустимого значения работы должны быть пересмотрены: уточняется причина отклонения, изменяется технология, усиливаются защитные мероприятия и проводится повторная оценка. Продолжение строительства без изменений допускается при сохранении показателей в установленных пределах

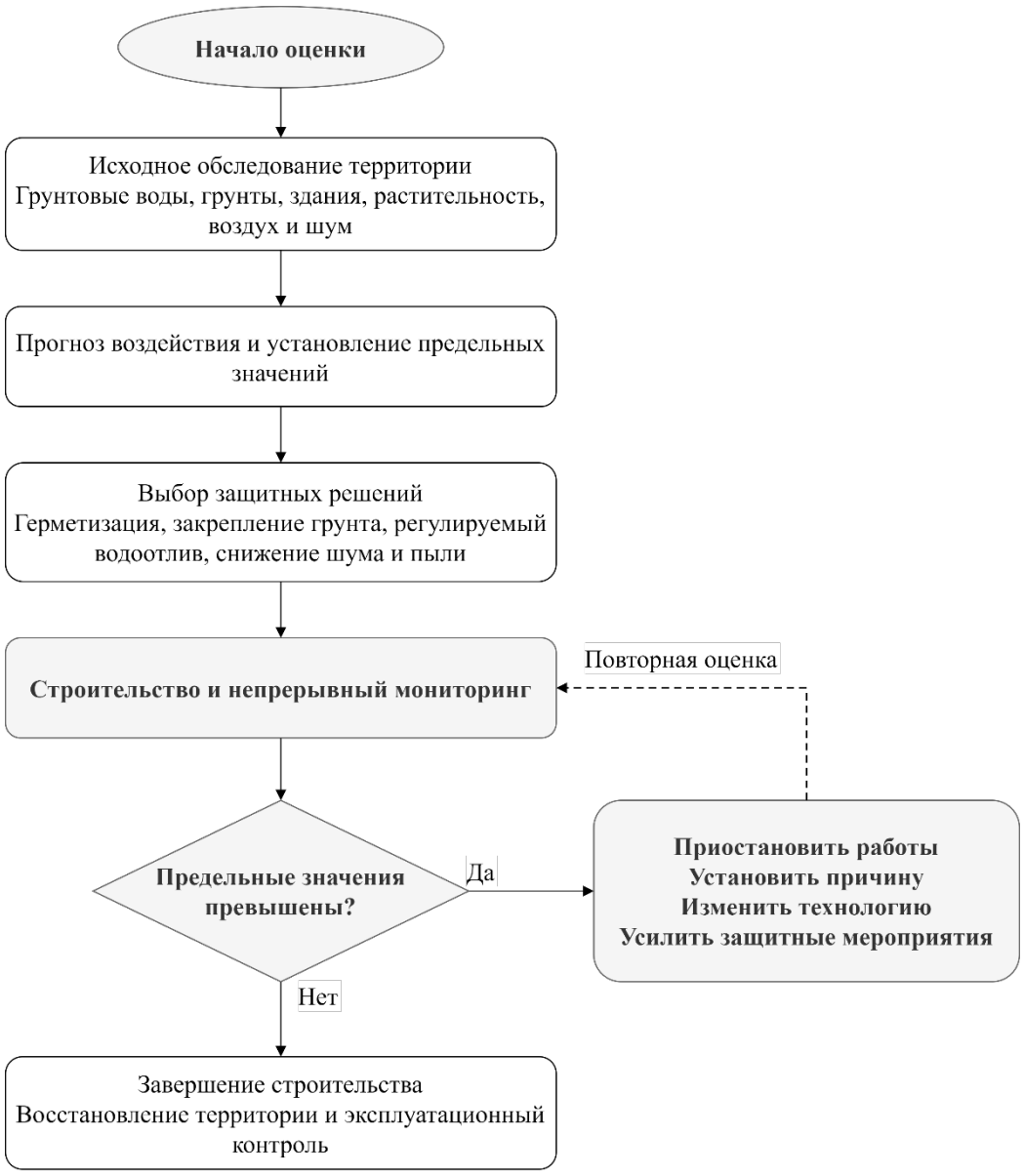

Рисунок 2. Алгоритм минимизации воздействия подземного строительства на городскую экосистему

Стоит указать, что практический интерес представляет опыт Хельсинки; городской подземный генеральный план регулирует размещение крупных подземных объектов, транспортных тоннелей и их соединений. При выборе территорий учитываются наземное использование, транспортная доступность, собственность, ландшафтные и природоохранные характеристики [9]. Сходный принцип реализован в методе Deep City, где пространственное планирование подземной части города связывается с учетом подземных ресурсов и долгосрочной ценности вариантов их использования [4]. Опыт Хельсинки показывает, что снижение экологических рисков начинается на стадии городского планирования, до разработки отдельного строительного проекта.

Моделируя совокупное воздействие подземного строительства, предлагается использовать интегральный индекс экологического влияния, объединяющий шесть групп критериев, представленных в таблице 1:

$$I_{ue} = \sum_{i=1}^{6} w_i K_i,$$

где I_{ue} – интегральный индекс влияния подземного строительства на городскую экосистему; K_i – нормированная оценка соответствующей группы критериев; w_i – вес группы критериев, причем:

$$\sum_{i=1}^{6} w_i = 1.$$

Нормирование показателей, увеличение которых свидетельствует об усилении отрицательного воздействия, выполняется по формуле:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}},$$

где x_{ij} – фактическое значение показателя; $x_{\min}$ и $x_{\max}$ – минимальное и предельно допустимое значения. При отсутствии обоснованных экспертных оценок группам могут присваиваться равные веса, составляющие 1/6. Если проект реализуется на территории с повышенной гидрогеологической или геотехнической чувствительностью, веса соответствующих групп увеличиваются с последующим повторным нормированием.

В данной формуле z соответствует нормированной оценке отдельного показателя, а индексы i и j обозначают соответственно группу критериев и показатель внутри группы. Границы нормирования устанавливают отдельно для каждого показателя. Для характеристик, увеличение которых отражает улучшение состояния среды, результат расчета вычитается из единицы. Формула применима при $x_{max} > x_{min}$; полученные оценки ограничиваются диапазоном от 0 до 1.

Нормированные показатели в пределах каждой группы предлагается объединять путем вычисления среднего арифметического при равной значимости показателей:

$$K_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} z_{ij}.$$

Здесь n_i – число показателей, включенных в i-ю группу. При наличии обоснованных экспертных оценок допускается использование внутригрупповых весов, сумма которых равна единице.

Значения индекса предлагается интерпретировать следующим образом:

от 0 до 0,20 включительно – низкое воздействие;

свыше 0,20 до 0,40 включительно – умеренное;

свыше 0,40 до 0,60 включительно – существенное;

свыше 0,60 до 0,80 включительно – высокое;

свыше 0,80 до 1,00 включительно – критическое воздействие.

При этом интегральная оценка не отменяет отдельного контроля показателей, превышающих установленные пределы, поскольку низкие значения одних критериев не должны компенсировать критические гидрологические или геотехнические отклонения.

Приведенные границы составляют ориентировочную авторскую шкалу и подлежат уточнению при проверке метода на фактических данных. При превышении обязательных предельных значений отдельный показатель рассматривается самостоятельно вне зависимости от величины интегрального индекса.

Результативность (динамика реализации) защитных мероприятий определяется путем сопоставления значений индекса до и после их реализации:

$$E_m = \frac{I_{ue}^0 - I_{ue}^1}{I_{ue}^0} \cdot 100\%,$$

где I_{ue}^0 – исходный уровень воздействия, а I_{ue}^1 – уровень после применения защитных решений. Предлагаемый индекс позволяет сопоставлять варианты проекта, выявлять наиболее значимые источники риска и оценивать изменение экологической нагрузки на разных этапах строительства.

Относительное снижение рассчитывается при положительном исходном значении индекса. При нулевом исходном уровне используют абсолютное изменение показателя.

Заключение

Таким образом, влияние подземного строительства на городскую экосистему выражается в изменении грунтовых вод, деформации массива, загрязнении среды, нарушении растительности и временном ограничении использования наземных территорий. Для оценки предложены шесть групп критериев, охватывающих природные, технические и социально-экономические последствия.

Основными условиями минимизации воздействия являются исходное обследование, прогнозирование изменений, установление предельных значений, постоянный мониторинг и корректировка строительных решений. Завершающим этапом становится восстановление нарушенных поверхностей и контроль состояния территории после ввода объекта. Включение подземных сооружений в территориальное планирование позволяет предупреждать конфликты между объектами и сохранять возможности дальнейшего развития городской среды.

Список литературы

1. Broere W., Mitew-Czajewska M. Urban underground space for resilient cities // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2026. – T. 170. – Art. 107412. – DOI: 10.1016/j.tust. 2025.107412.
2. Gattinoni P., Scesi L. The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2017. – T. 62. – P. 103–114. – DOI: 10.1016/j.tust.2016.12.001.

3. Hu W., Dong J., Chen Z., Ren R. Linking underground space development with sustainable urban futures: Research trends and knowledge framework // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2026. – T. 168, Ч. 2. – Art. 107227. – DOI: 10.1016/j.tust.2025.107227.
4. Li H.-Q., Parriaux A., Thalmann P., Li X.-Z. An integrated planning concept for the emerging underground urbanism: Deep City Method, Part 1 – concept, process and application // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2013. – T. 38. – P. 559–568. – DOI: 10.1016/j.tust.2013.04.010.
5. Liu X., Zhuang Y., Zhou X., Liu L., Chen H., Deng J., Xu B., Deng Z. Effect of groundwater decline on plant induced by tunnel excavation and calculation of ecological water level based on SPAC model // Journal of Intelligent Construction. – 2024. – T. 2, № 2. – Art. 9180010. – DOI: 10.26599/JIC.2024.9180010.
6. Peng F.-L., Dong Y.-H., Wang W.-X., Ma C.-X. The next frontier: data-driven urban underground space planning orienting multiple development concepts // Smart Construction and Sustainable Cities. – 2023. – T. 1. – DOI: 10.1007/s44268-023-00003-5.
7. Qiao Y.-K., Peng F.-L., Sabri S., Rajabifard A. Socio-environmental costs of underground space use for urban sustainability // Sustainable Cities and Society. – 2019. – T. 51. – DOI: 10.1016/j.scs.2019.101757.
8. Sartirana D., Rotiroti M., Bonomi T., De Amicis M., Nava V., Fumagalli L., Zanotti C. Data-driven decision management of urban underground infrastructure through groundwater-level time-series cluster analysis: the case of Milan (Italy) // Hydrogeology Journal. – 2022. – T. 30. – P. 1157–1177. – DOI: 10.1007/s10040-022-02494-5.
9. Vähäaho I. Urban Underground Space: Sustainable Property Development in Helsinki. – 2nd updated ed. (Urban Environment Publications 2018:11). – Helsinki: City of Helsinki, Urban Environment Division, 2018. – 52 P.
10. Wu Y., Wen H., Fu M. A Review of Research on the Value Evaluation of Urban Underground Space // Land. – 2024. – T. 13, № 4. – Art. 474. – DOI: 10.3390/land13040474.