



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра прикладной и системной экологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

На тему Экологическая безопасность подземного пространства
городских территорий

Исполнитель Федотова Татьяна Денисовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат технических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Бобылев Николай Геннадьевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Алексеев Денис Константинович
(фамилия, имя, отчество)

« 20 » 06 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Введение.....	4
1. Подземные городские пространства	6
1.1 Нормативно-правовая база, регулирующая освоение подземного пространства	6
1.2 Освоение подземного пространства	10
1.3 Классификация подземных пространств.....	12
1.4 Роль подземных пространств в городской инфраструктуре	14
1.5 Урбанизация и экологические проблемы.....	16
1.6 Экологическая безопасность в контексте подземного строительства ..	18
2. Экология и подземное пространство	21
2.1 Экологические аспекты подземного строительства.....	21
2.2 Экологические аспекты использования подземного пространства в условиях урбанизации	23
2.3 Взаимодействие между подземными сооружениями и городской средой	26
3. Методика оценки и управления экологической безопасностью подземного пространства	30
3.1 Обоснование методов оценки экологической безопасности.....	30
3.2 Мониторинг и аудит экологической безопасности.....	31
3.3 Стратегии управления экологическими рисками.....	33
4. Методические рекомендации по обеспечению экологической безопасности подземного пространства	36
4.1.Рекомендации по обеспечению экологической безопасности.....	36
4.2.Практические подходы к снижению экологического воздействия	38
4.3.Организационно-технологические схемы освоения подземного пространства	41
5. Комплексная методика оценки экологической безопасности подземных пространств городских территорий	44
5.1. Концептуальные основы методики	44

5.2. Критерии и показатели экологической безопасности подземных сооружений	45
5.3. Алгоритм проведения оценки с учетом различных типов подземных сооружений	47
5.4. Математический аппарат для количественной оценки рисков.....	49
5.5. Методы интерпретации результатов и принятия управленческих решений.....	51
5.6. Обоснование и ограничения применения методики	52
Заключение	55
Список литературы	57
Приложение	61

Введение

Современная урбанизация характеризуется стремительным ростом городов, увеличением численности городского населения и, как следствие, усилением антропогенной нагрузки на окружающую среду. В условиях ограниченности земельных ресурсов и необходимости сохранения экологического баланса особую актуальность приобретает развитие подземного пространства городских территорий. Использование таких пространств способствует эффективному развитию городской инфраструктуры и оптимизации использования ограниченных территориальных ресурсов. Оно освобождает место на поверхности, разгружает дороги, снижает нагрузку на экосистему и улучшает социальную инфраструктуру.

Подземные пространства представляют собой важный ресурс для развития городской инфраструктуры, позволяя эффективно использовать территорию города, сохранять архитектурно-исторический облик центральных районов, снижать нагрузку на наземную транспортную сеть и улучшать экологическую обстановку. Однако освоение подземного пространства связано с рядом экологических рисков, которые могут негативно влиять на окружающую среду и здоровье населения.

Обеспечение экологической безопасности при освоении подземного пространства городских территорий является важной научно-практической задачей, требующей комплексного подхода к проектированию, строительству и эксплуатации подземных объектов. В настоящее время в мировой практике накоплен значительный опыт создания подземных сооружений различного назначения, разработаны нормативно-правовые документы, регулирующие вопросы экологической безопасности при подземном строительстве.

Цель работы заключается в разработке научно-обоснованных рекомендаций по обеспечению экологической безопасности при освоении подземного пространства городских территорий.

Задачи

1. Проанализировать нормативно-правовую базу, регулирующую вопросы экологической безопасности при освоении подземного пространства.
2. Изучить влияние подземных сооружений на экосистему города и определить потенциальные экологические риски при подземном строительстве.
3. Разработать методику оценки экологической безопасности при освоении подземного пространства городских территорий.
4. Сформулировать рекомендации по обеспечению экологической безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных объектов.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки научно-обоснованных подходов к обеспечению экологической безопасности при освоении подземного пространства городских территорий в условиях усиливающейся урбанизации и возрастающих экологических рисков.

Объектом исследования является подземное пространство городских территорий как компонент городской инфраструктуры.

Предметом исследования выступают экологические аспекты освоения подземного пространства городских территорий и методы обеспечения экологической безопасности при подземном строительстве.

1. Подземные городские пространства

Подземное пространство — это совокупность геометрически, функционально и технологически организованных участков земной коры под территорией города или иного населённого пункта, предназначенных для размещения инженерных сооружений, инфраструктурных систем, объектов транспортного, общественного, коммерческого, коммунального, производственного и иного назначения.

1.1 Нормативно-правовая база, регулирующая освоение подземного пространства

Нормативно-правовая база в Российской Федерации, регулирующая освоение подземного пространства, включает несколько ключевых документов. Основными нормативными актами являются:

1) закон о недрах - регулирует использование недр и определяет права и обязанности недропользователей. Он устанавливает общие правила для получения лицензий на геологическое изучение и добычу полезных ископаемых, но не содержит четких норм для подземного строительства.

2) земельный кодекс - определяет порядок использования земельных участков, включая процедуры получения прав на землю для подземных объектов. Однако его положения часто противоречат другим нормативным актам, что усложняет процесс согласования проектов.

3) градостроительный кодекс - регулирует вопросы градостроительного проектирования и планирования, включая освоение подземного пространства. Важно отметить, что необходима интеграция градостроительных норм с нормами о недропользовании для упрощения процедур.

На уровне субъектов Федерации также принимаются местные постановления. Например, в Санкт-Петербурге разработано постановление о процедуре предоставления земельных участков под подземное строительство,

которое включает несколько этапов: получение разрешения на изыскания, заключение договора аренды и получение окончательного разрешения на строительство.

Регулирующие действующие документы освоения подземного пространства в РФ, включают:

1) Федеральный закон от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 "О недрах" - определяет правовые основы использования недр, включая подземные воды и полезные ископаемые.

2) Градостроительный кодекс Российской Федерации (Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ) - регулирует градостроительную деятельность, включая проектирование и строительство подземных объектов.

3) Земельный кодекс Российской Федерации (Федеральный закон от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ) - устанавливает правила использования земельных участков, включая вопросы, связанные с подземным строительством.

4) Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" - содержит требования к безопасности подземных объектов.

5) Свод правил СП 248.1325800.2023 "Сооружения подземные. Правила проектирования" - определяет геотехнические требования к проектированию и эксплуатации подземных сооружений.

6) Свод правил СП 473.1325800.2019 "Здания, сооружения и комплексы подземные. Правила градостроительного проектирования" - содержит градостроительные требования к проектированию и строительству подземных объектов.

7) Постановление Правительства Москвы о Генеральном плане города, определяет стратегию использования подземного пространства в Москве, включая транспортные и пешеходные коммуникации.

8) Закон "Об основах платного землепользования в городе Москве" - регулирует платное использование земельных участков, включая подземные объекты.

Анализ действующих нормативных документов выявляет ряд противоречий и дублирующих положений. Так, СП 248.1325800.2023 и СП 473.1325800.2019 содержат пересекающиеся требования к проектированию подземных сооружений, однако отсутствует чёткое разграничение сфер применения этих документов. В результате проектировщики сталкиваются с неопределённостью при выборе нормативной базы, что может привести к недостаточному учёту экологических аспектов.

Кроме того, в СП 3.02.01–87 отсутствует раздел, посвящённый оценке и минимизации воздействия на грунтовые воды при строительстве тоннелей, несмотря на то что подобные работы могут существенно изменять гидрогеологический режим территории. Это свидетельствует о необходимости актуализации документа с учётом современных экологических требований.

Закон «О недрах» определяет недра как объекты геологического и ресурсного использования, но не содержит положений, направленных на оценку воздействия подземных работ на экологическое состояние территории. Градостроительный кодекс закрепляет требования к строительству подземных сооружений, однако в нём не прописаны чёткие критерии экологической безопасности — разрыв между геотехническими расчётами и контролем за сохранением качества почв и воды остаётся открытым. Земельный кодекс предоставляет право использовать подземную часть участка, но не устанавливает обязательных процедур экологического мониторинга при выдаче разрешений на новые котлованы и коммуникации.

СП 248.1325800.2023 и СП 473.1325800.2019 формируют общие требования к проектированию и градостроительному обоснованию подземных объектов, однако не содержат комплексных экологических разделов: вопросы гидрозащиты и защиты почв от загрязнения упоминаются фрагментарно и часто отсылают к другим СНиП, без учёта урбанистических и природоохранных особенностей. Федеральный закон № 384-ФЗ накладывает на проектировщиков обязанность обеспечивать безопасность при стихийных бедствиях, но не

затрагивает аспекты сохранения природных условий под городским ландшафтом.

После рассмотрения федеральных нормативных актов целесообразно проанализировать региональные особенности регулирования, поскольку именно на уровне субъектов Федерации зачастую принимаются решения, существенно влияющие на экологическую безопасность освоения подземного пространства.

Региональные акты Москвы дополняют федеральные нормы, но в них также недостаточно внимания уделено экологическим критериям: в московском Генплане прописаны глубинные ограничения и санитарные зоны, однако отсутствуют единые методики оценки воздействия на подземные водоносные горизонты.

Для устранения выявленных пробелов предлагается внести следующие изменения:

1) Внести в Федеральный закон «О недрах» (ст. 22, 23) положения, обязывающие проводить обязательную экологическую экспертизу всех проектов подземного строительства, затрагивающих водоносные горизонты.

2) Дополнить Градостроительный кодекс статьёй, предусматривающей разработку и утверждение экологических нормативов для подземных объектов (например, предельно допустимые концентрации загрязняющих веществ в подземных водах и почвах).

3) Включить в СП 248.1325800.2023 отдельный раздел, посвящённый методикам оценки воздействия на окружающую среду, с указанием конкретных критериев (уровень шума, вибрации, загрязнения воздуха и воды).

Эти меры позволят обеспечить комплексный и унифицированный подход к экологической безопасности при освоении подземного пространства.

Для повышения эффективности государственного контроля целесообразно разработать сквозной электронный реестр, интегрирующий данные кадастрового учёта, результатов экологического мониторинга и информации о разрешениях на проведение подземных работ.

Схема взаимодействия органов власти:

- 4) Муниципальные органы предоставляют сведения о разрешениях и планах застройки.
- 5) Росреестр интегрирует данные о земельных участках и подземных объектах.
- 6) Росприроднадзор вносит результаты экологического мониторинга (качество подземных вод, уровень загрязнения почвы).
- 7) Эксплуатационные организации обязаны регулярно обновлять сведения о состоянии объектов.

Оценка затрат на внедрение системы может быть выполнена на основе анализа аналогичных проектов (например, создание Единого государственного реестра недвижимости), с учётом необходимости интеграции с существующими базами данных и обеспечения кибербезопасности.

1.2 Освоение подземного пространства

В современной градостроительной практике экстенсивный подход к территориальному росту городов, основанный на освоении прилегающих свободных земель, часто оказывается либо невозможным из-за природно-физических условий, либо экономически нецелесообразным. [24] Это связано с тем, что такой рост приводит к сокращению лесных и сельскохозяйственных угодий, удлинению инженерных сетей и транспортных магистралей, а также увеличивает время, затрачиваемое населением на трудовые миграции. Поэтому многие специалисты отдают предпочтение интенсивному использованию и развитию городской территории через такие направления, как уплотнение застройки, освоение неиспользуемых участков и, в первую очередь, использование подземного пространства

Освоение подземного пространства включает себя массу различных направлений от нефтегазового направления и заканчивая геологоразведочные работы [24]. Среди них есть направление построение подземного пространства, которое связано со строительством отдельных сооружений. Оно включает в себя

различные объекты от строительства метрополитена и канализационных коллекторов заканчивая месторождениями полезных ископаемых.

Освоение подземных пространств – это процесс, связанный с адаптацией естественных полостей или строительством специальных подземных сооружений для размещения в них различных объектов жизнеобеспечения, и в таблице 1 приведена общая классификация подземных объектов.

Таблица 1 – Классификация подземных объектов

Подземные объекты хозяйственного назначения	Подземные объекты социального назначения	Подземные объекты экологического назначения	Подземные объекты оборонного назначения
Горнодобывающие предприятия	Жилые комплексы	Хранилища РАО	Командные пункты
Объекты энергетики	Предприятия торговли	Опасные технологии	Авиационные ангары
Промышленные предприятия	Спортивные сооружения		Плавбазы
Транспортные предприятия (вокзалы, тоннели, метрополитены)	Лечебные учреждения		Ракетно-пусковые комплексы
Агрокомплексы	Учебно-научные центры		Объекты гражданской обороны
Склады, хранилища	Учреждения культуры		
Гаражи, автостоянки	Развлекательные центры		

Продолжение Таблицы 1

Инженерные коммуникации			
----------------------------	--	--	--

1.3 Классификация подземных пространств

В настоящее время планы по освоению подземного пространства не учитываются в официальных документах территориального планирования Российской Федерации. В действующем законодательстве, в частности в Градостроительном кодексе, прописаны только территориальные зоны, относящиеся к наземным территориям, тогда как в теории градостроительства отсутствует обоснованное деление подземных пространств на функциональные зоны.

Типология подземных зон города включает четыре основных типа: инфраструктурный, научно-производственный, общественный и вспомогательный [22].

Первый тип - инфраструктурный - делится на два класса: транспортный и инженерный. Городская инфраструктура может быть как транспортной, так и инженерной. Таким образом, подземную инфраструктурную зону целесообразно разделить на два класса: транспортный и инженерный, каждый из которых включает как линейные объекты, так и здания и сооружения [6].

К линейным объектам транспортной инфраструктуры, расположенным под землёй, относятся тоннели всех видов транспорта (кроме авиационного), а также пешеходные переходы. Подземные пешеходные переходы, ведущие к подземным или наземным станциям и остановкам общественного транспорта, образуют транспортно-пересадочные узлы. Это особенно актуально для подземных зон, примыкающих к крупным железнодорожным станциям.

Второй класс подземной инфраструктурной зоны – инженерный - включает размещение всех видов инженерных сетей и объектов, таких как водоснабжение, канализация, электросети и другие. Прокладка этих сетей в подземных

пространствах стала нормой в городском строительстве. Для создания комфортной городской среды также важно размещать в подземных пространствах объекты энергетического комплекса. Как транспортный класс, так и инженерный класс состоят из сетевых и узловых элементов [5, 22].

Общественная зона подземного пространства включает сеть подземных пешеходных переходов, которые могут быть дополнены торговыми и другими объектами сферы услуг. Эти объекты, в том числе те, что находятся в транспортно-пересадочных узлах, формируют многофункциональные общественные пространства. Также выделяется класс подземных социальных объектов, включающий музеи, театры, картинные галереи, спортивно-оздоровительные комплексы, концертные площадки и религиозные сооружения. В условиях нехватки земельных участков и невозможности реконструкции исторических зданий такие учреждения, как музеи и галереи, расширяют свои площади именно в подземном пространстве.

Научно-производственные зоны делят на исследовательские и промышленные. Например, подземная лаборатория в Швейцарии работает без внешнего шума, а подземные цеха Германии показали снижение уровня вибраций [7]. Подземные лаборатории, особенно те, которые требуют особых условий, а также те, которые могут представлять угрозу для экологии, становятся важным элементом научной и производственной инфраструктуры. Ключевыми факторами для таких объектов являются безопасность и возможность быстрого реагирования в случае чрезвычайных ситуаций.

Вспомогательная функциональная зона подземного пространства включает объекты для складирования, хранения и технического обслуживания транспортных средств. Это пространство используется для размещения складов различных товаров, что оправдано необходимостью экономии наземных территорий, а также возможностью поддерживать постоянную низкую температуру с минимальными затратами энергии [22].

Таким образом классификацию подземных пространств можно представить в виде схемы (рис.1).

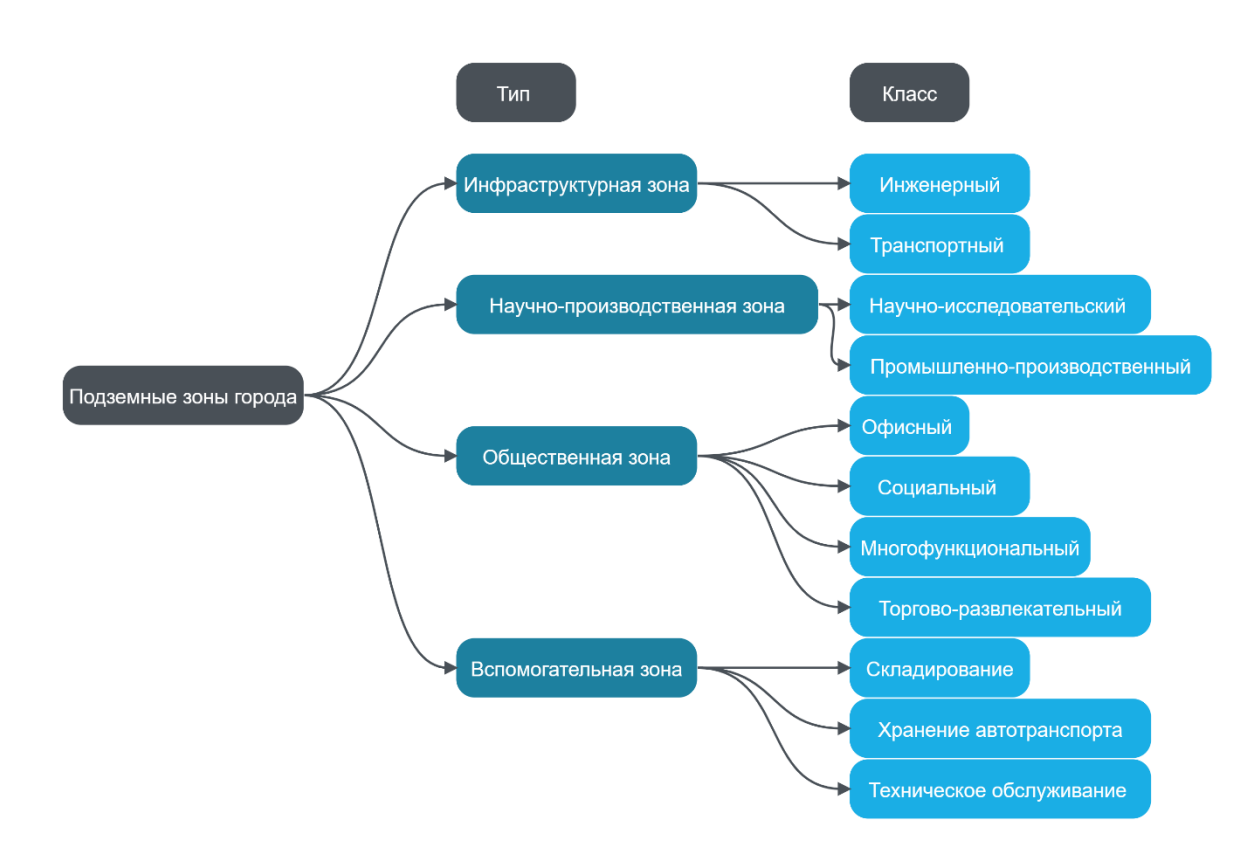


Рисунок 1 – Схема классификации подземных зон

1.4 Роль подземных пространств в городской инфраструктуре

Подземные пространства играют важнейшую роль в городской инфраструктуре, решая проблемы, связанные с быстрой урбанизацией и ростом населения. По мере расширения городов и сокращения площади поверхности земли использование подземных пространств становится эффективным решением для улучшения условий жизни в городах и повышения их устойчивости. Ниже перечислены основные преимущества подземных пространств в городской инфраструктуре:

1) оптимизация использования территорий. Растущий спрос на городское пространство требует инновационных подходов к землепользованию. Подземные пространства дают возможность оптимизировать ограниченную площадь поверхности, доступную в густонаселённых городах. Переноса различные функции, такие как парковки, транспортные системы и

коммуникации, под землёю, города могут освободить ценные участки поверхности для парков, зон отдыха и жилых районов, тем самым улучшая общее качество жизни горожан;

2) экологические преимущества. Использование подземных пространств вносит значительный вклад в экологическую устойчивость. Размещая инфраструктуру под землёй, города могут снизить уровень загрязнения воздуха и уменьшить заторы на дорогах. Это не только улучшает качество воздуха, но и минимизирует шумовое загрязнение, создавая более приятную городскую среду. Кроме того, подземное строительство может помочь сохранить зелёные насаждения и естественную среду обитания, сокращая потребность в обширной застройке на поверхности;

3) устойчивость инфраструктуры. Подземные сооружения по своей природе более устойчивы к различным экологическим проблемам, в том числе к экстремальным погодным условиям и стихийным бедствиям. Например, подземные сооружения могут обеспечить защиту от наводнений и других геологических опасностей, гарантируя бесперебойную работу жизненно важных служб во время кризисов. Такая устойчивость особенно важна, поскольку изменение климата увеличивает частоту и серьёзность таких событий;

4) экономические преимущества. Развитие подземной инфраструктуры может принести значительную экономическую выгоду. Создавая многофункциональные подземные сооружения, такие как торговые центры или спортивные арены, города могут стимулировать местную экономику и создавать рабочие места как на этапе строительства, так и на этапе эксплуатации. Кроме того, подземная застройка часто требует меньших затрат на обслуживание из-за меньшей подверженности воздействию окружающей среды [8,9].

5) социальная справедливость и доступность. Правильно спланированные подземные пространства могут способствовать социальной справедливости, предоставляя доступные общественные удобства для разных групп населения. Если эти объекты спроектированы с учётом инклюзивности, это позволяет вовлечь больше людей в общественную жизнь. Кроме того,

интеграция подземных сооружений с системами общественного транспорта может повысить мобильность жителей, особенно в малообеспеченных районах [10].

б) интеграция с городским планированием. Чтобы подземные пространства можно было эффективно использовать, они должны быть интегрированы в более широкие стратегии городского планирования. Это предполагает координацию с различными заинтересованными сторонами, включая государственные учреждения, частных застройщиков и общественные организации, чтобы подземные сооружения соответствовали общему видению города. Такая интеграция способствует целостному подходу к городскому развитию, учитывающему как наземные, так и подземные потребности [9,10].

Таким образом, роль подземных пространств в городской инфраструктуре многогранна и позволяет решать важнейшие проблемы, с которыми сталкиваются современные города. Поскольку городское население продолжает расти, а экологические проблемы усугубляются, использование подземных пространств будет иметь решающее значение для создания устойчивой, жизнеспособной и справедливой городской среды. Стратегическое использование этих пространств не только повышает эффективность использования земли, но и способствует улучшению качества жизни горожан, одновременно решая насущные экологические проблемы.

Признавая потенциал подземных пространств как бесценного ресурса в рамках городского планирования, города могут проложить путь к более устойчивому будущему, в котором развитие будет сочетаться с сохранением экологии и социальной справедливостью.

1.5 Урбанизация и экологические проблемы

Урбанизация как глобальный процесс концентрации населения в городах и увеличения их роли в социально-экономическом развитии общества имеет

многогранное влияние на окружающую среду. К наиболее существенным экологическим проблемам, связанным с урбанизацией, относятся:

1. Загрязнение атмосферы. Городские территории характеризуются высокой концентрацией промышленных предприятий и транспортных средств, которые являются основными источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. По данным Всемирной организации здравоохранения, более 90% городского населения мира дышит воздухом, качество которого не соответствует нормативам. Загрязнение воздуха в городах приводит к росту заболеваемости органов дыхания, сердечно-сосудистой системы и другим негативным последствиям для здоровья.

2. Загрязнение водных объектов. Урбанизация сопровождается увеличением объемов сточных вод, поступающих в водные объекты. Несмотря на наличие систем очистки, в городах наблюдается значительное загрязнение рек, озер и подземных вод. Основными источниками загрязнения являются промышленные предприятия, жилищно-коммунальное хозяйство и поверхностный сток с городских территорий.

3. Деградация почвенного покрова. В процессе городского строительства происходит нарушение и уничтожение естественного почвенного покрова, его замена искусственными покрытиями. Городские почвы характеризуются повышенным содержанием тяжелых металлов, нефтепродуктов и других загрязняющих веществ, что снижает их экологические функции и создает угрозу для здоровья населения.

4. Сокращение биоразнообразия. Расширение городских территорий приводит к уничтожению естественных экосистем, фрагментации местообитаний и сокращению биологического разнообразия. Городская среда создает условия для проникновения инвазивных видов, что дополнительно угрожает местным экосистемам.

5. Образование отходов. Города являются основными центрами образования твердых коммунальных и промышленных отходов. Проблема

размещения и утилизации отходов особенно остро стоит для крупных городов и мегаполисов, где ежегодно образуются миллионы тонн отходов.

6. Изменение микроклимата. Городские территории характеризуются формированием специфического микроклимата, отличающегося от окружающих территорий. Эффект "городского теплового острова" проявляется в повышении температуры воздуха в городе на 1-5°C по сравнению с прилегающими территориями, что влияет на здоровье жителей и энергопотребление.

7. Шумовое загрязнение. Высокий уровень шума от транспорта, промышленных предприятий и других источников является серьезной экологической проблемой городов. Длительное воздействие повышенного уровня шума может приводить к нарушениям сна, стрессу, снижению работоспособности и развитию сердечно-сосудистых заболеваний[1].

Решение перечисленных экологических проблем является необходимым условием создания комфортной и безопасной городской среды. Одним из перспективных направлений минимизации негативного воздействия на окружающую среду при сохранении темпов экономического развития является освоение подземного пространства городов.

1.6 Экологическая безопасность в контексте подземного строительства

Экологическая безопасность при освоении подземного пространства городских территорий представляет собой комплекс мер, направленных на предотвращение или минимизацию негативного воздействия на окружающую среду при строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Обеспечение экологической безопасности подземного строительства требует учета специфических факторов, связанных с взаимодействием технических объектов с геологической средой и подземными водами.

Основными принципами обеспечения экологической безопасности при освоении подземного пространства являются:

Принцип комплексного подхода. Экологическая безопасность должна рассматриваться на всех этапах жизненного цикла подземного сооружения - от проектирования до ликвидации. При этом необходимо учитывать все компоненты окружающей среды, которые могут быть затронуты при строительстве и эксплуатации.

Принцип превентивности. Приоритет должен отдаваться профилактическим мерам по предотвращению негативного воздействия на окружающую среду, а не ликвидации последствий такого воздействия.

Принцип научной обоснованности. Решения по обеспечению экологической безопасности должны приниматься на основе результатов научных исследований, учета накопленного опыта и данных мониторинга.

Принцип экологической эффективности. При выборе технологий и материалов для подземного строительства следует отдавать предпочтение тем, которые обеспечивают минимальное воздействие на окружающую среду при сохранении экономической эффективности.

Принцип компенсации. Ущерб, наносимый окружающей среде при освоении подземного пространства, должен быть компенсирован соответствующими природоохранными мероприятиями.

Принцип открытости и публичности. Информация об экологических аспектах подземного строительства должна быть доступна для общественности, что способствует повышению социальной ответственности компаний-застройщиков.

Правовые аспекты защиты окружающей среды при подземном строительстве регулируются как общими нормативно-правовыми актами в области охраны окружающей среды, так и специальными документами, относящимися к строительству и недропользованию. Ключевыми правовыми инструментами обеспечения экологической безопасности являются:

- 1) Экологическая экспертиза проектной документации, которая позволяет оценить потенциальное воздействие подземного сооружения на окружающую среду и разработать меры по его минимизации.

2) Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС), которая является обязательной процедурой при проектировании крупных подземных объектов.

3) Экологический мониторинг, который обеспечивает контроль за состоянием окружающей среды в процессе строительства и эксплуатации подземного сооружения.

4) Экологический аудит, который позволяет проводить независимую оценку соответствия деятельности по освоению подземного пространства экологическим требованиям.

5) Экологическое страхование, которое обеспечивает финансовую защиту от рисков, связанных с возможным негативным воздействием на окружающую среду.

Эффективное обеспечение экологической безопасности при освоении подземного пространства требует применения современных технологий, таких как геоинформационные системы для моделирования и прогнозирования экологических последствий, методы неразрушающего контроля для мониторинга состояния подземных сооружений, технологии очистки сточных вод и воздуха от загрязняющих веществ.

Особое внимание при обеспечении экологической безопасности подземного строительства следует уделять защите подземных вод, которые являются важным источником водоснабжения и играют ключевую роль в поддержании гидрогеологического баланса территории. Нарушение режима подземных вод может привести к подтоплению или осушению территории, активизации карстовых и суффозионных процессов, изменению химического состава вод и другим негативным последствиям.

Таким образом, экологическая безопасность при освоении подземного пространства городских территорий представляет собой комплексную задачу, решение которой требует учета многочисленных факторов и применения современных подходов к проектированию, строительству и эксплуатации подземных сооружений.

2 Экология и подземное пространство

2.1 Экологические аспекты подземного строительства

Подземное строительство, несмотря на свои преимущества с точки зрения оптимизации использования городских территорий, оказывает значительное влияние на окружающую среду. Экологические аспекты подземного строительства необходимо рассматривать с учетом взаимосвязей между техногенными объектами и компонентами природной среды, включая геологическую среду, подземные воды, почвенный покров и биотические компоненты экосистем.

Влияние подземных сооружений на экосистему города проявляется в следующих аспектах:

1. Изменение гидрогеологических условий. Строительство подземных сооружений часто сопровождается водопонижением, что может привести к осушению водоносных горизонтов, изменению направления и скорости движения подземных вод, а также к формированию депрессионных воронок. Эти изменения, в свою очередь, влияют на водный баланс территории, могут вызывать подтопление или осушение отдельных участков и изменять питание поверхностных водоемов. Кроме того, подземные сооружения могут создавать эффект "барражирования", препятствуя естественному движению подземных вод, что может приводить к подтоплению территорий выше по потоку и осушению ниже по потоку.

2. Воздействие на геологическую среду. Подземное строительство сопровождается выемкой грунта, что меняет напряженное состояние массива, может приводить к оседанию поверхности, разуплотнению грунтов и активизации геологических процессов, таких как карст, суффозия, оползни. Особенно опасно это явление в городских условиях, где оседание поверхности может повреждать существующие здания и инфраструктуру.

3. Загрязнение подземных вод. При строительстве и эксплуатации подземных сооружений существует риск загрязнения подземных вод строительными материалами, горюче-смазочными материалами, а также веществами, используемыми или хранящимися в подземных сооружениях. Кроме того, изменение химического состава подземных вод может происходить в результате взаимодействия с материалами конструкций, особенно в условиях агрессивных подземных вод.

4. Влияние на почвенный покров. При строительстве подземных сооружений может происходить нарушение или полное уничтожение почвенного покрова на территории строительной площадки. Кроме того, изменение гидрологического режима может приводить к заболачиванию почв, их засолению или осушению, что влияет на растительность и фауну.

5. Воздействие на биотические компоненты экосистем. Подземное строительство может приводить к уничтожению мест обитания животных и растений, нарушению путей миграции животных, изменению условий произрастания растений из-за изменения режима подземных вод и других факторов.

6. Образование отходов. При подземном строительстве образуется значительное количество отходов, включая вынутый грунт, который требует размещения или утилизации. Размещение грунта на специализированных полигонах может занимать значительные территории и создавать дополнительную нагрузку на окружающую среду.

7. Шумовое и вибрационное воздействие. Процесс подземного строительства сопровождается шумом и вибрацией, которые могут негативно влиять на здоровье и комфорт жителей близлежащих территорий, а также на состояние существующих зданий и сооружений.

8. Изменение газового режима. Подземные сооружения могут нарушать естественный газообмен в породах, что может приводить к накоплению вредных газов, включая радон, метан и углекислый газ, внутри подземных сооружений или их проникновению в наземные здания.

Потенциальные экологические риски при строительстве подземных сооружений включают:

1. Риск прорыва грунтовых вод в подземное сооружение с возможным затоплением и загрязнением окружающей среды;
2. Риск активизации опасных геологических процессов, таких как карст, оползни, суффозия;
3. Риск деформаций существующих зданий и сооружений в зоне влияния строительства;
4. Риск загрязнения подземных вод, которые могут использоваться для водоснабжения;
5. Риск изменения температурного режима грунтов, что может приводить к нарушению устойчивости сооружений в условиях вечной мерзлоты;
6. Риск негативного влияния на культурное наследие, включая археологические объекты, при строительстве в исторических центрах городов.

Минимизация экологических рисков при подземном строительстве требует тщательного планирования и применения современных технологий и материалов. Важным аспектом является проведение детальных инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий перед началом строительства, а также организация мониторинга состояния окружающей среды в процессе строительства и эксплуатации.

2.2 Экологические аспекты использования подземного пространства в условиях урбанизации

Урбанизация и активное освоение подземного пространства оказывают сложное и многогранное воздействие на природные системы и качество жизни в городах. Увеличение плотности застройки, развитие транспортной инфраструктуры и инженерных сетей неизбежно сопряжены с изменением природных процессов. В данном разделе рассмотрены основные экологические аспекты взаимодействия городской инфраструктуры с окружающей средой, а

также современные практики минимизации негативных последствий и продвижения устойчивых решений в сфере подземного строительства.

Одним из наиболее актуальных экологических аспектов является феномен «городского теплового острова» (Urban Heat Island, UHI). Этот эффект проявляется в существенном повышении температуры воздуха и поверхностей в пределах городской застройки по сравнению с пригородными и сельскими районами. Основными причинами возникновения теплового острова являются высокая доля твердого покрытия (асфальт, бетон), интенсивная деятельность транспортного и промышленного секторов, а также дефицит зеленых насаждений, обеспечивающих естественное охлаждение через испарение влаги. Применение подземных сооружений может способствовать смягчению этого явления: использование геотермальных тепловых насосов, задействующих стабильную температуру грунта для отопления и охлаждения зданий, организация подземных вентиляционных каналов и применение отражающих, пористых материалов в облицовке подземных галерей позволяют снизить тепловую нагрузку на городскую среду.

Не менее значимой проблемой является управление атмосферными и водными ресурсами в условиях урбанизации. Рост интенсивности осадков на фоне изменения климата и несовершенство существующих систем водоотведения приводят к регулярным наводнениям и подтоплениям городской инфраструктуры. В качестве эффективных мер адаптации применяются инфильтрационные сооружения, подземные резервуары и дренажные системы, обеспечивающие накопление и постепенное впитывание ливневых стоков. Наряду с этим развивается практика повторного использования дождевой воды для технических нужд, что способствует снижению нагрузки на централизованную систему водоснабжения. Интеграция зелёных крыш и фасадов с подземными водосборными системами не только повышает способность городской среды к удержанию влаги, но и обеспечивает дополнительную теплоизоляцию зданий.

Важным направлением является также организация эффективных систем обращения с твердыми коммунальными отходами. Использование подземных пространств для размещения автоматизированных систем пневматической транспортировки мусора позволяет снизить уровень шума и устранить проблему неприятных запахов. Размещение централизованных станций сортировки и предварительной переработки отходов под землей способствует оптимизации логистических потоков и снижению транспортных выбросов. Концепция циркулярной экономики, предполагающая переработку строительных и коммунальных отходов с последующим возвращением вторичного сырья в производственные циклы, становится неотъемлемым элементом устойчивого развития городов.

Сохранение биоразнообразия и развитие элементов «зелёной» инфраструктуры также оказываются тесно связанными с рациональным использованием подземного пространства. Перенос инженерных коммуникаций и части объектов городской инфраструктуры под землю открывает возможности для создания новых парков, садов, зеленых коридоров и рекреационных зон. Вертикальное озеленение фасадов зданий и стен технических шахт способствует улучшению качества атмосферного воздуха, снижению уровня городского шума и формированию более комфортного микроклимата. В рамках современных подходов также развивается концепция многоуровневого озеленения, где подземные и наземные объекты взаимодействуют в рамках единой городской экосистемы.

Эффективность рассмотренных решений подтверждается на примере ряда реализованных проектов. Так, строительство подземных паркингов под площадями и зелеными зонами (например, площадь Массена в Ницце) позволило сохранить культурно-историческое пространство, одновременно повысив пешеходную доступность. В Барселоне внедрена система пневматического сбора отходов, минимизирующая выбросы транспорта и улучшающая санитарное состояние городских районов. В Токио функционирует крупнейшее в мире подземное резервуарное хранилище дождевой воды — Metropolitan Area Outer

Underground Discharge Channel — обеспечивающее эффективную защиту города от наводнений и позволяющее использовать собранные воды в технических целях. В подземном кампусе Университета Миннесоты энергопотребление упало на 30 % по сравнению с наземными корпусами [University of Minnesota Sustainability Report, 2023).].

Для обеспечения экологической безопасности подземных объектов и их вклада в устойчивое развитие городов необходимо внедрение системного подхода на всех этапах реализации проектов. На стадии концептуального проектирования обязательным становится проведение оценки жизненного цикла (Life Cycle Assessment, LCA) и экологического аудита. При выборе строительных технологий и материалов следует отдавать предпочтение решениям с минимальным воздействием на окружающую среду, включая низкоэмиссионный бетон и энергоэффективное оборудование. Важной задачей является организация системы постоянного мониторинга качества воздуха, воды, шума и микроклиматических параметров в подземных пространствах. Активное привлечение общественности к обсуждению проектов и обеспечение прозрачности процессов принятия решений способствуют формированию высокого уровня доверия к инициативам устойчивого развития.

Таким образом, комплексное использование подземного пространства представляет собой важнейший инструмент повышения экологической устойчивости современных городов, а внедрение инновационных технологий и стратегий управления позволяет минимизировать негативные последствия урбанизации и создать комфортную, безопасную и благоприятную среду для жизни.

2.3 Взаимодействие между подземными сооружениями и городской средой

Взаимодействие между подземными сооружениями и городской средой представляет собой сложную систему взаимосвязей, которую можно

рассматривать в рамках концепции природно-технической геосистемы "породный массив – технология – подземное сооружение – окружающая среда". Эта система характеризуется непрерывным взаимодействием и взаимовлиянием ее компонентов, что требует комплексного подхода к проектированию, строительству и эксплуатации подземных объектов.

Породный массив выступает как основная среда размещения подземного сооружения, определяющая условия строительства и эксплуатации. Свойства породного массива (прочность, деформируемость, трещиноватость, обводненность и др.) влияют на выбор технологии строительства, конструкцию подземного сооружения и меры по обеспечению его устойчивости. В свою очередь, строительство и эксплуатация подземного сооружения изменяют естественное состояние породного массива, что может приводить к активизации геологических процессов и изменению гидрогеологического режима.

Технология строительства играет ключевую роль в формировании взаимодействия между подземным сооружением и городской средой. Выбор технологии влияет на масштаб и характер воздействия на окружающую среду, включая изменение геологических и гидрогеологических условий, образование отходов, шумовое и вибрационное воздействие. Современные технологии подземного строительства, такие как микротоннелирование, горизонтально-направленное бурение, щитовая проходка, позволяют минимизировать негативное воздействие на окружающую среду по сравнению с традиционными открытыми способами строительства.

Подземное сооружение, будучи искусственным элементом геологической среды, изменяет ее структуру и функционирование. Оно может выступать как барьер для движения подземных вод, источник тепла или загрязнения, а также изменять напряженно-деформированное состояние массива. Кроме того, подземное сооружение взаимодействует с наземной инфраструктурой и зданиями, что требует учета взаимного влияния и координации при планировании городского развития.

Окружающая среда, в свою очередь, влияет на подземное сооружение посредством различных факторов, включая агрессивность подземных вод, сейсмическую активность, климатические условия и техногенную нагрузку. Изменения окружающей среды, как естественные, так и антропогенные, могут приводить к изменению условий эксплуатации подземного сооружения и требовать адаптации его конструкции или режима эксплуатации [23].

Анализ взаимодействия между подземными сооружениями и городской средой требует применения системного подхода, учитывающего все компоненты природно-технической геосистемы и их взаимосвязи. Важным инструментом такого анализа является моделирование, позволяющее прогнозировать поведение системы при различных условиях и сценариях. Современные геоинформационные системы и методы численного моделирования позволяют создавать детальные модели взаимодействия подземных сооружений с окружающей средой, учитывающие как природные, так и техногенные факторы.

Для обеспечения устойчивого развития городской среды необходима интеграция подземных сооружений в общую систему городского планирования. Это предполагает координацию наземного и подземного строительства, учет долгосрочных перспектив развития города, а также вовлечение различных заинтересованных сторон в процесс принятия решений. Важным аспектом является также адаптивное управление, позволяющее реагировать на изменения в городской среде и корректировать планы использования подземного пространства.

Примером комплексного подхода к анализу взаимодействия подземных сооружений и городской среды является проект "Deer City" в Швейцарии, который разработал методологию для интеграции подземного пространства в городское планирование. Проект предлагает рассматривать подземное пространство как многофункциональный ресурс, включающий пространство для строительства, геотермальную энергию, подземные воды и геологические материалы. Управление этим ресурсом требует междисциплинарного подхода и учета взаимосвязей между различными компонентами.

Таким образом, взаимодействие между подземными сооружениями и городской средой представляет собой сложную систему взаимосвязей, управление которой требует комплексного подхода, основанного на понимании природно-технических геосистем и принципах устойчивого развития. Интеграция подземных сооружений в городскую среду должна осуществляться с учетом экологических, экономических и социальных аспектов, что позволит максимизировать положительные эффекты от использования подземного пространства и минимизировать негативные воздействия на окружающую среду.

3 Методика оценки и управления экологической безопасностью подземного пространства

3.1 Обоснование методов оценки экологической безопасности

Современные подходы к оценке экологической безопасности подземного пространства городских территорий основываются на комплексном анализе рисков и неопределенностей, возникающих при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Методы оценки экологической безопасности подземного пространства можно разделить на несколько основных групп: количественные, качественные и комбинированные.

Количественные методы оценки экологической безопасности базируются на математическом моделировании процессов взаимодействия подземных сооружений с окружающей средой. Согласно исследованиям Власова и др. (2023), применение численных методов позволяет прогнозировать воздействие подземного строительства на гидрогеологический режим, состояние грунтов и наземные объекты¹. Особую значимость имеют методы конечных элементов и конечных разностей, позволяющие с высокой точностью моделировать деформационные процессы в грунтовом массиве при подземном строительстве.

Качественные методы оценки опираются на экспертные оценки и эвристические подходы. Шульженко и Самарин (2022) отмечают, что для эффективной оценки экологической безопасности необходимо применение матриц рисков и многокритериального анализа принятия решений². Достоинством данных методов является возможность учета трудноформализуемых факторов и интеграции разнородных данных в единую систему оценки.

Комбинированные методы, включающие элементы как количественного, так и качественного анализа, представляются наиболее перспективными для комплексной оценки экологической безопасности. Петров и Кузнецова (2024) предлагают использовать интегральный индекс экологической безопасности

подземного пространства (ИЭБПП), учитывающий как измеримые параметры воздействия на окружающую среду, так и экспертные оценки.

В последние годы значительное развитие получили методы оценки рисков и неопределенностей на основе геоинформационных систем (ГИС). По мнению Смирнова (2023), ГИС-технологии позволяют создавать многослойные модели подземного пространства, интегрирующие геологическую, гидрогеологическую, экологическую и градостроительную информацию⁴. Такие модели обеспечивают более точную оценку экологических рисков при проектировании и строительстве подземных сооружений.

Важным аспектом методов оценки является анализ физических факторов воздействия подземных сооружений на окружающую среду и человека. Как показывают результаты исследований Андропова и др. (2024), уровни шума в петербургском метрополитене превышают нормативные значения и оказывают негативное влияние на здоровье пассажиров и персонала⁵. Разработка методов оценки акустического и вибрационного воздействия подземных сооружений является одним из приоритетных направлений обеспечения экологической безопасности.

3.2 Мониторинг и аудит экологической безопасности

Эффективная система мониторинга и аудита является неотъемлемой частью обеспечения экологической безопасности подземного пространства городских территорий. Современные подходы к организации мониторинга предполагают создание комплексных систем наблюдения, включающих различные виды экологического контроля.

Инженерно-экологический мониторинг при подземном строительстве включает несколько направлений контроля:

Гидрогеологический мониторинг, направленный на контроль уровня и химического состава подземных вод, выявление возможных процессов подтопления или осушения территорий.

Геодезический мониторинг деформаций грунтового массива и наземных объектов, позволяющий оперативно выявлять негативные процессы оседания или поднятия поверхности.

Мониторинг качества воздуха в подземных сооружениях и прилегающих территориях, особенно актуальный для транспортных тоннелей и метрополитенов.

Мониторинг шума и вибрации, позволяющий контролировать уровень физического воздействия подземных сооружений на человека и окружающую среду.

По мнению Ивановой и Петрова (2022), система инженерно-экологического мониторинга должна строиться на принципах комплексности, непрерывности и адаптивности⁶. Современные технологии, такие как автоматизированные системы сбора данных и дистанционное зондирование, позволяют значительно повысить эффективность мониторинга.

Как отмечают Козлов и Соколова (2023), особое значение имеет интеграция данных мониторинга в единую информационную систему, позволяющую проводить оперативный анализ и прогнозирование экологической ситуации⁷. Такая система должна обеспечивать возможность оперативного реагирования на возникающие экологические риски и принятия управленческих решений.

Экологический аудит подземных сооружений представляет собой комплексную оценку соответствия их проектирования, строительства и эксплуатации требованиям экологической безопасности. Сидоров и Кузьмина (2024) выделяют следующие основные этапы экологического аудита подземных сооружений:

- Предварительный сбор и анализ информации об объекте и окружающей территории.
- Проверка соответствия проектной документации экологическим требованиям.
- Оценка воздействия объекта на компоненты окружающей среды.

- Анализ эффективности систем экологического контроля и управления.

- Разработка рекомендаций по снижению экологического воздействия.

Результаты мониторинга и аудита являются основой для принятия управленческих решений и корректировки стратегий обеспечения экологической безопасности подземного пространства.

3.3 Стратегии управления экологическими рисками

Управление экологическими рисками при освоении подземного пространства городских территорий требует разработки и реализации комплексных стратегий, учитывающих многообразие факторов воздействия на окружающую среду. Современные подходы к управлению экологическими рисками основываются на принципах предупреждения, минимизации и компенсации негативного воздействия.

Как отмечают Морозов и Алексеева (2023), стратегии управления экологическими рисками при подземном строительстве должны разрабатываться с учетом специфики конкретных проектов и территорий. При этом особое внимание следует уделять выявлению критических факторов риска и разработке мер по их снижению.

Основными стратегиями управления экологическими рисками при освоении подземного пространства являются:

Стратегия превентивного управления рисками, предполагающая прогнозирование и предотвращение потенциальных экологических проблем на стадии проектирования подземных сооружений. Данная стратегия включает проведение детальных инженерно-экологических изысканий, моделирование воздействия на окружающую среду, выбор оптимальных технологий строительства с точки зрения экологической безопасности.

Стратегия активного мониторинга и управления, основанная на непрерывном контроле экологических параметров в процессе строительства и

эксплуатации подземных сооружений. Эта стратегия предполагает оперативное реагирование на выявленные отклонения и корректировку технологических процессов.

Стратегия экологической оптимизации, направленная на поиск компромиссных решений, обеспечивающих баланс между функциональностью подземных сооружений и их воздействием на окружающую среду.

Стратегия компенсационных мероприятий, предусматривающая реализацию мер по восстановлению нарушенных компонентов окружающей среды и созданию экологически благоприятных условий на прилегающих территориях.

Ковалев и Дмитриева (2022) подчеркивают важность адаптивного подхода к управлению экологическими рисками, предполагающего возможность корректировки стратегий в зависимости от изменения условий реализации проектов. Такой подход особенно актуален в условиях высокой неопределенности, характерной для подземного строительства.

Принципы экологической оптимизации подземного строительства, предложенные Волковым и Сергеевой (2024), включают:

Принцип минимизации вмешательства в природные системы, предполагающий выбор технологий строительства с наименьшим воздействием на окружающую среду.

Принцип сохранения гидрогеологического режима территории, обеспечивающий устойчивость водного баланса и предотвращение негативных изменений состояния подземных вод.

Принцип энергоэффективности подземных сооружений, направленный на снижение потребления ресурсов и уменьшение углеродного следа.

Принцип multifunctionality использования подземного пространства, позволяющий оптимизировать размещение различных видов инфраструктуры и снизить общую техногенную нагрузку на территорию.

Принцип экологической совместимости, предполагающий проектирование подземных сооружений с учетом их влияния на существующие экосистемы и биоразнообразие.

Реализация указанных стратегий требует разработки соответствующих методических подходов и инструментов управления экологическими рисками, учитывающих специфику подземного строительства в городских условиях.

4. Методические рекомендации по обеспечению экологической безопасности подземного пространства

4.1. Рекомендации по обеспечению экологической безопасности

На основании анализа современных подходов к обеспечению экологической безопасности подземного пространства городских территорий можно сформулировать ряд методических рекомендаций, направленных на минимизацию негативного воздействия подземных сооружений на окружающую среду.

Основные принципы обеспечения экологической безопасности при подземном строительстве включают:

Принцип превентивности - предупреждение негативных экологических последствий на стадии проектирования и выбора технологий строительства.

Принцип системности - рассмотрение подземного сооружения как элемента единой природно-технической системы, взаимодействующей с окружающей средой.

Принцип многофакторности - учет всех видов воздействия на окружающую среду, включая прямые и косвенные эффекты.

Принцип адаптивности - возможность корректировки технологических решений в зависимости от изменения экологической ситуации.

Принцип непрерывности - обеспечение экологической безопасности на всех этапах жизненного цикла подземного сооружения.

Антонов и Смирнова (2023) отмечают, что особую важность имеют критерии экологической безопасности, позволяющие оценивать соответствие подземных сооружений экологическим требованиям. Такие критерии должны включать количественные показатели воздействия на различные компоненты окружающей среды, а также качественные характеристики, отражающие потенциальные риски.

Правовые и нормативные требования к экологической безопасности подземного строительства в России регулируются комплексом законодательных актов и технических регламентов. Как указывают Федоров и Лебедева (2022), основными документами, определяющими требования к экологической безопасности подземных сооружений, являются:

Федеральный закон "Об охране окружающей среды" от 10.01.2002 № 7-ФЗ.

Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 № 52-ФЗ.

Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ.

Свод правил СП 120.13330.2012 "Метрополитены".

Свод правил СП 249.1325800.2016 "Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами".

СанПиН 2.1.3684-21 "Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий".

СП 2.5.3650-20 "Санитарные правила эксплуатации метрополитенов".

На основе анализа нормативных требований и современных исследований можно сформулировать следующие рекомендации по обеспечению экологической безопасности при проектировании и строительстве подземных сооружений:

Проведение комплексных инженерно-экологических изысканий, включающих оценку состояния геологической среды, гидрогеологических условий, почвенного покрова и существующего фонового загрязнения.

Разработка прогнозных моделей воздействия подземных сооружений на окружающую среду с использованием современных методов математического моделирования и ГИС-технологий.

Выбор технологий строительства, обеспечивающих минимальное воздействие на геологическую среду и подземные воды, предотвращение деформаций поверхности и сохранение существующих экосистем.

Внедрение систем автоматизированного мониторинга экологических параметров, позволяющих оперативно выявлять отклонения от нормативных требований и принимать корректирующие меры.

Разработка и реализация программ экологического менеджмента, направленных на оптимизацию использования ресурсов и снижение воздействия на окружающую среду в процессе эксплуатации подземных сооружений.

Петренко и Васильева (2023) указывают на необходимость интеграции требований экологической безопасности в процессы принятия решений на всех уровнях управления проектами подземного строительства. Эффективность такой интеграции может быть обеспечена за счет применения современных методов экологического проектирования и оценки жизненного цикла подземных сооружений.

4.2. Практические подходы к снижению экологического воздействия

Снижение экологического воздействия подземных сооружений требует применения комплекса технологических, организационных и управленческих решений, учитывающих специфику конкретных проектов и территорий. Современные практические подходы к минимизации воздействия подземного строительства на окружающую среду включают ряд направлений.

Технологические решения по снижению воздействия на геологическую среду и подземные воды:

Применение щитовых тоннелепроходческих комплексов с активным пригрузом забоя, обеспечивающих минимальные деформации грунтового массива и снижение влияния на гидрогеологический режим.

Использование технологий "стена в грунте" и струйной цементации для создания противofiltrационных завес, предотвращающих изменение уровня и химического состава подземных вод.

Внедрение современных гидроизоляционных материалов и технологий, обеспечивающих водонепроницаемость подземных сооружений и предотвращающих загрязнение подземных вод.

Применение технологий компенсационного нагнетания для управления деформациями грунтового массива и предотвращения негативного влияния на наземные объекты.

Решения по снижению шума и вибрации при строительстве и эксплуатации подземных сооружений:

Использование виброизолирующих материалов и конструкций при устройстве верхнего строения пути в транспортных тоннелях и метрополитенах. Как показано в исследовании Андропова и др. (2024), применение таких технологий, как LVT (Low Vibration Track), позволяет значительно снизить уровень шума и вибрации в подземных транспортных сооружениях⁵.

Применение шумопоглощающих материалов для отделки внутренних поверхностей подземных сооружений, особенно в помещениях с повышенными требованиями к акустическому комфорту.

Внедрение современных технических решений для подвижного состава метрополитенов, включая использование колесных тележек с шумопоглотителями и пневматических подвесок на резиновых подушках.

Оптимизация режимов движения транспортных средств в подземных тоннелях, позволяющая снизить уровень шума и вибрации.

Ефимов и Глушкова (2023) отмечают, что особую важность имеют решения по обеспечению качества воздуха в подземных сооружениях. Такие решения включают:

Разработку эффективных систем вентиляции, обеспечивающих оптимальный воздухообмен и предотвращающих накопление загрязняющих веществ.

Применение систем фильтрации и очистки воздуха, в том числе с использованием современных технологий молекулярной фильтрации и фотокаталитического окисления.

Внедрение автоматизированных систем мониторинга качества воздуха, позволяющих оперативно выявлять превышения нормативных показателей и корректировать режимы работы вентиляционных установок.

Успешные примеры практической реализации подходов к снижению экологического воздействия подземных сооружений можно найти как в отечественном, так и в зарубежном опыте. Одним из таких примеров является проект продления Невско-Василеостровской линии Петербургского метрополитена, реализованный в 2018 году. Как отмечают Климова и Соколов (2022), в рамках данного проекта были применены современные технологии щитовой проходки с активным пригрузом забоя, системы водопонижения с очисткой откачиваемых вод, виброизолирующие конструкции верхнего строения пути. Это позволило минимизировать воздействие на окружающую среду и обеспечить соответствие экологическим требованиям.

Зарубежный опыт свидетельствует о возможности значительного снижения экологического воздействия подземных сооружений при применении комплексного подхода. Например, по данным Королева (2023), при строительстве линии метрополитена Crossrail в Лондоне были внедрены инновационные технологии управления грунтовыми массами, позволившие повторно использовать более 98% извлеченного грунта и минимизировать воздействие на геологическую среду.

Рекомендации по выбору технологий и материалов с учетом экологических факторов включают:

Приоритетное использование экологически безопасных строительных материалов, имеющих соответствующие сертификаты и декларации экологической эффективности.

Выбор технологий строительства, обеспечивающих минимальное образование отходов и возможность их утилизации или повторного использования.

Применение энергоэффективных инженерных систем, позволяющих снизить потребление ресурсов в процессе эксплуатации подземных сооружений.

Использование технологий и материалов, способствующих увеличению срока службы подземных сооружений и снижению затрат на их техническое обслуживание.

4.3. Организационно-технологические схемы освоения подземного пространства

Обеспечение экологической безопасности при освоении подземного пространства городских территорий требует разработки и реализации комплексных организационно-технологических схем, учитывающих взаимосвязь экологических, технических, экономических и социальных аспектов подземного строительства.

Заварина и Лукин (2024) предлагают модель интегрированного планирования подземного пространства, основанную на принципах устойчивого развития и экологической безопасности. Данная модель предполагает последовательную реализацию следующих этапов:

Анализ существующего состояния городской территории, включая оценку экологической ситуации, геологических и гидрогеологических условий, существующей застройки и инфраструктуры.

Разработка концепции освоения подземного пространства, определяющей основные направления использования подземных территорий и принципы их взаимодействия с наземной средой.

Детальное проектирование подземных сооружений с учетом экологических требований и ограничений, разработка технологических схем строительства и эксплуатации.

Реализация проектов подземного строительства с применением экологически безопасных технологий и материалов, мониторинг воздействия на окружающую среду.

Эксплуатация подземных сооружений с обеспечением их экологической безопасности, постоянный контроль экологических параметров и оперативное реагирование на возникающие проблемы.

Особую важность имеет разработка комплексных планов освоения подземного пространства городских территорий, учитывающих экологические факторы. Соловьев и Власова (2022) выделяют следующие ключевые элементы таких планов:

Зонирование городской территории с определением приоритетных направлений использования подземного пространства и установлением экологических ограничений для каждой зоны.

Разработка схем размещения подземных сооружений различного назначения с учетом их взаимного влияния и воздействия на окружающую среду.

Определение технологических коридоров для размещения инженерных коммуникаций с минимальным воздействием на экологическую ситуацию.

Планирование этапности освоения подземного пространства с учетом необходимости обеспечения экологической безопасности на каждом этапе.

Разработка программ мониторинга и контроля экологических параметров при реализации комплексных планов.

Организационно-технологические схемы освоения подземного пространства должны учитывать специфику конкретных типов подземных сооружений и их взаимодействие с окружающей средой. Например, при строительстве и эксплуатации метрополитенов требуется особое внимание к проблемам шума и вибрации, качества воздуха, энергоэффективности.

Как показывают исследования Андропова и др. (2024), в Санкт-Петербургском метрополитене наблюдаются превышения допустимых уровней шума в вагонах различных типов на всех линиях метро⁵. Это свидетельствует о необходимости комплексного подхода к решению проблемы шумового

загрязнения, включающего как технические меры (виброизоляция верхнего строения пути, применение шумопоглощающих материалов), так и организационные решения (замена устаревшего подвижного состава, оптимизация режимов движения поездов).

Дмитриев и Савельева (2023) предлагают методику разработки организационно-технологических схем освоения подземного пространства, основанную на принципе максимизации экологической эффективности. Данная методика включает:

Выбор оптимальных технологий строительства с учетом их воздействия на окружающую среду и возможности управления экологическими рисками.

Разработку логистических схем, обеспечивающих минимизацию транспортных потоков и снижение выбросов загрязняющих веществ.

Оптимизацию графиков производства работ с учетом экологических ограничений и необходимости снижения негативного воздействия на население.

Планирование мероприятий по восстановлению нарушенных экосистем и созданию благоприятной экологической среды на территориях, прилегающих к подземным сооружениям.

Эффективная реализация организационно-технологических схем освоения подземного пространства требует координации действий всех участников процесса: проектировщиков, строителей, эксплуатирующих организаций, органов государственного контроля, представителей общественности. Козлов и Панова (2024) подчеркивают важность применения современных методов управления проектами, включая BIM-технологии и системы экологического менеджмента, для обеспечения экологической безопасности подземного строительства.

5. Комплексная методика оценки экологической безопасности подземных пространств городских территорий

Интенсивное развитие подземной инфраструктуры современных городов требует разработки надежных методов оценки их безопасности и воздействия на окружающую среду. Предлагаемая методика представляет собой интегрированный подход к оценке подземных пространств, учитывающий экологические, технические и социально-экономические аспекты. Ключевым преимуществом методики является возможность количественной оценки рисков и экологических воздействий с последующей выработкой управленческих решений на основе многокритериального анализа. Методика основана на системном подходе к оценке взаимодействия элементов природно-технической геосистемы «подземное сооружение – массив горных пород – принятая технология – окружающая среда» и направлена на обеспечение экологической безопасности городской среды.

5.1. Концептуальные основы методики

Разработанная методика базируется на системном анализе всех компонентов подземного строительства и эксплуатации с точки зрения экологической безопасности. Концептуальной основой методики является понимание подземного пространства как сложной природно-технической геосистемы, в которой взаимодействуют техногенные и природные компоненты.

Принципиальным отличием предлагаемой методики является интеграция трех ключевых аспектов управления рисками: анализа рисков, защиты от рисков и механизмов компенсации потенциального ущерба^[1]. Такой комплексный подход позволяет не только выявлять и оценивать риски, но и разрабатывать превентивные меры, а также планировать действия в случае возникновения аварийных ситуаций.

Методика предусматривает всесторонний и высокоэффективный контроль на всех стадиях жизненного цикла подземного объекта: проектирование, строительство и эксплуатация. [20] При этом контроль выполняет не только функцию объективной оценки экологической обстановки, но и активного обеспечения качества подземного строительства.

Элементами методики являются:

- 1) Адаптивность к различным типам подземных сооружений и условиям строительства
- 2) Интеграция качественных и количественных методов оценки рисков
- 3) Использование многоуровневой системы показателей и критериев
- 4) Применение современных методов математического моделирования
- 5) Создание механизма обратной связи между оценкой рисков и корректировкой проектных решений

5.2. Критерии и показатели экологической безопасности подземных сооружений

Для комплексной оценки экологической безопасности подземных сооружений разработана система критериев, включающая четыре основные группы:

Структурно-технические критерии

Данная группа критериев оценивает техническое состояние и конструктивные особенности подземных сооружений:

- Категория ответственности узлов сооружения с точки зрения экологического воздействия [20]
- Соответствие несущих и ограждающих конструкций проектному положению
- Состояние гидроизоляции и дренажных систем
- Устойчивость структурных элементов к различным воздействиям
- Надежность систем мониторинга и контроля

Для каждого критерия разработаны количественные показатели, позволяющие оценить степень соответствия нормативным требованиям.

Геотехнические критерии

Эти критерии учитывают взаимодействие подземного сооружения с вмещающим массивом горных пород:

- Адаптивность к конкретным горно- и гидрогеологическим условиям строительства

- Влияние на напряженно-деформированное состояние массива

- Воздействие на гидрогеологический режим территории

- Устойчивость окружающих грунтов в процессе строительства и эксплуатации

- Геотехническая категория сооружения в соответствии с СП 248.1325800.2023 [21]

Экологические критерии

Данная группа критериев оценивает воздействие подземного сооружения на окружающую природную среду:

- Влияние на подземные воды (качественные и количественные показатели)

- Воздействие на растительный и животный мир

- Изменение газового режима в почвах и грунтах

- Накопление загрязняющих веществ в техногенных барьерах

- Энергоэффективность и ресурсосбережение при эксплуатации

Социально-экономические критерии

Эти критерии учитывают влияние подземного сооружения на социальную среду и экономическую эффективность:

- Воздействие на объекты культурного наследия [21]

- Влияние на комфортность городской среды

- Экономическая эффективность инженерных решений

- Факторы риска и их допустимый уровень для заказчика

– Потенциальный ущерб в случае аварийных ситуаций

5.3. Алгоритм проведения оценки с учетом различных типов подземных сооружений

Далее описана последовательность шагов, которая позволяет оценить экологические риски и выбрать меры по их снижению. Сначала определяют тип объекта и его особенности, затем собирают все доступные данные, на их основе выявляют потенциальные угрозы, переходят к количественным расчётам, формулируют конкретные меры, а в конце оформляют результаты и рекомендации.

Первым делом уточняют, к какому виду относится сооружение – транспортному, коммунальному или многофункциональному – и каким способом его строили: открытым, закрытым или комбинированным. Определяют, будет ли объект работать постоянно или лишь временно, а также уточняют, это новая стройка или реконструкция.

Когда основные характеристики известны, приступают к сбору исходных данных. Изучают проектные чертежи и сметы, проводят инженерно-геологические и гидрогеологические исследования, организуют экологический мониторинг территории – замеряют качество воздуха, проверяют состав почв и уровень шума. Параллельно оценивают текущее состояние окружающей среды и анализируют возможное влияние строительства на грунтовые воды, почвы, растительность и фауну.

На третьем этапе выявляют все источники потенциальной опасности, которые характерны для данного сооружения. Это может быть риск обрушения, подтопления или утечки вредных веществ. Одновременно устанавливают возможные причины этих ситуаций и проводят качественный анализ рисков с участием экспертов [20]. Полученные данные помогают ранжировать опасности по значимости и выбрать те, которые требуют более тщательного изучения в дальнейшем.

Следующий этап – количественная оценка рисков. Здесь используют метод Монте-Карло, чтобы смоделировать вероятности различных сценариев. Затем определяют возможный ущерб и сопоставляют результаты с теми уровнями риска, которые считаются допустимыми по нормативам [19].

После расчётов подбирают конкретные меры. Сюда входят технические решения – усиление гидроизоляции, устройство дренажных скважин или дополнительное крепление конструкций – а также организационные меры: система мониторинга с периодическими замерами и автоматическими оповещениями, план реагирования на аварийные ситуации, аварийные барьеры и временные водоотводы. Если необходимо, вносят корректировки в проект – меняют технологии проходки или расположение вентиляции. Кроме того, разрабатывают программу компенсации, в которую могут входить работы по рекультивации, озеленению и нейтрализации сточных вод.

Наконец, формируют отчет и выдают рекомендации. В документе приводят интегральные индексы безопасности для каждого участка, показывают их на графиках (например, радарные диаграммы или диаграммы Парето), а также отмечают «горячие зоны» на картах. В тексте описывают последовательность внедрения мер, указывают ответственных за каждый этап и сроки реализации. Такой подход помогает заказчику и органам экспертизы сразу увидеть, где и какие меры необходимо предпринимать, чтобы обеспечить безопасную эксплуатацию подземных сооружений. Последовательность выполнения оценки представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Шаги алгоритма

Этап	Вид данных	Результат
1. Классификация	Тип объекта, способ прокладки	Выбор модели расчёта
2. Сбор данных	Гидрогеология, геология	Таблица входных параметров

Продолжение Таблицы 2

3. Идентификация опасностей	Исторические ЧС, риски	Список сценариев
4. Количественная оценка рисков	Р, С	$R_i = P \times C$; суммарный риск
5. Разработка мероприятий	Технологические решения	Рекомендации по снижению риска
6. Интерпретация и принятие решения	Интегральные индексы	Отчёт с графиками и рекомендациями

5.4. Математический аппарат для количественной оценки рисков

Для количественной оценки рисков в предлагаемой методике используется комплексный математический аппарат, включающий:

1) Вероятностные модели оценки риска

Используется подход, основанный на расчете ожидаемой частоты возникновения отказов и тяжести их последствий. Риск оценивается по формуле 1.

$$R = P \cdot C \quad (1)$$

где:

R – риск (количественная мера опасности)

P – вероятность возникновения опасного события

C – последствия реализации опасного события (ущерб)

При этом вероятность возникновения отказа классифицируется по следующим категориям:

– Частый отказ (>1 случая в год)

– Вероятный отказ ($1 \cdot 10^{-2}$ случаев в год)

- Возможный отказ (10^{-2-10} -4 случаев в год)
- Редкий отказ (10^{-4-10} -6 случаев в год)
- Практически невероятный отказ ($<10^{-6}$ случаев в год)

2) Метод Монте-Карло для численного моделирования

Применяется для вероятностных расчетов на основе численного моделирования. [19] Алгоритм включает:

1. Определение ключевых случайных переменных
2. Задание законов распределения для каждой случайной переменной
3. Генерация набора случайных значений
4. Расчет результирующих параметров для каждого набора
5. Статистическая обработка полученных результатов

3) Матрица оценки рисков

Для качественной оценки рисков используется матрица, в которой сопоставляются тяжесть последствий отказов и вероятность их возникновения.[20] Категории тяжести последствий включают:

- Катастрофический отказ
- Критический отказ
- Некритический отказ
- Отказ с пренебрежимо малыми последствиями

На основе этой матрицы определяются категории рисков:

Категория А – недопустимый риск

Категория В – нежелательный риск

Категория С – допустимый риск

Категория D – приемлемый риск

Интегральный показатель экологической безопасности

Для комплексной оценки экологической безопасности предлагается использовать интегральный показатель, рассчитываемый по формуле 2.

$$IES = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot K_i \quad (2)$$

где:

IES – интегральный показатель экологической безопасности

w_i – весовой коэффициент i -го критерия

K_i – нормированное значение i -го критерия

n – общее количество критериев

Общая схема предлагаемой методики представлена в приложении А (рис. А.1).

5.5. Методы интерпретации результатов и принятия управленческих решений

Полученные результаты оценки экологической безопасности подземных пространств интерпретируются и используются для принятия управленческих решений в соответствии со следующим алгоритмом:

Ранжирование рисков и определение приоритетов

По результатам количественной оценки все выявленные риски ранжируются по степени значимости. Для каждой категории рисков определяются:

- Приоритетность реагирования;
- Необходимость дополнительных исследований;
- Требуемые ресурсы для управления риском;
- Ответственные лица и сроки реализации мероприятий.

Стратегии управления рисками

В зависимости от категории риска выбирается одна из следующих стратегий:

1. Для недопустимых рисков (категория А) – полное исключение риска путем изменения проектной концепции;
2. Для нежелательных рисков (категория В) – минимизация риска через корректировку проектных решений;

3. Для допустимых рисков (категория С) – контроль риска через мониторинг и превентивные мероприятия;

4. Для приемлемых рисков (категория D) – принятие риска с минимальными мерами контроля [17].

Корректировка проектных решений

В случае превышения установленных уровней риска выполняется корректировка проектных решений, направленная на:

- Повышение уровня безопасности строящихся подземных сооружений;
- Снижение воздействия на здания, сооружения и инженерные коммуникации в зоне влияния;
- Улучшение экологической обстановки на примыкающей территории;
- Полное изменение проектной концепции (в крайних случаях).

Система мониторинга и обратной связи

Для обеспечения эффективности принятых решений создается система мониторинга, которая включает:

- Контроль фактического состояния искусственной экосистемы «коммунальное подземное сооружение - массив горных пород - принятая технология - окружающая среда»;
- Использование специальных измерительно-диагностических информационных комплексов и систем;
- Регулярный анализ эффективности реализуемых мероприятий;
- Корректировку управленческих решений по результатам мониторинга.

5.6. Обоснование и ограничения применения методики

Разработанная методика обладает высокой степенью применимости благодаря следующим ключевым характеристикам:

Научная обоснованность и комплексность. Методика основана на современных научных достижениях в области геотехники, инженерной экологии, системного анализа и управления рисками. Она учитывает широкий спектр факторов, включая природные, техногенные и социально-экономические воздействия, что обеспечивает её полноту и всесторонний подход.

Адаптивность и гибкость. Методика разработана с учётом возможности её адаптации к различным видам подземных сооружений (транспортных, коммунальных, производственных и пр.) и широкого диапазона горно-гидрогеологических, климатических и техногенных условий. Благодаря модульной структуре её можно использовать как для новых проектов, так и для реконструкции и мониторинга существующих объектов.

Практическая ценность. Предлагаемый алгоритм включает чёткие рекомендации по проведению оценки, выявлению и ранжированию рисков, разработке корректирующих мероприятий. Методика облегчает процесс принятия решений на всех стадиях жизненного цикла объекта, повышая качество управления экологическими аспектами подземного строительства.

Стандартизация процедур. За счёт применения формализованных критериев, показателей и алгоритмов расчёта обеспечивается высокая степень прослеживаемости, воспроизводимости и контролируемости результатов оценки. Это создаёт основу для интеграции методики в систему экологического менеджмента организаций и в процессы государственной экспертизы.

Экономическая эффективность. Методика способствует оптимизации затрат на стадии проектирования и эксплуатации за счёт заблаговременного выявления и минимизации рисков. Снижение вероятности аварийных ситуаций и их последствий приводит к уменьшению прямых и косвенных убытков, а также снижает издержки на последующее восстановление среды.

Перспективы автоматизации. Использование количественных методов оценки, таких как метод Монте-Карло и интегральные показатели, создаёт предпосылки для разработки специализированных программных решений, что значительно повышает оперативность и точность анализа.

Таким образом, методика обеспечивает не только повышение уровня экологической безопасности подземных сооружений, но и интеграцию современных принципов устойчивого развития в практику подземного строительства и эксплуатации городских территорий.

Заключение

Работа посвящена комплексному исследованию проблем экологической безопасности подземного пространства в условиях активной урбанизации. Актуальность темы обусловлена возрастающей потребностью городов в эффективном использовании подземного пространства и одновременно – необходимостью сохранения экологического баланса и устойчивости городской среды. В процессе работы были изучены основные положения нормативно-правовой базы, регулирующей освоение подземного пространства, включая законодательство о недрах, градостроительную и земельную политику, а также регламенты в сфере охраны окружающей среды. Анализ показал наличие несогласованности между действующими нормами и необходимость их интеграции.

Выявлены и обобщены основные экологические риски, сопровождающие строительство и эксплуатацию подземных сооружений. К ним относятся нарушения гидрогеологических условий, загрязнение грунтовых вод, активация геодинамически опасных процессов (карст, суффозия, осадки), деформация наземных объектов, а также риски, связанные с техногенным загрязнением и шумовым воздействием. Особое внимание уделено взаимодействию подземной инфраструктуры с почвенным покровом и водоносными горизонтами, которые играют ключевую роль в устойчивом функционировании городской экосистемы.

В работе была предложена методика количественной оценки экологической безопасности подземных сооружений. Методика включает сбор исходных данных, идентификацию опасностей, экспертизу и ранжирование рисков, вероятностное моделирование возможных последствий, расчет интегральных показателей и формирование управленческих решений. Подход позволяет оценить степень риска и обосновать выбор проектных, инженерных и организационных мер по его снижению. В рамках практических рекомендаций предложены меры, направленные на предупреждение негативного воздействия на окружающую среду: проведение экологической экспертизы, использование

технологий очистки, проектирование защитных конструкций, организация экологического мониторинга и системы контроля качества среды на всех стадиях жизненного цикла объектов.

Также подчеркнута необходимость согласования подземного строительства с концепцией «зелёного каркаса» города и принципами устойчивого развития. Подземные объекты не должны рассматриваться изолированно – напротив, они являются частью единой урбоэкосистемы и должны проектироваться с учетом воздействия на природные и рекреационные территории, почвы и водные объекты. Совмещение подземного строительства с мероприятиями по озеленению, рекультивации и восстановлению природных связей обеспечивает баланс между инфраструктурным развитием и сохранением экологического потенциала города.

Таким образом, в работе сформулированы теоретические основы и практические инструменты для комплексной оценки и управления экологическими рисками при освоении подземного пространства. Предложенные подходы могут быть использованы в проектной, экспертной и природоохранной деятельности, а также при формировании региональных и муниципальных программ устойчивого развития городской среды.

Список литературы

1. О недрах : Федеральный закон от 21.02.1992 № 2395-1. — М. : [б. и.], 1992.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 29.12.2004 № 190-ФЗ (в ред. от 14.04.2023). — М. : [б. и.], 2004.
3. Сооружения подземные. Правила проектирования : свод правил СП 248.1325800.2023. — М. : Стройиздат, 2023.
4. Здания, сооружения и комплексы подземные. Правила градостроительного проектирования : свод правил СП 473.1325800.2019. — М. : Стройиздат, 2019.
5. Иванов А. В. Геоэкология подземных пространств мегаполисов : монография. — М. : Стройиздат, 2023. — 456 с.
6. Петрова С. И. Правовые аспекты недропользования в городских условиях : монография. — СПб. : РГГМУ, 2022. — 320 с.
7. Smith J. Underground Air Quality Monitoring Systems // Journal of Environmental Engineering. — 2024. — Vol. 150, № 3. — P. 45–67.
8. Технологии геоэкологического мониторинга : ГОСТ Р 58875-2020. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 2020.
9. Отчет о состоянии окружающей среды Москвы за 2024 год / Департамент природопользования г. Москвы. — М., 2025. — 234 с.
10. Питьевая вода. Гигиенические требования : СанПиН 2.1.4.1074-01. — М. : Роспотребнадзор, 2001.
11. Майорова Л. П., Архипов Е. А., Кошельков А. М. Определение весовых коэффициентов различных факторов при комплексной оценке экологического состояния городской территории // Инновации и инвестиции. — 2023. — № 7. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-vesovykh-koeffitsientov-razlichnyh-faktorov-pri-kompleksnoy-otsenke-ekologicheskogo-sostoyaniya-gorodskoy-territorii> (дата обращения: 13.03.2025).

12. Об охране окружающей среды : Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (в ред. от 28.12.2022). — М. : [б. и.], 2002.
13. Земельный кодекс Российской Федерации : Федеральный закон от 25.10.2001 № 136-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. — 2001. — № 44. — Ст. 2063.
14. О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию : постановление Правительства РФ от 16.02.2008 № 87 (в ред. от 23.12.2022). — М. : [б. и.], 2008.
15. Приказ Минстроя России от 15.04.2020 № 217/пр «Об утверждении формы заключения экспертизы проектной документации и (или) результатов инженерных изысканий». — М. : Минстрой России, 2020.
16. Шульженко С. Н., Самарин Е. В. Многокритериальный анализ экологических рисков при освоении подземного пространства мегаполисов // Экология урбанизированных территорий. — 2022. — № 3. — С. 12–23.
17. Ковалев С. В., Дмитриева Т. А. Адаптивные стратегии управления экологической безопасностью подземного строительства // Экология урбанизированных территорий. — 2022. — № 2. — С. 45–53.
18. Куликова Т. А. Комплексная методика оценки экологической безопасности подземных сооружений // Геоэкология и строительная механика. — 2005. — № 11. — С. 45–52.
19. Куликова Е. Ю. Выработка критериев экологической безопасности применения технологий и способов строительства коммунальных подземных сооружений // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2002. — № 1. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/vyrabotka-kriteriev-ekologicheskoy-bezopasnosti-primeneniya-tehnologiy-i-sposobov-stroitelstva-kommunalnyh-podzemnyh-sooruzheniy> (дата обращения: 15.04.2025).
20. Инженерно-геотехнические изыскания для строительства : свод правил СП 248.1325800.2023. — М. : Минстрой России, 2023. — 115 с.

21. Глозман О. С. Формирование классификации подземных зон города // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 6 (60). — Режим доступа: <https://research-journal.org/archive/6-60-2017-june/formirovanie-klassifikacii-podzemnyx-zon-goroda> (дата обращения: 09.05.2025). — DOI: 10.23670/IRJ.2017.60.03.
22. Куликова Е. Ю., Корчак А. В., Левченко А. Н. Стратегия управления рисками в городском подземном строительстве. — М. : Горная книга, 2005. — 223 с. — ISBN 5-7418-0387-3.
23. Ризабеков Е. Р., Турекулова А. И., Самойлов К. И. Подземные пространства в городах эпохи Нового времени // Наука и образование сегодня. — 2023. — № 1 (75). — С. 53–58. — Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54748428> (дата обращения: 09.05.2025).
24. Verma S. K. Влияние подземного строительства на ресурсы подземных вод: обзор // Landscape Architecture and Regional Planning. — 2018. — Vol. 3, № 2. — P. 23–27. — DOI: 10.11648/j.larp.20180302.11. — Режим доступа: <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.larp.20180302.11> (дата обращения: 21.05.2025).
25. Cheng X., Zhao X., He Q., Su X. Negative Influence of Urban Underground Space Development on Urban Microclimate // Sustainability. — 2022. — Vol. 14, № 16. — Art. 9836. — DOI: 10.3390/su14169836. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/16/9836> (дата обращения: 15.05.2025).
26. Zhang H., Song C., Geng Y., Luo Z., Chen Z. Carbon Neutrality Benefit by Developing Underground Space and Overlying Green Land: Calculation Methodology and Case Study // Buildings. — 2025. — Vol. 15, № 1. — Art. 78. — DOI: 10.3390/buildings15010078. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2075-5309/15/1/78> (дата обращения: 03.06.2025).
27. Пашкевич М. А., Данилов А. С. Экологическая безопасность и устойчивое развитие // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 153–154. — Режим доступа: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/16233> (дата обращения: 21.04.2025).

28. Zhao X., Chen Y., Wu Y., Guo D., Chen Z. Enhancing Urban Landscapes through Underground Space Utilization: Public Perceptions // Sustainability. — 2024. — Vol. 16, № 11. — Art. 4501. — DOI: 10.3390/su16114501. — Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/11/4501> (дата обращения: 01.06.2025).
29. Protection of Wildlife [Электронный ресурс] // International Tunnelling and Underground Space Association (ITA-AITES). — Режим доступа: <https://tunnel.ita-aites.org/en/why-go-underground/environmental-reasons/environmental-preservation/protection-of-wildlife> (дата обращения: 28.05.2025).
30. Pan Q., Dong Y.-H., Bobylev N., Peng F.-L. A Planning Management System for Metro-led Underground Space // ITA-AITES World Tunnel Congress 2024 : Shenzhen, China, 19–25 April 2024.
31. Бобылев Н. Г. Тоннели и устойчивое развитие // Стратегические проекты. Стратегические транспортные проекты. — 2024. — № 1. — Режим доступа: <https://www.techinform-press.ru/magazines/strategicheskie-proekty/katalog-strategicheskie-transportnye-proekty> (дата обращения: 29.04.2025).
32. Сашанова А. А., Тильвалдыева Л. Ш., Бобылев Н. Г. Методика подготовки местных добровольных обзоров о ходе реализации целей устойчивого развития Организации Объединённых Наций // Мировая экологическая повестка и Россия : материалы Всероссийской научной онлайн-конференции с международным участием, Москва, 16–18 ноября 2020 г. — М. : Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2020. — С. 246–252. — Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44576467> (дата обращения: 12.03.2025).

Приложение

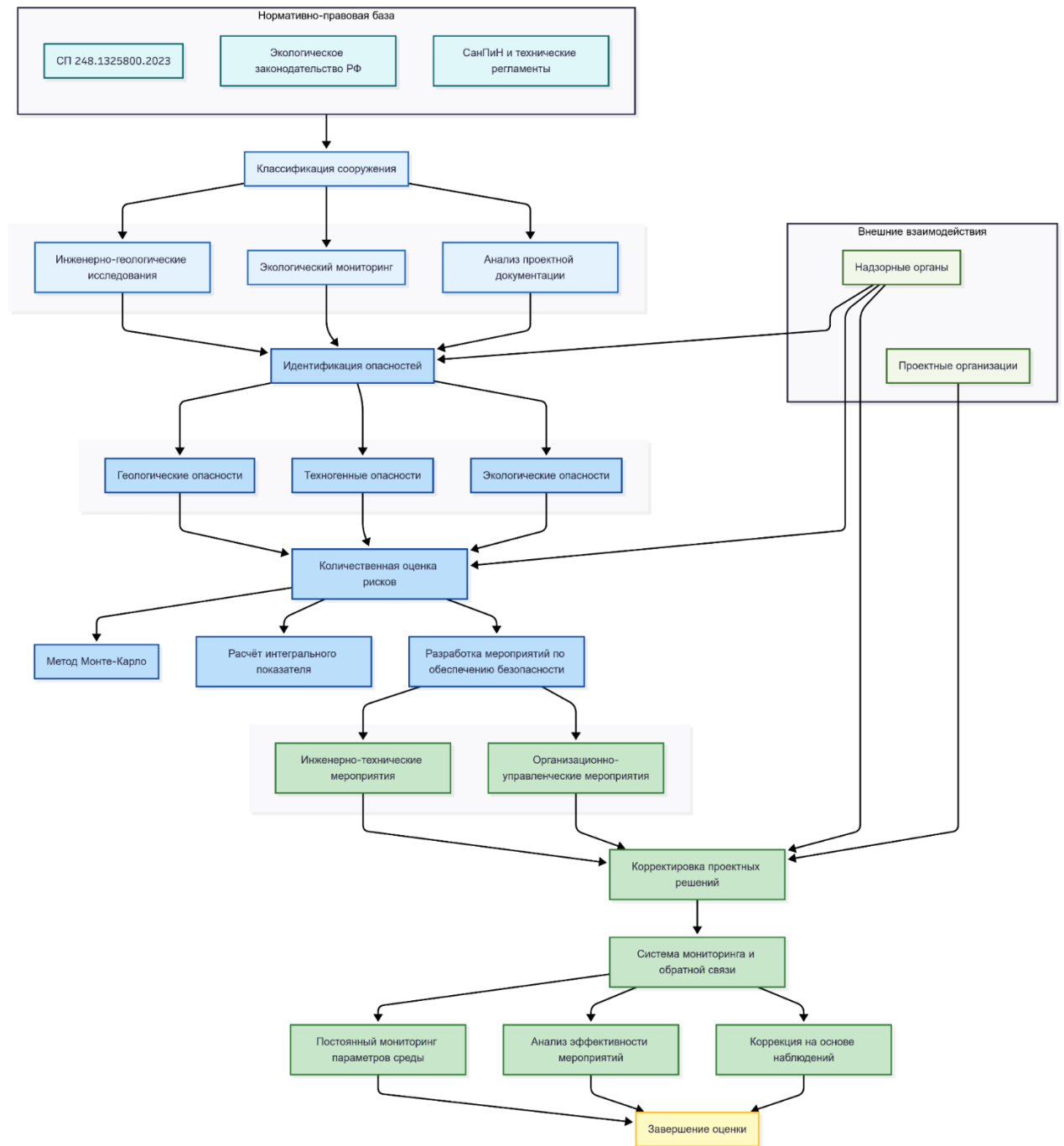


Рисунок А.1 – Схема методики оценки экологической безопасности подземных сооружений