



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
(бакалаврская работа)

**На тему «Экологические аспекты мастер планирования городского
подземного пространства»**

Исполнитель Отмахов Кирилл Константинович

Руководитель доцент кафедры прикладной и системной
экологии, кандидат технических наук

Бобылев Николай Геннадьевич

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

кандидат географических наук, доцент

Алексеев Денис Константинович

«15» 06 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1 ПОДЗЕМНЫЕ ГОРОДСКИЕ ПРОСТРАНСТВА В МАСТЕР-ПЛАНИРОВАНИИ	5
1.1 Экологические проблемы современных городов.....	5
1.2 Историческое формирование подземных городских пространств	7
1.3 Мастер-планирование в современном мире и России.....	12
2 НОРМАТИВЫ И МЕТОДИКИ В МАСТЕР-ПЛАНИРОВАНИИ.....	18
2.1 Ключевые экологические показатели для мастер-планирования подземных городских пространств.	18
2.2 Методики мастер-планирования подземных городских пространств	20
3 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВАХ.....	24
3.1 Подземные транспортные узлы	24
3.2 Подземные коммерческие пространства.....	28
3.3 Общественные подземные пространства	32
3.4 Инфраструктурные подземные пространства	36
4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОДЗЕМНЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ РОССИИ.....	40
4.1 Предпосылки использования подземных городских пространств для общественных функций в крупных городах России	40
4.2 Экономические предпосылки использования подземного пространства.	41
4.3 Транспортные предпосылки использования подземного пространства....	44
4.4 Архитектурно-художественные предпосылки использования подземного пространства	46
4.5 Климатические условия северных городов	48
4.6 Природно-экологические предпосылки использования подземного пространства	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
ЛИТЕРАТУРА.....	55

ВВЕДЕНИЕ

Городские территории XXI века являются домом для более 55% населения планеты, и эта цифра с годами будет увеличиваться. “Век городов”, начавшийся в 80-е годы, стал огромным толчком в экономическом развитии общества, но вместе с ним принес и риски, которые непосредственно связаны с процессом урбанизации. Городские системы осуществляют 70% глобальных выбросов углеродов и парниковых газов, при этом не возмещая ущерб, наносимый окружающей среде.

Деграция экосистем, вызванная расширением мегаполисов вне их муниципальных границ, приводит к разделению естественных экосистем и ландшафтов. Изменения климата, уменьшение биоразнообразия и выбросы загрязняющих веществ имеют одинаковый уровень угрозы как для природы, так и для человека. Поэтому внедрение вертикализации для сдерживания негативных факторов городских систем является необходимостью для развития устойчивых систем.

Одна из самых опасных проблем современных городов это загрязнение воздуха. Темпы роста современных городов создают ситуации, когда жилые комплексы вынуждены строить возле промышленных зон, что негативно сказывается на уровне жизни населения. По данным Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), 80% людей вынуждены проживать в районах с качеством воздуха ниже рекомендуемых ВОЗ. Рост уровней загрязнения воздуха прямо пропорционален снижению уровня дохода населения в городских системах, соответственно большие массы населения подвержены респираторным заболеваниям, сердечно-сосудистым проблемам и другим последствиям.

Мастер-план — это документ, сочетающий социально-экономическое и пространственное развитие города. Он определяет вектор развития городских систем задавая приоритеты, цели и конкретные механизмы их достижения. Его роль заключается в создании комплексной системы управления городом,

обеспечивающей устойчивый рост, повышение качества жизни и систематизацию структур.

Мастер-план служит инструментом координации между муниципалитетом, частными предпринимателями и жителям, связывая их потребности с экономическими и экологическими задачами, при этом учитывая как уже существующие объекты, так и формируя облик города для будущих поколений.

Рациональное внедрение подземных городских пространств является необходимостью в нынешнее время, так как современные мегаполисы сталкиваются с перенаселением, экологическими кризисами и дефицитом свободных территорий. На сегодняшний день подземная урбанистика вышла за рамки вспомогательной науки в сфере градостроительства, превратившись в инструмент создания устойчивых, технологичных и социально ориентированных городов.

Быстрое развитие подземных пространств стало возможным благодаря появлению множества новых градостроительных технологий и технических решений. Энергоэффективность таких структур может быть достигнута через использование геотермальных технологий: норвежский бассейн в Холмлии использует температуру скальных пород, сокращая затраты на отопление на 40%.

Социальное восприятие подземных пространств также трансформируется. Архитекторы активно борются со стигмой “подземелья”, внедряя естественное освещение через световые колодцы (церковь Темппелиаукио в Хельсинки) и создавая открытые атриумы, как в музее Корана в Тегеране. Однако вызовы остаются: психологический дискомфорт связанный требует продуманного дизайна цветовой навигации и окружения, что бы посетители таких пространств не испытывали дезориентацию.

Экономическая целесообразность является спорным вопросом. Стоимость подземных объектов в среднем выше на 30-50%, но имеет долгосрочные выгоды, такие как снижение эксплуатационных расходов и

повышение стоимости прилегающих территорий. Таким образом, современные пространства – это не просто альтернатива наземной инфраструктуре, а сложная экосистема, где инженерные решения, экологические принципы и социальные потребности тесно переплетены друг с другом. Их успех зависит от баланса между всеми факторами, что делает подземную урбанистику одним из ключевых направлений развития городов XXI века.

Рост урбанизации, ограниченность наземных ресурсов, строгие требования государственных структур по отношению к экологичности градостроения и понижение качества жизни городского населения подчеркивают актуальность данной темы.

Цель данной работы – изучение развития подземных городских пространств и их перспективы в смягчении отрицательного влияния городов на окружающую среду.

Задачи научно-исследовательской работы:

1. Рассмотрение связи экологии и мастер-планирования, истории подземных городских пространств и мастер-планирования
2. Изучение основных экологических проблем, с которыми сталкиваются современные города.
3. Изучение экологических требований выдвигаемых к подземным городским пространствам.
4. Примеры успешного внедрения подземных пространств в структуру городов.

Объект исследования: Подземные городские пространства в мастер-планировании.

Предмет исследования: Интеграция городских подземных пространств в современную структуру городов и их влияние на окружающую среду.

1 ПОДЗЕМНЫЕ ГОРОДСКИЕ ПРОСТРАНСТВА В МАСТЕР-ПЛАНИРОВАНИИ

1.1 Экологические проблемы современных городов

Экологические проблемы и вызванные ими глобальные вызовы социально-экономического, культурного и технологического развития с каждым годом становятся все более актуальными для жителей не только России, но и всей планеты. Крупные города, где сконцентрированы промышленные мощности и значительная доля человеческих ресурсов, являются мощным источником вредного воздействия на окружающую среду, и одновременно с этим – наиболее уязвимыми к последствиям этого загрязнения. Увеличение объема вредных выбросов в атмосферу, в водную среду, загрязнение почвы, изменение климата, разрушение экосистем, постоянное расширение городских границ – всё это негативно сказывается на здоровье как самих горожан, так и жителей близлежащих территорий. Как следствие, ухудшение экологической ситуации может провоцировать отток населения из малых городов, где зачастую недостаточно инвестируют в охрану окружающей среды, а в критических случаях – ставить под вопрос само существование населенного пункта.

Экология перестает быть лишь одним из разделов мастер-плана, становясь его ключевым интегрирующим принципом и основой для обеспечения устойчивого развития территории. Мастер-планирование, как стратегический инструмент пространственного развития муниципальных образований (в соответствии с Градостроительным кодексом РФ и ФЗ № 131), обязано рассматривать экологические аспекты не как ограничивающий фактор, а как отправную точку для формирования безопасной, здоровой и жизнеспособной среды для нынешнего и будущих поколений.

Оценка и мониторинг составляют основу для принятия обоснованных решений. Это предполагает тщательную оценку современного экологического

состояния территории, включая качество воздуха, воды, почв, уровень шума, состояние биологического разнообразия и наличие особо охраняемых природных территорий (ООПТ), а также прогноз возможных изменений под влиянием планируемой деятельности. Неотъемлемой частью этого процесса является организация постоянного экологического мониторинга.

Минимизация антропогенного воздействия достигается через комплекс мер. Пространственное зонирование играет здесь ключевую роль, подразумевая выделение и строгую защиту экологически ценных территорий, таких как водоохранные зоны, леса, рекреационные зоны, зеленые коридоры, а также санитарно-защитных зон промышленных предприятий. Не менее важны решения в сфере транспорта и мобильности, где приоритет должен отдаваться развитию экологически чистого транспорта (электротранспорт, велоинфраструктура), созданию пешеходных зон и оптимизации логистики для снижения вредных выбросов.

Существенный вклад вносит внедрение требований к энергоэффективности и ресурсосбережению в строительстве и эксплуатации зданий, использованию возобновляемых источников энергии (ВИЭ), развитию современных систем сбора, очистки сточных вод и замкнутых циклов водопользования, а также комплексной переработке твердых коммунальных отходов (ТКО). Дополнительным направлением является поощрение стандартов "зеленого" строительства, создание и сохранение внутриквартального озеленения, а также внедрение технологий "зеленых" крыш и фасадов.

Адаптация к изменению климата становится критически важной задачей. Она требует обязательного учета климатических рисков – таких как повышение температур, волны жары, паводки и подтопления – при проектировании инженерной инфраструктуры, систем водоотведения, создании буферных зеленых зон и выборе устойчивых к новым условиям видов растений для озеленения. Повышение экологической устойчивости территории напрямую связано с развитием и восстановлением ее

экологического каркаса. Это означает формирование сети взаимосвязанных зеленых и водных пространств, обеспечивающих экологическую связность, сохранение и увеличение биоразнообразия даже в условиях плотной городской застройки. Управление экологическими рисками и обеспечение безопасности населения требует выявления зон с накопленным экологическим ущербом и потенциально опасных объектов.

Мастер-план должен предусматривать меры по снижению этих рисков и планирование действий по ликвидации возможных последствий аварийных ситуаций. Формирование экологической культуры жителей также является задачей планирования. Это реализуется через проектирование объектов экологического просвещения, таких как экоцентры и экологические тропы, а также интеграцию природных элементов и образовательных функций в общественные пространства, что способствует повышению экологической грамотности и ответственности населения. [2]

1.2 Историческое формирование подземных городских пространств

Истоки освоения подземного пространства уходят корнями в глубокую древность. Первые подземные сооружения носили исключительно утилитарный характер и были обусловлены базовыми потребностями выживания и защиты. В дальнейшем с ростом интеллекта и получением первых инструментов, люди начали первые города, которые основывались возле важных для выживания территорий: угодий, водоемов и недоступных для бедствий укрытий.

Каппадокия – это историческое название территории на землях современной Турции. Здесь расположены многочисленные подземные города созданные ориентировочно в первом тысячелетии до нашей эры. Самое же раннее упоминание датируется концом 6 века до н.э., когда она появляется как одна из стран Персидской державы. Данная местность отличается уникальной геологией, образовавшись в период кайнозоя, около 65-62 млн лет назад, она

вся исчерчена разломами, оставшимися после периода вулканической активности. В последующие же периоды основное влияние оказывали эрозия и выветривание, именно из-за этих факторов образовались знаменитые каменные столбы ху. Геологической особенностью, по которой здесь появилось множество селений является мягкий вулканический туф, легко обрабатываемая порода.

Одним из самых знаменитых подземных городов, располагающихся в этой зоне, является Деринкую, в дословном переводе означающий глубокий колодец. Он был образован в 1 тысячелетии до н.э., однако обнаружили его только к 1963 году.

Подземелье представляло собой сложную систему из всевозможных жилых помещений, вентиляционных шахт, колодцев и даже кладбищ. Меры защиты этого комплекса так же были предусмотрены: огромные валуны у входов и потайные ходы находились на всех уровнях. До сих пор не ясно использовался ли этот город только при возникновении опасности, или же являлся постоянным местом жительства множества людей.

Первый уровень представлял собой комплекс из жилых помещений, кухонь, конюшен и даже церквей. Второй ярус — это отличительная черта Деринкую — огромный зал с множеством комнат, ученые предполагают, что это были помещения духовного училища. На следующих ярусах расположились оружейные склады и казармы, после которых комнаты и проходы сужаются с каждым ярусом. В данном городе насчитывается 52 вентиляционные шахты, они служили одновременно колодцами, доходя до грунтовых вод и оставались востребованными вплоть до 1962 года. [4]

В античный период (особенно в Древнем Риме) подземное строительство достигло значительного развития, но все еще было фрагментарным и решало конкретные инженерные задачи. Акведуки и Клоака Максима — это масштабные подземные инженерные сети для водоснабжения и канализации, демонстрирующие высокий уровень строительных технологий. Их планирование было частью общей инфраструктурной

стратегии города, но не комплексным планированием подземного пространства как такового.

Эпоха Средневековья и Ренессанса характеризовалась дальнейшим развитием преимущественно оборонительных и инфраструктурных функций подземелья в условиях роста городов и обострения конфликтов. Сложные системы тайных ходов, контрминных галерей под замками и городскими стенами (например, под крепостями Каркассон, Виден, подземелья Праги). Планировались как часть единой оборонительной системы крепости или города. Широкое распространение подвальных помещений под жилыми и общественными зданиями для хранения запасов, ремесленных мастерских, позднее – винных погребов, развивалось стихийно в рамках отдельных участков. Продолжалось строительство подземных резервуаров и каналов, часто засекреченных для защиты водоснабжения во время осад.

Пльзень – один из крупнейших городов Чехии, основанный в 1295 году, благодаря своему близкому расположению к другим крупным городам тех времен стал важным торговым пунктом и получил быстрое развитие. Практически сразу с возникновением торговли, были созданы Пльзеньские катакомбы, на текущий момент их протяженность составляет около 24 километров. Изначально эти помещения использовались для складирования продовольственных товаров и путями эвакуации для населения в случае нападения. С течением времени сюда так же переместились склады, казармы, ремесленные мастерские, кладбища и винокурни.

Так же в подземельях Пльзеня была применена одна из первых канализационных систем с комплексом колодцев для подведения воды в дома. Вода, забираемая системой колодцев, поступала в водонапорные башни через насосы, после чего достигала городских фонтанов, где была доступна любому жителю города. Сейчас это подземелье открыто для туристического посещения в музее пивоварения города.

XIX век стал переломным этапом в связи с бурной индустриализацией, стремительной урбанизацией и технологическим прогрессом. Появление и

массовое строительство железных дорог потребовало прокладки тоннелей в городах. Кульминацией стало создание первых линий метрополитена (Лондон, Нью-Йорк, Будапешт, Париж, Берлин). Это был первый пример крупномасштабного, запланированного инфраструктурного освоения подземелья, требовавшего сложной инженерии (тоннелепроходческие щиты, вентиляция, эскалаторы) и координации с наземной застройкой.

Канализация, водопровод, газоснабжение, позже – электрические и телефонные кабели массово уходили под землю, освобождая поверхность и улучшая санитарные условия (грандиозная реконструкция Парижа под руководством барона Османа – яркий пример системного, хотя и не всегда скоординированного, размещения инфраструктуры). Промышленные объекты: Склады, холодильники, некоторые производства размещались в подземелье для экономии места или использования естественных условий. Рост плотности застройки: В крупных городах (Лондон, Париж, Нью-Йорк) остро встала проблема нехватки пространства, что стимулировало поиск альтернатив, включая подземное строительство.

В процессе индустриализации улучшались и методы прокладывания подземных путей. В 1813 году английский инженер Марк Брюнель изобрел проходческий щит, благодаря которому появилась возможность прокладывать тоннели в мягком грунте под водоемами. Первоначальной демонстрацией проекта должен был стать тоннель под большой Невой в Санкт-Петербурге, но из-за смерти Александра Первого, эту идею воплотили в Лондоне, под рекой Темзой. Этот объект изначально являлся пешеходным, но в связи с быстрым ростом населения Лондона и трудной транспортной ситуацией был выкуплен для реализации первой в мире системы метрополитена.

Проект строительства подземной железной дороги был утвержден в 1855 году, обоснованием для него стала невозможность надземного положения железнодорожных путей из-за опасений нанесения вреда историческим зданиям. Несмотря на это, во время строительства были снесены множество объектов инфраструктуры и зданий, пути были вырыты траншейным методом,

на глубине 10 м, используя арочные кирпичные своды. Первая линия открылась 10 января 1863 года и насчитывала семь станций протяженностью 6 километров. Для движения составов использовалась паровозная тяга, чтобы не допустить накопления пара внутри тоннелей, его конденсировали и выбрасывали на поверхность, зачастую такие комплексы маскировали фальшивыми домами. Этих мер все равно не было достаточно и первые года метро Лондона оставалось задымленным, трудным для дыхания пространством.

Проблемы задымленности и сноса зданий для прокладывания путей требовали незамедлительного решения, и поэтому с улучшением технологий тоннели уходили все глубже под поверхность, а паровая тяга была заменена электропоездами, впервые появившимися в 1900 г. Но главной проблемой, оставалась неорганизованность, каждая ветка метро и станция могли принадлежать разным частным компаниям, инвестировавшим в их строительство. Эта проблема была решена лишь в 1933 году, когда по требованию властей все независимые и муниципальные компании объединились в Департамент лондонского пассажирского транспорта, а после, в 1948 году и вовсе были национализированы лейбористским правительством.[6]

После Второй мировой войны, на фоне ускоренного восстановления городов и нового витка урбанизации, началось осознание подземного пространства как целостного ресурса и компонента городского развития.

- Опыт бомбоубежищ: Массовое строительство подземных убежищ во время войны продемонстрировало возможности крупномасштабных подземных сооружений и их роль в безопасности.
- Концепция "многоуровневого города": Идея организации городской жизни на нескольких вертикальных уровнях, где подземелью отводится значительная роль (торговля, транспорт, пешеходные связи).
- Пионерские проекты комплексного освоения: Монреальский "Подземный город" (RÉSO) (с 1962 г.) наиболее масштабный и успешный

ранний пример. Изначально соединив несколько станций метро с подземными торговыми галереями под деловым центром, проект вырос в огромную многофункциональную сеть (торговля, услуги, транспорт, пешеходные связи, общественные пространства), ставшую моделью для мира. Его развитие потребовало координации усилий разных собственников и городских властей, заложив основы для мастер-планирования. Подобные, но менее масштабные проекты появились в Торонто (PATH), Токио, Осаке, Хельсинки (сеть пассажей).

- Развитие технологий: Совершенствование методов проходки тоннелей (щиты большого диаметра, замораживание грунтов), вентиляции, освещения, безопасности сделало подземное строительство более надежным и экономически оправданным для сложных объектов.

Характерными чертами стали: переход от отраслевого к комплексному взгляду на подземное пространство; появление пионерских интегрированных проектов; начало формирования концепций многоуровневого развития городов; осознание роли подземелья в повышении комфорта городской среды (пешеходные связи в неблагоприятном климате); зарождение междисциплинарного подхода; становление мастер-планирования подземных городских пространств как ответа на вызовы мегаполисов.

1.3 Мастер-планирование в современном мире и России

Мастер-планирование, понимаемое как комплексный, стратегический и долгосрочный процесс пространственной организации территорий, играет критически важную роль в формировании устойчивой среды как в глобальном масштабе, так и в национальных контекстах, в том числе в Российской Федерации. Конечные результаты реализации проектов и мастер-планов должны опираться на принципы и образ будущего города, для достижения этих целей важно соблюдать порядок составления технического задания. Разработка технического задания может быть поделена на 2 этапа,

аналитический (Рис. 1), позволяет оценить состояние городской среды и сформировать понимание о предстоящих работах.

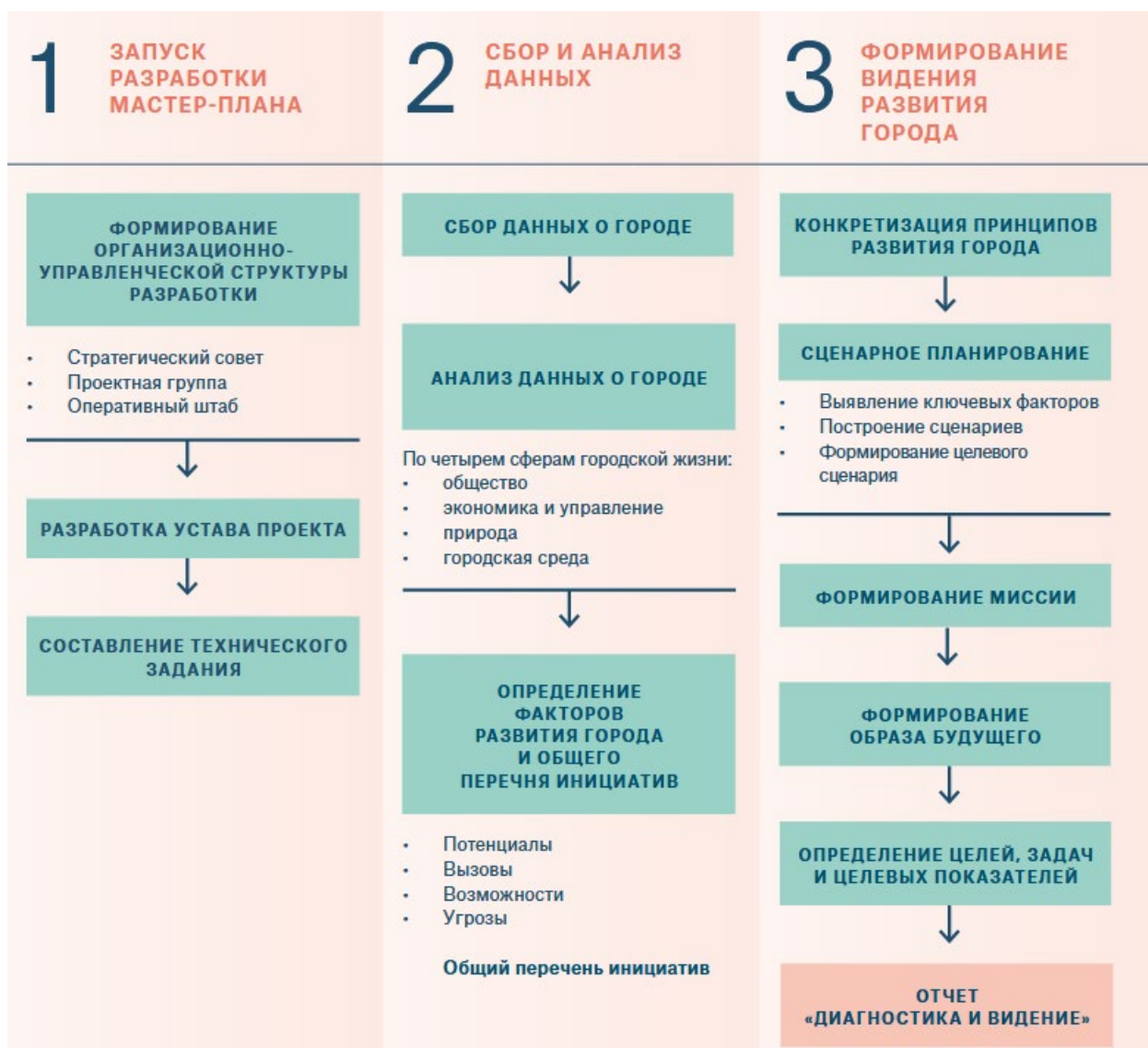


Рис. 1 Первый (аналитический) этап создания мастер-плана

Второй этап (Рис. 2) создает четкие сценарии и выявляет ключевые проекты, для которых формируются организационно-управленческие структуры мониторинга. Приоритизация направлений позволяет уже на этом этапе оценить будущие перспективы города, стоимость проектов и мероприятий, а также установить сроки выполнения работ. Мониторинг определяется заказчиком и может носить рекомендательный характер, тогда как внедрение в нормативно-правовую базу является обязательным условием для любого мастер-плана.[11]

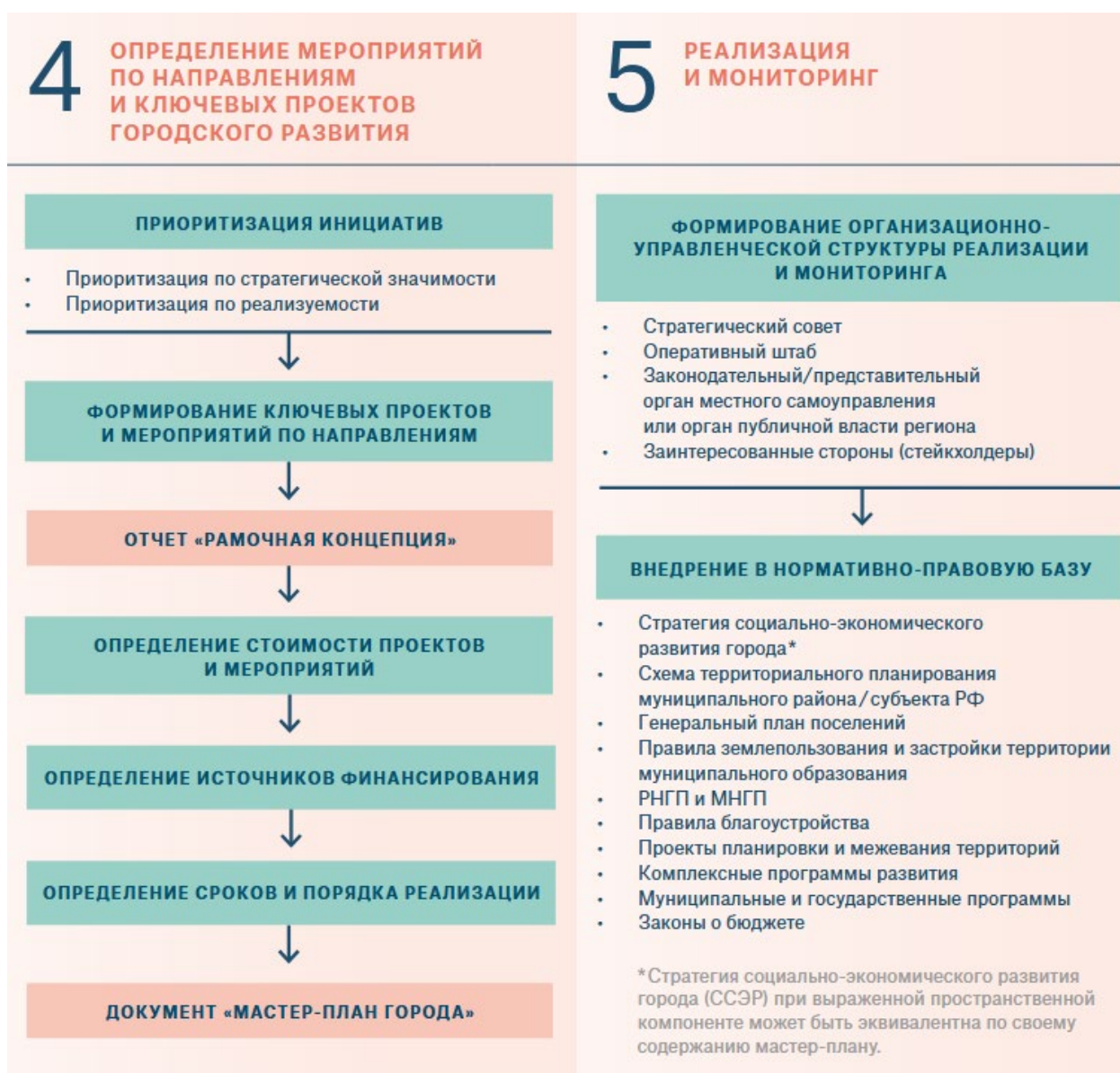


Рис. 2 Второй этап создания мастер-плана

Города, повышая свою конкурентоспособность все чаще обращаются к мастер-планированию как к инструменту системной организации пространства городских пространств, агломераций, особых экономических зон и инфраструктурных узлов. основополагающими принципами устойчивого развития стали документы принятые на конференции ООН по окружающей среде и развитию в Рио-де-Жанейро, 1992 год и в 2015 году Генеральная Ассамблея ООН утвердила Цели в области устойчивого развития (Sustainable Development Goals – SDGs). Ключевым документом стала Новая

программа развития городов (New Urban Agenda), прямо предписывающая внедрение комплексного планирования.

На национальном уровне нормы пространственного планирования устанавливаются актами парламентов, примерами могут служить: Закон о городском и сельском планировании Великобритании принятый в 1990 и Кодекс городского планирования Франции. Регулирование землепользования и застройки осуществляется местными органами власти и специальными координирующими органами. Для организации независимой оценки привлекаются сторонние организации, эта процедура является обязательной в Европейском союзе, на основании директивы 2001/42/ЕС.

В Российской Федерации существует правовая основа мастер-планирования. Основопологающим документом является Градостроительный кодекс Российской Федерации (ГрК РФ) от 29.12.2004 № 190-ФЗ, принятый Государственной Думой Федерального Собрания РФ 22 декабря 2004 года и одобренный Советом Федерации 24 декабря 2004 года.

Система документов территориального планирования и градостроительного зонирования строго иерархична:

- Схема территориального планирования Российской Федерации разрабатывается и утверждается Правительством Российской Федерации (ст. 10 ГрК РФ).
- Схемы территориального планирования субъектов Российской Федерации разрабатываются и утверждаются высшим исполнительным органом государственной власти субъекта РФ (например, Правительством области, Администрацией края) в порядке, установленном законами субъекта РФ, но в соответствии с ГрК РФ (ст. 14 ГрК РФ).
- Генеральные планы поселений и городских округов (основной документ мастер-планирования на муниципальном уровне) разрабатываются местной администрацией и утверждаются представительным органом местного самоуправления (городской Думой, Советом депутатов) после обязательных публичных слушаний (ст. 24, 28 ГрК РФ). Генплан обладает

высшей юридической силой на муниципальном уровне в сфере градостроительства.

Правила землепользования и застройки (ПЗЗ), включающие карты зонирования и градостроительные регламенты, разрабатываются местной администрацией и утверждаются представительным органом местного самоуправления (ст. 30, 32 ГрК РФ). ПЗЗ являются основным правовым инструментом реализации Генплана и прямым регулятором землепользования. Правовой статус публичных обсуждений градостроительной документации закреплён не только в ГрК РФ (ст. 28, 31), но и в Федеральном законе от 06.10.2003 № 131-ФЗ "Об общих принципах организации местного самоуправления в Российской Федерации" (ст. 28.1, 28.2), также принятом Государственной Думой 16 сентября 2003 года и одобренном Советом Федерации 24 сентября 2003 года. Федеральные целевые программы, влияющие на планирование (например, бывшая ФЦП "Жилище", переформированный в национальный проект "Жильё и городская среда"), инициируются Правительством РФ и утверждаются его постановлениями или указами Президента РФ. Инициативы в области "умного города" реализуются в рамках распоряжения Правительства РФ от 29.03.2019 № 510-р "Об утверждении методологии реализации мероприятий по цифровизации городского хозяйства "Умный город"". [12]

Таким образом, мастер-планирование представляет собой ключевой инструмент пространственного развития, опирающийся на четкую правовую базу. Глобально его рамки задаются решениями ООН и национальными законами, принимаемыми парламентами, а реализация осуществляется местными властями. В России система строго иерархична: федеральные законы принимаются Федеральным Собранием РФ (Госдумой и Советом Федерации), документы федерального уровня утверждаются Правительством РФ, региональные – органами власти субъектов РФ, а ключевые муниципальные документы (Генплан и ПЗЗ) принимаются представительными органами местного самоуправления в рамках полномочий,

делегированных федеральным законодательством. Эффективность этого механизма напрямую зависит от качества правовых норм, согласованности действий всех уровней власти и вовлечения стейкхолдеров в рамках установленных процедур.

2 НОРМАТИВЫ И МЕТОДИКИ В МАСТЕР-ПЛАНИРОВАНИИ

2.1 Ключевые экологические показатели для мастер-планирования подземных городских пространств.

При разработке мастер-планов освоения подземного пространства в контексте экологии и природопользования необходимо опираться на систему взаимосвязанных показателей, обеспечивающих оценку текущего состояния, прогнозирование воздействий и соблюдение нормативов устойчивого развития. Основные группы показателей включают:

1. Показатели состояния геологической среды и недр:
 - Прогнозируемые величины и градиенты осадок земной поверхности (мм, мм/мес).
 - Допустимые деформации наземных сооружений и инфраструктуры (кривые, углы поворота).
 - Уровень сейсмической опасности территории (баллы, ускорения).
 - Абсолютные отметки и колебания уровня грунтовых вод (м БС).
 - Естественный и прогнозируемый гидродинамический режим водоносных горизонтов (напоры, градиенты, скорости фильтрации).
 - Химический состав и минерализация подземных вод (мг/л, г/л), соответствие нормативам (СанПиН 1.2.3685-21, ГОСТы).
 - Прогнозируемое изменение качества подземных вод (риск загрязнения нефтепродуктами, тяжелыми металлами, строительными материалами).
 - Величина водопритока в сооружения (м³/сут). [8]
2. Показатели состояния и загрязнения компонентов окружающей среды:

- Содержание загрязняющих веществ (тяжелые металлы, нефтепродукты, бенз(а)пирен, пестициды) в зоне влияния строительства/эксплуатации (мг/кг), сравнение с ПДК/ОДК.

- Кислотность (pH), содержание органического вещества.

- Концентрации специфических загрязнителей от подземных объектов (пыль, CO, NO_x, SO₂, летучие органические соединения - ЛОС) в приземном слое и вентиляционных выбросах (мг/м³), сравнение с ПДК.

- Уровни шума и вибрации от работы механизмов, транспорта в тоннелях (дБА, дБ, м/с).

- Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения (мкЗв/ч) и содержание радона в подземных сооружениях и прилегающих зданиях.

3. Показатели воздействия на биоту и экосистемы:

- Состояние и устойчивость наземных экосистем (лесных массивов, лугов, водно-болотных угодий) в зоне влияния.

- Наличие и статус охраняемых видов флоры и фауны, краснокнижных видов (по данным кадастров ООПТ).

- Сохранность и доступность зеленых и рекреационных зон. IV.

Показатели ресурсопотребления и отходов:

- Объем извлекаемых грунтов (м³).

- Потребление энергии на строительство и эксплуатацию (кВт*ч/год), в т.ч. на вентиляцию и освещение.

- Потребление воды на строительные нужды и эксплуатацию (м³/сут).

- Объемы и класс опасности образующихся строительных и эксплуатационных отходов (т/год).

- Процент утилизации и рециклинга извлеченных грунтов и других материалов (%).

4. Показатели экологических рисков и устойчивости:

- Вероятность и масштаб возможных аварийных ситуаций (прорыв плывунов, загрязнение водоносного горизонта, обрушения).
- Зоны санитарной охраны (ЗСО) водозаборов и их соблюдение.
- Риски для здоровья населения (шум, вибрация, качество воздуха, радон).
- Вклад в снижение наземной транспортной нагрузки и связанных выбросов (тонн CO₂-экв. /год).
- Сокращение площади наземной застройки и запечатывания почв (га).
- Результаты оценки жизненного цикла (LCA) подземных решений (по категориям воздействия: углеродный след, ацидификация, эвтрофикация и др.). [10]

2.2 Методики мастер-планирования подземных городских пространств

Мастер-планирование подземных городских пространств представляет собой сложный, междисциплинарный процесс, требующий применения комплексных методик для обеспечения устойчивого развития урбанизированных территорий с минимизацией негативного воздействия на окружающую среду. В контексте экологии и природопользования ключевое значение приобретают следующие научно обоснованные методики:

1. Системный анализ и комплексное территориальное планирование: Интеграция подземного пространства в общую систему городского планирования. Анализ взаимосвязей между наземной и подземной застройкой, транспортными, инженерными и экологическими системами. Позволяет оптимизировать использование территории, снижая нагрузку на наземные экосистемы (за счет переноса части функций под землю), минимизировать необходимость расширения городских границ ("расползание" города) и сохранять ценные природные и рекреационные зоны. Оценка совокупного воздействия наземных и подземных объектов на геологическую среду, водный баланс и биоту.

2. Геоэкологическое и инженерно-геологическое обоснование: Детальное изучение геологического строения, гидрогеологических условий (уровень грунтовых вод, водоносные горизонты, химический состав вод), геодинамических процессов (карст, суффозия, оползни, сейсмичность), свойств грунтов. Включает бурение, геофизические исследования, лабораторные анализы, мониторинг. Критически важна для прогнозирования и предотвращения негативных последствий строительства и эксплуатации: подтопления территорий, загрязнения подземных вод (основного источника питьевого водоснабжения во многих регионах), активизации опасных геологических процессов, деформаций земной поверхности. Определение зон экологического риска и ограничений для освоения.

3. Геомеханическое моделирование: Применение методов математического и компьютерного моделирования для прогнозирования поведения массива горных пород при строительстве и эксплуатации подземных сооружений. Позволяет оптимизировать конструкции и методы строительства, минимизируя объемы вынимаемого грунта и, как следствие, воздействие на геологическую среду и объемы отходов. Прогнозирует возможные деформации поверхности, которые могут повредить наземные экосистемы, здания и инфраструктуру.

4. Гидрогеологическое моделирование: Создание цифровых моделей потока подземных вод и миграции загрязняющих веществ (используются специализированные ПО типа MODFLOW, FEFLOW, GMS). Оценка влияния дренажа подземных сооружений, противодавления, гидроизоляции на режим подземных вод. Позволяет спрогнозировать и предотвратить истощение водоносных горизонтов, изменение направления потоков подземных вод, подтопление, а главное – риск загрязнения подземных вод строительными материалами, техническими жидкостями, бытовыми стоками. Основа для разработки эффективных систем гидроизоляции и дренажа с минимальным экологическим следом.

5. Экологический риск-ориентированный подход: Идентификация потенциальных источников экологической опасности (загрязнение вод, почв, воздуха; шум; вибрация; тепловое загрязнение; нарушение геологической среды) на всех стадиях жизненного цикла подземного объекта. Оценка вероятности возникновения и масштаба возможного ущерба. Разработка мер по управлению рисками (предотвращение, минимизация, ликвидация последствий). Прямо направлен на защиту окружающей среды и здоровья населения. Позволяет ранжировать участки по пригодности для освоения с точки зрения экологической безопасности, обосновать выбор технологий строительства и эксплуатации, спланировать мониторинговые программы.

6. ГИС-технологии и пространственный анализ: Создание многослойных геоинформационных систем (ГИС), интегрирующих данные геологии, гидрогеологии, экологии, инфраструктуры, градостроительных планов, социально-экономических показателей. Проведение пространственного анализа (наложение слоев, буферные зоны, сетевой анализ). Позволяет визуализировать и анализировать экологические ограничения (охранные зоны водозаборов, ООПТ, зоны санитарной охраны, участки с высоким риском оползней и т.д.), моделировать сценарии развития, выбирать оптимальные коридоры для подземных коммуникаций и транспортных тоннелей с наименьшим воздействием на чувствительные экосистемы и объекты.

7. Методы оценки жизненного цикла (LCA) и устойчивости: Количественная оценка совокупного экологического воздействия подземного объекта или системы объектов на всех стадиях: добыча материалов, строительство, эксплуатация, утилизация/реконструкция. Оценка по категориям (изменение климата, истощение ресурсов, эвтрофикация, токсичность и др.). Позволяет сравнивать варианты проектных решений и выбирать наиболее экологически эффективные в долгосрочной перспективе. Учитывает не только локальные, но и глобальные экологические последствия (например, углеродный след).

8. Нормативно-правовой анализ и соответствие: Анализ действующей законодательной и нормативно-технической базы в сфере градостроительства, недропользования, охраны окружающей среды, санитарно-эпидемиологического благополучия, безопасности. Обеспечение соответствия проекта экологическим требованиям на этапе планирования – залог предотвращения нарушений и негативных экологических последствий в будущем.

Эффективное мастер-планирование подземных городских пространств в контексте экологии и природопользования требует не изолированного применения отдельных методик, а их интеграции в единую методологическую платформу. Приоритет должен отдаваться превентивным мерам на основе глубокого геоэкологического обоснования, моделирования и оценки рисков. Ключевая цель – превратить освоение подземного пространства в инструмент повышения экологической устойчивости города за счет рационального использования ресурсов, снижения антропогенной нагрузки на наземные экосистемы и предотвращения необратимых изменений геологической среды. Учет экологического фактора на стадии мастер-планирования является экономически и экологически более эффективным, чем ликвидация последствий на последующих этапах.

3 ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В ПОДЗЕМНЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВАХ

3.1 Подземные транспортные узлы

Подземные транспортные узлы являются неотъемлемыми элементами инфраструктуры современных мегаполисов, обеспечивая высокую интенсивность и связность пассажиропотоков. Однако их функционирование сопряжено с высоким энергопотреблением, необходимостью поддержания искусственной среды в замкнутом пространстве и образованием отходов. Реализация целевых экологических мероприятий в ПТУ направлена на минимизацию их негативного воздействия и одновременное усиление их положительной роли в создании устойчивой городской транспортной системы.

1. Создание интегрированных мультимодальных пересадочных хабов. Суть мероприятия заключается в проектировании и развитии ПТУ как центров удобной и быстрой пересадки между различными видами общественного транспорта (метро, автобусы, трамваи, электропоезда, такси/каршеринг), объединенных единой билетной системой и логистикой. Это оказывает значительное влияние на сокращение использования личного автотранспорта, так как комплексное предложение делает общественный транспорт привлекательной альтернативой для поездок на разные расстояния. Следствием является снижение выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ (CO_2 , NO_x), а также уменьшение дорожных заторов в городе. Учет подземных ограничений проявляется в необходимости тщательного зонирования пространства, организации безопасных и эффективных пешеходных потоков между видами транспорта, установке достаточного количества эскалаторов/лифтов и понятной навигации в условиях высокой плотности людей и ограниченного объема. Специальные технологии включают системы интеллектуального управления потоками и безопасностью.

2. Развитие удобной и безопасной пешеходной доступности. Данное мероприятие фокусируется на обеспечении прямых, комфортных и защищенных связей ПТУ с ключевыми городскими точками притяжения (жилье, работа, услуги, отдых) через сеть подземных переходов, надземных мостов и благоустроенных наземных маршрутов. Его влияние проявляется в стимулировании пешеходной мобильности как естественного завершения поездки на общественном транспорте ("последняя миля"), что снижает потребность в использовании автомобиля для коротких поездок. Это способствует уменьшению локальных выбросов и шума, а также оживлению городских районов и повышению безопасности улиц. Особенность подземных пространств требует проектирования широких, хорошо освещенных и вентилируемых переходов с эффективной навигацией и мерами безопасности. Специальные технологии могут включать световые колодцы и атриумы для визуальной связи с поверхностью и улучшения восприятия пространства.

3. Внедрение адаптированных энергоэффективных систем жизнеобеспечения. Мероприятие предполагает использование технологий, специально разработанных или оптимизированных для подземных условий: высокоэффективная принудительная вентиляция с рекуперацией тепла, светодиодное освещение с автоматическим регулированием, применение геотермальной энергии для отопления/охлаждения, интеллектуальные системы управления микроклиматом. Это приводит к значительному снижению общего энергопотребления узла (особенно на вентиляцию и климат-контроль), что уменьшает его углеродный след. Одновременно улучшается качество воздуха внутри ПТУ за счет эффективного удаления пыли, CO₂ и загрязнителей от поездов, создавая более здоровую среду для пассажиров. Стабильная температура грунта делает геотермальные решения особенно эффективными под землей, а отсутствие естественного света требует продуманных систем искусственного освещения. Замкнутость пространства повышает важность рекуперации тепла для экономии энергии. Специальные

технологии включают прецизионные системы фильтрации воздуха и датчики для адаптивного управления.

4. Организация наземной инфраструктуры для экологичных видов мобильности. Суть мероприятия состоит в создании у выходов из ПТУ удобных, безопасных и интегрированных зон для использования альтернативных, "чистых" видов транспорта: велопарковки (включая крытые и охраняемые), станции проката велосипедов и электросамокатов, выделенные места для посадки/высадки электромобилей (такси, каршеринг), удобные переходы к остановкам электротранспорта. Влияние заключается в стимулировании экологичных способов преодоления "последней мили", что позволяет пассажирам отказаться от использования личного автомобиля или такси с ДВС для коротких дистанций. Это снижает локальные выбросы и шумовое загрязнение в непосредственной близости от узла, повышая качество городской среды. Учет подземной специфики здесь опосредованный, но критичен: требуется эффективная навигация из подземного пространства к этим наземным объектам, а также грамотное зонирование наземной территории, чтобы избежать конфликтов между пешеходами, велосипедистами и другим транспортом. Технологии включают системы электронного бронирования и оплаты проката.

5. Системное управление ресурсами и отходами. Данное мероприятие охватывает комплексный подход к минимизации потребления ресурсов и образования отходов в условиях высокой проходимости ПТУ: установка водосберегающей сантехники, сбор и использование дождевой воды или конденсата систем кондиционирования для технических нужд (уборка, полив), организация эффективной системы раздельного сбора основных фракций отходов (упаковка, бумага, органические отходы от кафе) с учетом требований безопасности и гигиены. Его влияние проявляется в снижении потребления питьевой воды из городских сетей и уменьшении объема смешанных отходов, направляемых на полигоны, за счет их переработки. Это способствует рациональному использованию ресурсов и снижению общей экологической

нагрузки. Особенность подземных узлов требует компактных, вандалоустойчивых и гигиеничных решений для размещения контейнеров и накопителей воды, а также продуманной логистики вывоза отходов, не мешающей пассажиропотоку. Специальные технологии включают автоматические системы уплотнения отходов и очистки технической воды.

Возможные проблемы:

- Высокая сложность интеграции технологий и инфраструктуры в ограниченном, замкнутом подземном пространстве при интенсивном пассажиропотоке.

- Значительные капитальные затраты на внедрение специализированных энергоэффективных систем (рекуперация, геотермалия) и адаптированных решений.

- Трудности логистики и гигиены при управлении отходами/ресурсами без нарушения движения людей и соблюдения санитарных норм. Риск низкой востребованности альтернативных видов мобильности ("последняя миля") или раздельного сбора отходов без удобства, безопасности и культуры пользователей.

- Необходимость постоянной адаптации систем (климат, освещение, потоки) к меняющейся загрузке узла и внешним условиям для поддержания эффективности.

Суть проблем: несмотря на очевидные экологические преимущества, реализация мероприятий в подземных транспортных узлах сталкивается с физическими ограничениями подземелья, высокими первоначальными инвестициями, организационной сложностью эксплуатации и зависимостью от поведения пользователей.

3.2 Подземные коммерческие пространства

Коммерческие подземные городские пространства (КПП) представляют собой важный элемент современной урбанистики, предлагая торговые, гастрономические и развлекательные услуги в условиях плотной городской застройки. Однако их функционирование связано с чрезвычайно высоким энергопотреблением (климат-контроль, освещение), образованием значительного объема отходов (упаковка, пищевые отходы) и сложностями поддержания комфортной среды в замкнутом пространстве. Реализация экологических мероприятий в КПП направлена не только на снижение их экологического следа, но и на повышение комфорта посетителей, снижение эксплуатационных затрат и укрепление экологического имиджа бизнеса.

1. Оптимизация систем климат-контроля и вентиляции с акцентом на комфорт и экономию. Суть мероприятия заключается во внедрении высокоэффективных систем кондиционирования, отопления и вентиляции, специально адаптированных к высоким тепловым нагрузкам КПП (от людей, освещения, оборудования магазинов и кухонь), с обязательным использованием рекуперации тепла и интеллектуального управления на основе данных датчиков (температура, влажность, CO₂, загрузка зон). Это оказывает прямое влияние на значительное снижение энергопотребления – основной статьи расходов КПП – и уменьшение углеродного следа объекта. Одновременно обеспечивается стабильно высокое качество воздуха (удаление запахов кухонь, пыли, избытка CO₂) и поддержание комфортной температуры/влажности, что критически важно для привлечения и удержания посетителей. Учет подземных ограничений проявляется в отсутствии возможности естественного проветривания и сложности отвода тепла, делая рекуперацию и прецизионный контроль жизненно необходимыми. Специальные технологии включают сложные системы зонированного климат-контроля и фильтрации воздуха с адсорбцией запахов.

2. Внедрение интеллектуального и энергоэффективного светодиодного освещения для создания атмосферы. Данное мероприятие предполагает повсеместное использование светодиодных (LED) технологий с высоким световым выходом и длительным сроком службы, дополненное системами адаптивного управления: диммирование в зависимости от естественного света у входов/атриумов, датчики присутствия в редко используемых зонах (технические коридоры, склады), а также программируемые сценарии освещения для витрин и общественных зон, создающие нужную атмосферу. Его влияние заключается в радикальном снижении энергозатрат на освещение – втором по значимости потребителе энергии в КПП. Качественное и правильно подобранное освещение напрямую влияет на восприятие пространства посетителями, подчеркивает архитектуру, выделяет товары и способствует увеличению времени пребывания и продаж. Особенность подземных пространств – полное отсутствие естественного света в глубине – требует продуманного искусственного освещения для предотвращения эффекта "бункера" и поддержания циркадных ритмов. Специальные технологии включают динамические системы освещения, имитирующие естественный световой цикл, и "световые сценарии" для разных типов зон и времени суток.

3. Комплексное управление отходами с фокусом на переработку и минимизацию. Мероприятие охватывает организацию эффективной системы сбора, сортировки и вывоза отходов, характерных для КПП: упаковка (картон, пластик, стекло), пищевые отходы от фуд-корт и ресторанов, а также опасные отходы (батарейки, лампы). Ключевые элементы: удобные для арендаторов и посетителей пункты раздельного сбора, контейнеры для компостирования органики (где возможно), сотрудничество с перерабатывающими компаниями, оптимизация логистики вывоза. Это приводит к существенному сокращению объема отходов, направляемых на полигоны, снижению экологической нагрузки и потенциально – к снижению затрат на вывоз мусора. Демонстрация ответственного подхода к отходам

улучшает экологический имидж всего комплекса и отдельных арендаторов. Высокая плотность арендаторов и потоков посетителей в ограниченном пространстве требует компактных, гигиеничных решений для сбора отходов (включая системы уплотнения) и четкой логистики вывоза, не мешающей коммерческой деятельности. Специальные технологии включают системы подземного пневмотранспорта отходов (если заложено на этапе строительства) или современные решения для компостирования на месте.

4. Использование экологичных и долговечных материалов отделки и оборудования. Суть мероприятия состоит в выборе для строительства и отделки КПП материалов с низким экологическим воздействием на протяжении всего жизненного цикла: сертифицированные экологичные материалы (низкое содержание ЛОС), материалы с высоким содержанием вторичного сырья, а также исключительно долговечные и износостойкие решения, устойчивые к интенсивному потоку посетителей и влажной уборке. Это влияет на улучшение качества внутренней среды (меньше вредных испарений), снижение частоты дорогостоящих ремонтов и замен, уменьшение образования строительных отходов в будущем. Создание здоровой и эстетичной среды напрямую повышает привлекательность пространства для посетителей. Агрессивная эксплуатационная среда КПП (высокая проходимость, постоянная уборка, риск вандализма) требует материалов исключительной прочности и легкости в обслуживании. Специальные подходы включают использование местных материалов для снижения транспортного следа и материалов, пригодных для повторной переработки по окончании срока службы.

5. Рационализация водопотребления и использование альтернативных источников воды. Мероприятие включает установку водосберегающей сантехники (сенсорные смесители, экономичные сливы в туалетах), сбор и очистку конденсата от мощных систем кондиционирования, а также изучение возможности сбора и использования дождевой воды с наземных входных групп/кровель для технических нужд (полив ограниченного озеленения, мойка

полов). Это приводит к значительному снижению потребления питьевой воды из городских сетей, уменьшению нагрузки на коммунальные системы и снижению эксплуатационных расходов объекта. Ответственное использование водных ресурсов также является важным элементом экологического позиционирования КПП. Ограниченные возможности для сбора дождевой воды (только наземные элементы) и большие объемы конденсата, образующегося при работе климатических систем, являются специфическими особенностями подземных коммерческих объектов. Специальные технологии включают системы сбора и очистки конденсата, а также "серые" системы для повторного использования технической воды.

Возможные проблемы:

- Очень высокие капитальные и эксплуатационные затраты на специализированные энергоэффективные системы (климат, свет) в условиях подземных структур.
- Сложность создания естественной и привлекательной атмосферы без доступа к естественному свету и виду, борьба с ощущением замкнутости.
- Организационная сложность управления отходами при большом количестве арендаторов и высоких требованиях к гигиене в местах общественного питания.
- Конкуренция с наземными объектами, требующая уникальных преимуществ (комфорт, экологичность, опыт) для привлечения посетителей. Зависимость от поведения арендаторов и посетителей в эффективности раздельного сбора отходов и экономии ресурсов.

Суть проблем: Реализация экологических мероприятий в КПП сталкивается с экстремально высокими энергопотреблением, сложностью поддержания комфортной среды, организационными трудностями координации множества арендаторов, высокой конкуренцией и необходимостью значительных инвестиций.

3.3 Общественные подземные пространства

Общественные подземные пространства (ОПП) играют важную роль в насыщении городов социальной инфраструктурой, особенно в условиях дефицита наземных площадей. Они предоставляют площадки для культуры, образования, спорта и отдыха. Однако их эксплуатация связана с высокими энергозатратами на создание и поддержание искусственной среды, необходимостью обеспечения высокого качества воздуха и акустического комфорта для посетителей, проводящих там значительное время. Реализация экологических мероприятий в ОПП направлена на минимизацию их воздействия на окружающую среду, снижение эксплуатационных расходов (что важно для бюджетных учреждений) и, главное, на создание здоровой, привлекательной и доступной среды для горожан.

1. Создание высококачественной и здоровой внутренней среды. Суть мероприятия заключается в приоритетном внедрении систем вентиляции и кондиционирования воздуха с высокой степенью очистки (включая фильтрацию частиц PM2.5/PM10 и газообразных загрязнителей), точным контролем влажности (для предотвращения плесени и комфорта) и поддержанием оптимального уровня CO₂. Это критически важно для здоровья и самочувствия посетителей и персонала, особенно при длительном пребывании (библиотеки, лектории). Влияние проявляется в снижении рисков респираторных заболеваний, улучшении когнитивных функций (в учебных заведениях) и общем повышении комфорта посещения. Отсутствие естественной вентиляции и потенциальное накопление загрязнителей от людей, отделочных материалов и оборудования в замкнутом подземном пространстве делают эффективную принудительную вентиляцию с рекуперацией тепла и продвинутой фильтрацией обязательной. Специальные технологии включают системы мониторинга качества воздуха в реальном времени и угольные/фотокаталитические фильтры.

2. Реализация энергоэффективного и биологически эффективного освещения. Данное мероприятие предполагает использование светодиодных (LED) систем освещения не только с высокой энергоэффективностью, но и с оптимизированным спектром, максимально приближенным к естественному свету (высокий индекс цветопередачи, управление цветовой температурой). Дополняется интеллектуальным управлением (диммирование, датчики присутствия в малозагруженных зонах) и, где возможно, интеграцией световодов или гибридных систем для доставки естественного света вглубь пространства. Его влияние заключается в значительной экономии электроэнергии и снижении тепловыделений от осветительных приборов. Качественное освещение с правильными спектральными характеристиками жизненно необходимо для визуального комфорта, точного восприятия цветов (в музеях, галереях), поддержания циркадных ритмов посетителей и снижения утомляемости глаз, особенно при отсутствии окон. Полное отсутствие или ограниченность естественного света в подземных ОПП является ключевым вызовом, требующим продуманных решений для имитации дневного света и создания приятной атмосферы. Специальные технологии включают динамические системы освещения, изменяющие цветовую температуру в течение дня, и световоды со сложной оптикой.

3. Обеспечение акустического комфорта и снижение шумового воздействия. Мероприятие фокусируется на комплексной акустической обработке помещений: применение звукопоглощающих материалов на потолках и стенах (акустические панели, перфорированные конструкции), использование звукоизолирующих перегородок между зонами с разной функцией (читальный зал/кафе, спортзал/раздевалка), виброизоляция инженерного оборудования. Это напрямую влияет на создание комфортной среды для концентрации (библиотеки, учебные классы), восприятия информации (лекции, экскурсии) или отдыха. Снижение уровня шума и времени реверберации уменьшает стресс и утомляемость посетителей, повышает функциональность пространства. Высокие потолки и обилие

твердых поверхностей в подземных залах часто приводят к сильной реверберации и накоплению шума от людей и оборудования, делая акустическую коррекцию обязательной. Специальные технологии включают расчетные акустические модели на этапе проектирования и применение нестандартных звукопоглощающих форм.

4. Рациональное использование ресурсов и управление отходами в местах массового посещения. Суть мероприятия состоит во внедрении водосберегающей сантехники, систем сбора и использования технической воды (конденсат кондиционеров, при возможности - дождевая вода с наземных частей), а также организации удобной и понятной системы раздельного сбора отходов (бумага, пластик, органические отходы от кафе/буфетов) с акцентом на просветительскую функцию. Влияние заключается в снижении нагрузки на городские коммунальные сети (вода, канализация, вывоз отходов), уменьшении эксплуатационных расходов учреждения и демонстрации экологически ответственного подхода, что способствует экологическому воспитанию посетителей. Высокая посещаемость ОПП генерирует значительные объемы отходов и потребления воды, а ограниченность пространства требует компактных и эффективных решений для их сбора и временного хранения. Специальные подходы включают информационные стенды о раздельном сборе и сотрудничество с переработчиками.

5. Гибкое зонирование и интеграция элементов природы/имитации природы. Мероприятие включает проектирование гибких, трансформируемых пространств, адаптируемых под разные мероприятия, и активное внедрение элементов, компенсирующих отсутствие связи с внешней природной средой: фитостены, внутреннее озеленение в горшках (при достаточном освещении), водные элементы (декоративные фонтаны, улучшающие микроклимат), широкое использование натуральных материалов в отделке (дерево, камень), изображения природы, проекции неба. Это влияет на психологический комфорт посетителей, снижая ощущение замкнутости и стресса ("синдром отсутствия окон"), повышает привлекательность и уникальность

пространства, способствует релаксации. Дефицит естественного света, видов на природу и свежего воздуха – основные психологические недостатки подземных ОПП, требующие креативных компенсирующих решений. Специальные технологии включают системы биодинамического освещения, сложные фитостены с автоматическим поливом и крупноформатные медиа-инсталляции.

Возможные проблемы:

- Высокая стоимость создания комфортной среды: Значительные затраты на продвинутые системы вентиляции, освещения и акустики для больших подземных объемов.
- Борьба с психологическим дискомфортом: Трудности преодоления негативного восприятия подземелья ("бункерный эффект", клаустрофобия) без доступа к естественному свету и видам.
- Обеспечение доступности и безопасности: Сложность организации удобных, безопасных и привлекательных путей эвакуации и входов/выходов в условиях подземного расположения.
- Адаптация под меняющиеся нужды: Трудности перепланировки и модернизации жестких подземных конструкций под новые общественные функции.
- Энергозависимость: Риски для функционирования ОПП при перебоях в энергоснабжении, критичном для систем жизнеобеспечения.

Суть проблем: Развитие экологичных и комфортных общественных подземных пространств сталкивается с фундаментальными вызовами замкнутой среды (отсутствие света/воздуха), высокими капитальными и эксплуатационными затратами на инженерные системы, необходимостью преодоления психологических барьеров у населения и сложностью обеспечения гибкости и безопасности.

3.4 Инфраструктурные подземные пространства

Инфраструктурные подземные пространства (ИПП) являются скрытой, но жизненно важной основой функционирования современного города, обеспечивая водоотведение, энергоснабжение, хранение ресурсов и отходов. Их экологическая значимость чрезвычайно высока: аварии или неэффективная работа могут привести к масштабному загрязнению почв, грунтовых вод, водоемов и воздуха. Реализация экологических мероприятий в ИПП направлена в первую очередь на предотвращение негативного воздействия на окружающую среду, обеспечение долговременной надежности и безопасности объектов, а также на оптимизацию ресурсопотребления.

1. Обеспечение абсолютной герметичности и коррозионной стойкости сооружений. Суть мероприятия заключается в применении при строительстве и реконструкции ИПП материалов и технологий, гарантирующих долговременную непроницаемость конструкций: высококачественные бетоны специальных марок с низкой проницаемостью, многослойная гидроизоляция (полимерные мембраны, бентонитовые маты), коррозионностойкие материалы для трубопроводов и резервуаров (полимеры, нержавеющие стали, катодная защита). Это оказывает фундаментальное влияние на предотвращение утечек сточных вод, нефтепродуктов, химикатов или фильтрата отходов в окружающие грунты и водоносные горизонты, защищая экосистемы и источники питьевой воды от загрязнения. Постоянный контакт с агрессивными средами (стоки, соли, блуждающие токи) и высокое гидростатическое давление грунтовых вод являются специфическими вызовами подземного расположения, требующими применения самых надежных и долговечных решений. Специальные технологии включают системы непрерывного мониторинга целостности оболочек и гидроизоляции.

2. Внедрение высокоэффективных систем очистки и обесвреживания на объектах водоотведения и хранения отходов. Данное мероприятие предполагает оснащение подземных очистных сооружений, ливневых

водоотводов и хранилищ отходов передовыми технологиями физико-химической и биологической очистки, обеззараживания (УФ, озон) и обезвреживания, обеспечивающими соответствие сбрасываемых стоков или хранимых веществ строгим экологическим нормативам. Его влияние заключается в минимизации выбросов загрязняющих веществ (азот, фосфор, тяжелые металлы, патогены, органические соединения) в водные объекты или атмосферу (при дегазации), защите водных экосистем и здоровья населения. Ограниченность пространства подземных очистных или необходимость минимизации наземных сооружений требует применения компактных, высокоинтенсивных технологий очистки (мембранные биореакторы - МБР, продвинутое методы окисления). Специальные технологии включают системы улавливания и очистки биогаза на полигонах ТБО и очистных сооружениях.

3. Оптимизация энергопотребления насосных и вентиляционных систем. Мероприятие фокусируется на повышении энергоэффективности основного энергопотребителя ИПП – насосных станций (канализационных, водопроводных, дренажных) и систем принудительной вентиляции (в хранилищах, подстанциях): использование насосов и вентиляторов с высоким КПД и регулируемым электроприводом (частотные преобразователи), внедрение систем автоматического управления, оптимизирующих работу оборудования в зависимости от реальной нагрузки (уровня стоков, концентрации газов). Это приводит к существенному снижению энергопотребления и связанных выбросов парниковых газов от генерации электроэнергии, а также к уменьшению эксплуатационных затрат. Значительная и часто переменная нагрузка на насосы в коллекторах, а также необходимость поддержания безопасной атмосферы в замкнутых хранилищах с потенциально опасными газами требуют применения надежных и адаптивных систем управления. Специальные технологии включают системы предиктивного обслуживания оборудования и рекуперации энергии на крупных насосных станциях.

4. Использование геотермального потенциала и утилизация сбросного тепла. Суть мероприятия состоит в применении стабильной температуры подземных пород для повышения энергоэффективности: использование грунта как теплоотвода для охлаждения оборудования подстанций или как источника/приемника тепла для геотермальных тепловых насосов, обслуживающих соседние здания или технологические процессы. Также включает утилизацию сбросного тепла от силового оборудования (трансформаторы, генераторы, насосы). Это влияет на снижение потребления энергии из внешних сетей для климатизации или технологических нужд, уменьшение теплового загрязнения поверхности и повышение общей энергетической устойчивости объекта. Стабильная и относительно постоянная температура грунта на глубине заложения ИПП является их ключевым преимуществом для реализации геотермальных решений. Специальные технологии включают интеграцию теплообменных контуров в конструкции тоннелей или фундаменты сооружений.

5. Внедрение комплексных систем экологического мониторинга и автоматизированного управления. Мероприятие охватывает установку сетей датчиков для непрерывного контроля ключевых параметров: уровни жидкости и давления в трубопроводах/резервуарах, качество сточных вод/газов на выходе, концентрация опасных газов (метан, сероводород) в воздухе, вибрация, деформации конструкций. Данные интегрируются в системы АСУ ТП для автоматического реагирования (включение аварийной вентиляции, остановка насосов при утечке, оповещение). Это оказывает прямое влияние на раннее обнаружение и локализацию аварийных ситуаций (разрывы труб, утечки, выбросы газов), предотвращая или минимизируя экологический ущерб, а также оптимизирует работу систем в штатном режиме. Сложность доступа, агрессивная среда и необходимость долговременной автономной работы датчиков в подземных условиях требуют применения особо надежных и защищенных приборов. Специальные технологии включают дистанционный

мониторинг с использованием телеметрии, волоконно-оптических систем измерения деформаций и распределенных систем газового анализа.

Возможные проблемы:

- Чрезвычайно высокие затраты на строительство и модернизацию с применением сверхнадежных материалов и технологий.
- Сложность доступа и ремонтпригодность: Трудности проведения инспекций, обслуживания и ремонта в стесненных, труднодоступных и потенциально опасных подземных условиях.
- Долговременные экологические риски: Потенциал накопленного ущерба от стареющей инфраструктуры и сложность оценки состояния скрытых сооружений.
- Необходимость высочайшей надежности: Недопустимость отказов, требующая дублирования систем и резервирования, что увеличивает сложность и стоимость.
- Утилизация загрязненных грунтов и материалов при реконструкции или ликвидации объектов.

Суть проблем: Обеспечение экологической безопасности инфраструктурных подземных пространств сталкивается с экстремальными требованиями к надежности и долговечности, колоссальными инвестиционными затратами, сложностью мониторинга и обслуживания в агрессивной подземной среде, а также с долгосрочными рисками для окружающей среды.

4 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПОДЗЕМНЫХ ГОРОДСКИХ ПРОСТРАНСТВ В КРУПНЫХ ГОРОДАХ РОССИИ

4.1 Предпосылки использования подземных городских пространств для общественных функций в крупных городах России

В связи с активно протекающими процессами глобализации и урбанизации города России столкнулись с рядом градостроительных, социальных и экономических проблем. Для их решения необходима реализация концепции комплексного развития территории, направленную на формирование благоприятных условий для жизни населения. Это представляется возможным благодаря неисчерпанности территориальных ресурсов подземных пространств, расположенных под поверхностью города. При усложнении структуры городов приоритетно рассматриваются классические пути развития: повышение этажности застройки и увеличение протяженности городов, их рост в горизонтальном направлении, но практически не используются подземные территории.

В настоящее время в крупнейших городах наблюдается тенденция активного освоения подземного пространства для транспортных и инженерных целей, наиболее востребованным направлением является строительство подземных парковок. Помимо освоения подземного пространства под транспортную функцию в мировом опыте существует множество примеров организации подземного пространства под общественные и коммерческие цели, для чего в крупных городах России на сегодня имеются все условия.

Перечислим ряд предпосылок для внедрения подземного строительства в крупных городах России:

- Неравномерная плотность застройки города. Крупные города развиваются центростремительно, в результате чего возникает проблема увеличения плотности застройки в центральной части города;
- Историческая застройка центральной части города. Большинство крупных городов России имеют продолжительную историю, что не может не отразиться на их архитектурном облике. Строительство современных объектов зачастую разрушает сложившийся исторический контекст;
- Дефицит площадок для расположения социально значимых объектов. Из-за высокой плотности застройки центральной части города возникает нехватка территории на дневной поверхности для размещения объектов, естественное освещение которых нормируется. К таким объектам относятся жилые здания, детские сады и школы;
- Дефицит озелененных пространств;
- Повышение уровня загруженности автодорог, дефицит парковочных мест. Эти проблемы появились в результате увеличения количества личного автотранспорта;
- Увеличение протяженности инженерных коммуникаций и их физический износ. Причиной данной проблемы является одноярусная структура города, из-за чего город теряет свою компактность.

4.2 Экономические предпосылки использования подземного пространства.

Это наиболее чувствительный аспект для крупных и крупнейших городов, в которых либо уже отсутствуют территории, пригодные для застройки в центральной части, либо цена на эти территории позволила бы оправдать любое даже самое затратное подземное строительство. Для примера, средняя цена земли под коммерческое строительство в центре Казани варьируется от 2 до 8 млн руб. за 100 м², что в комплексе с градостроительной

политикой, зонами охраны памятников, не позволяет в полной мере использовать территорию для застройки. Использование же подземного пространства позволит обойти градостроительные ограничения и в перспективе повысить экономический потенциал города.

В качестве примера будет рассмотрен экономический потенциал канадской подземной сети PATH, располагающейся в Торонто, Канада и являющейся одной из крупнейших подземных сетей мира, соединяющей более 100 зданий. Подробная схема современного состояния сети представлена на Рис. 3.

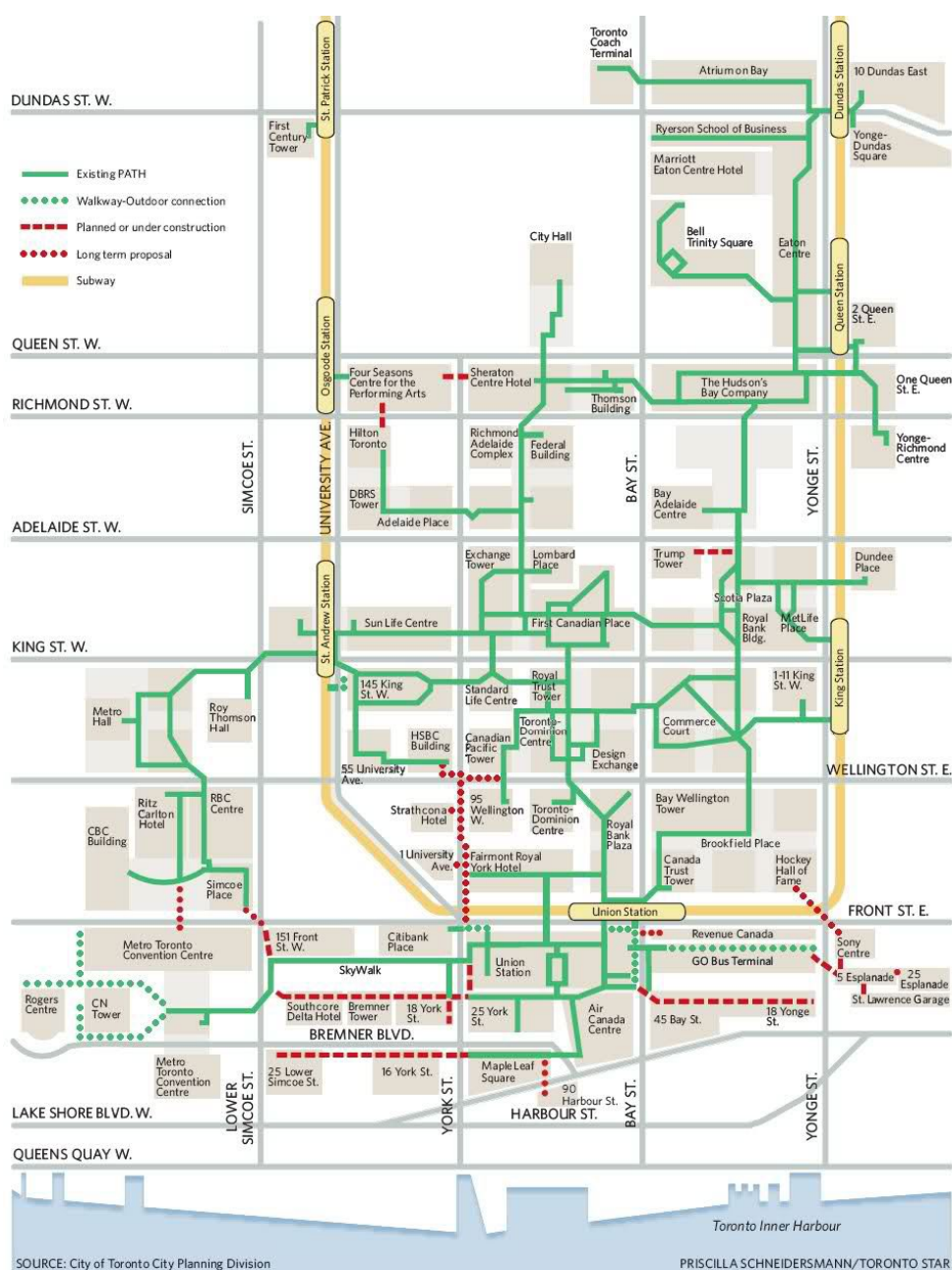


Рис. 3 - Схема подземной сети PATH, Торонто

Городской автовокзал является северной точкой сети, самая южная точка — многоэтажное офисное здание WaterPark Place, большая часть пешеходных подземных туннелей параллельна основным улицам. В настоящее время сеть включает порядка 1400 магазинов, общая площадь которых более 372 тыс. м².

Торговые объекты связаны с 6 станциями метро и достопримечательностями центральной части города подземной сетью протяженностью более 30 км. Входы в подземное пространство организованы как с поверхности земли, так и через наземную часть зданий, подземное пространство под которыми входит в структуру сети.

Ежедневно данную сеть используют более 100 тыс. пешеходов, это позволяет снизить нагрузку на транспортные сети города, уменьшить количество индивидуального автотранспорта, что благоприятно сказывается на экологической ситуации. Развитие подземного яруса в масштабах целого города позволило решить ряд градостроительных проблем. С каждым годом RATH развивается все активнее, увеличивая свою протяженность и внедряя новые общественные функции (Рис. 4).



Рис. 4 - Подземная сеть RATH, Торонто

Согласно экономическому отчету города Торонто, в первом квартале 2023 г. доход от сети превысил 1,8 млрд долл., что принесло в бюджет города

290 млн долл. налоговых отчислений. Согласно экономической стратегии «подземной экономики» Канады, RESO и PATH уже несколько лет как окупили затраты на строительство и в последние пару лет показывают стремительный рост прибыли от аренды и эксплуатации.

4.3 Транспортные предпосылки использования подземного пространства

Большинство крупных городов, таких как Санкт-Петербург и Казань, имеют одноярусную структуру, их укрупнение происходит за счет строительства многоэтажных зданий и горизонтального разрастания, что ведет к потере компактности и, как следствие, увеличению протяженности автомагистралей и инженерных коммуникаций. В комплексе с тенденцией увеличения количества личного автотранспорта происходит повышение загруженности автодорог, формируется дефицит парковочных мест. В мировой практике существует большое количество примеров, когда перенос транспортной и инженерной инфраструктуры позволил создать важные общественные объекты на дневной поверхности.

Retueipark является важным примером такого подхода. Он представляет собой ландшафтный комплекс длиной около 600 м, шириной 60 м и покрывает участок крупнейшей Мюнхенской автострады, так называемое Среднее Кольцо — одну из самых посещаемых городских улиц Мюнхена. Из-за интенсивности трафика принято решение переместить трассу под землю, чтобы стабилизировать обстановку на дневной поверхности города (рис. 5).

Это создало новые пешеходные маршруты, объединив два ранее разрозненных района города новым общественным пространством и избавив местных жителей от шумов и загрязнения.



Рис. 5 - Среднее кольцо до реконструкции

В жилом районе больше нет интенсивного трафика, шума и выхлопов от машин, вместо этого жители наслаждаются прекрасным ландшафтным парком, соединяющим между собой два ранее разрозненных района города. Сам парк приподнят в среднем на 2,5 м от поверхности земли, что позволяет создать четыре зоны различных активностей — южная часть парка преимущественно отдана под тихий отдых, в то время как северная, в которой размещаются шумные игровые площадки и площадь, предполагает активный городской отдых (рис. 6). Petuelpark — прекрасный пример того, как при помощи современных технологий на месте загруженной трафиком улицы можно создать важные и необходимые объекты городской среды, которые не только дарят эстетическое удовольствие, но и благоприятно влияют на экологию места.



Рис. 6 - Petuelpark под которым расположен Petuel Tunnel

4.4 Архитектурно-художественные предпосылки использования подземного пространства

Центральные части городов зачастую представлены историческими зданиями, формирующими колорит архитектуры. Строительство современных инвестиционно-привлекательных объектов зачастую разрушает сложившийся исторический контекст. Использование подземного уровня позволит создать устойчивый экономический каркас в центральной части за счет уплотнения застройки социальными и общественными объектами.

В мировой практике существуют успешные примеры уплотнения среды исторической части городов за счет использования подземного пространства.

Одним из них является торговый центр Forum de Halles (рис. 7) во Франции, располагающийся на месте рынка Ле Аль, который в процессе уплотнения Парижа перестал удовлетворять потребности жителей. В 1976 г. был объявлен конкурс на реновацию объекта. В конкурсе победил проект прямоугольного в плане здания, состоявшего из 5 уровней, 4 из которых были подземными. Наземный же этаж выступает входной группой, бионичная

стеклянная кровля которого сочетается с металлическими балками, арками и колоннами. Помимо стеклянной кровли, естественное освещение поддерживает система линз и зеркал, доставляющая свет на нижние уровни.



Рис. 7 - Forum de Halles, Париж

Другим характерным примером является МФК «Павелецкая плаза» — на 32 тыс. м2 площади в центре Москвы был построен уникальный для России многофункциональный объект (рис. 8).



Рис. 8 - МФК «Павелецкая плаза», Москва

Площадь перед вокзалом стала важной центральной точкой притяжения, вместо строительства наземного объекта группой архитекторов было принято решение создания 4-уровневого подземного объекта с парком на поверхности, 75 % которого предполагается озеленить. Вход в комплекс осуществляется через выступающие на поверхности стеклянные кровли, через систему лестниц и пандусов, скрытых под навесами. Кровли также играют значительную роль в архитектурном облике комплекса, с помощью них в подземное пространство проникает естественный свет, они являются зонами привлечения внимания, через них прекрасно видно подземные объемы торгового центра.

4.5 Климатические условия северных городов

Немаловажной особенностью севера России являются климатические условия — неблагоприятный ветровой режим в комплексе с повышенной влажностью. Такое сочетание климатических факторов ведет к переохлаждению дневной поверхности города в осенне-весенний период, продолжительный для Санкт-Петербурга, что снижает возможность всесезонного функционирования открытых общественных пространств.

Важным преимуществом подземных объектов является стабильность температуры, которая не зависит от температуры на поверхности. Данный аспект позволяет оптимизировать использование климатического оборудования, в значительной степени сократив затраты на эксплуатацию. Кроме того, подземные сооружения, объединенные в единую сеть, позволяют всесезонно использовать городскую среду, что наиболее актуально для городов России, находящихся преимущественно в умеренном поясе с холодной зимой и знойным летом.

Создание сети подземных пространств позволило бы решить эту проблему. Одним из лучших примеров подземной сети является подземная сеть RESO, Монреаль (рис. 9). Одним из факторов, повлиявших на

проектирование подземного города, является климат. В Монреале достаточно суровая и продолжительная зима, а также влажное и жаркое лето. Развитие подземной инфраструктуры позволяет расширить возможности социокультурной жизни города на 12 месяцев в году. RESO состоит из: 2 железнодорожных станций, 10 станций метрополитена, 2 автобусных остановок и более 60 зданий. Пешеходная сеть получила название RESO — La Ville Souterraine («подземный город»). Общая протяженность RESO — более 32 км, устроено более 150 входов с поверхности улиц. Сеть расположена под районом города с большой плотностью застройки и позволяет разгрузить пешеходные потоки на дневной поверхности. В подземные пространства вынесены объекты общегородского значения, на сегодняшний день в структуру сети входит порядка 2000 магазинов, более 200 ресторанов, 34 кинотеатра, 43 автопарковки, несколько театров и 4 выставочных комплекса, один из которых находится на станции метро «Площадь искусств».

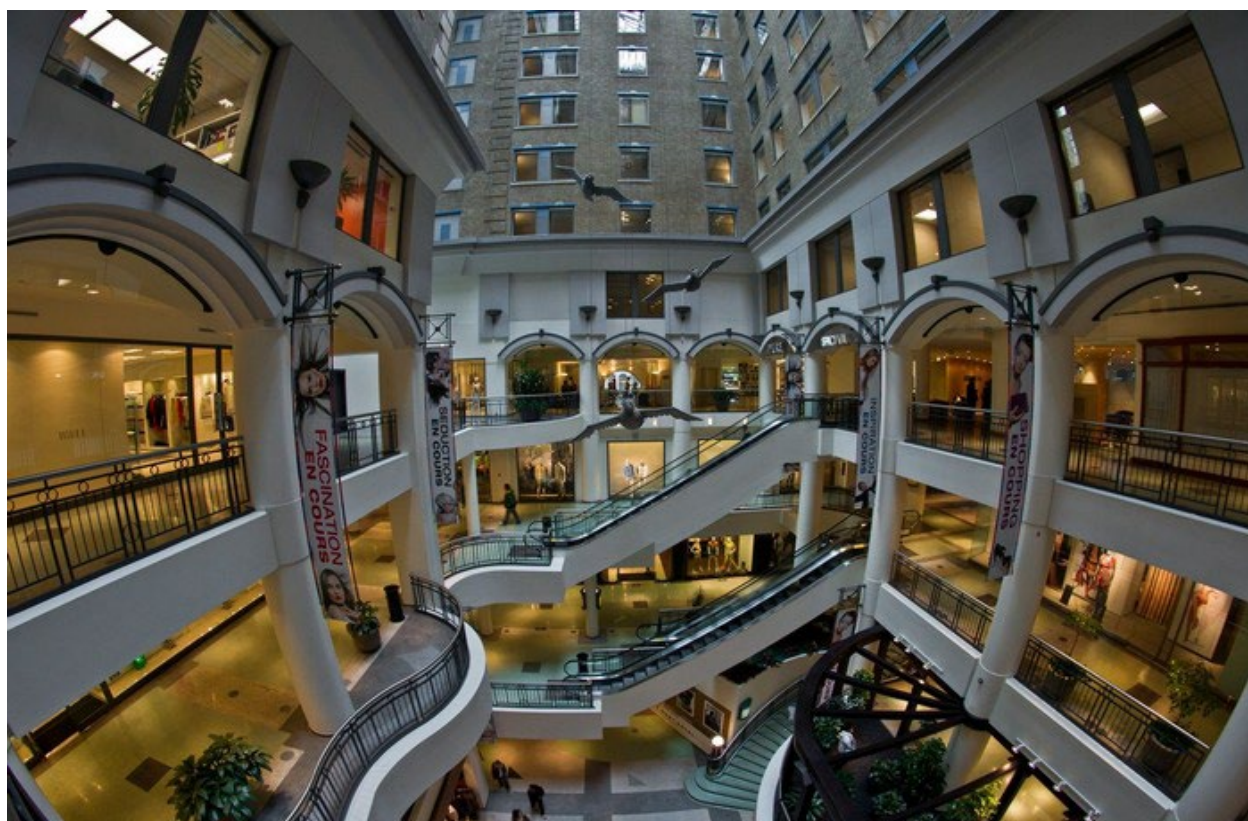


Рис. 9 – Подземная сеть RESO, Монреаль

Уникальным примером в структуре сети является торговый комплекс Promenades Cathedrales, расположенный под кафедральным собором

Монреаля. Представители церкви сами продали землю для строительства торгового центра и не против такого соседства. Формирование подземной сети происходило на протяжении долгого времени и было осложнено некоторыми аспектами. Например, власти Монреаля не имели законных прав использовать подземное пространство, находящееся менее чем в 10 м под частными зданиями. Первое время город выкупал участки, однако со временем местные предприниматели увидели эффективность работы первых участков подземной сети и стали заключать контракты, добровольно формируя подземные уровни под своей собственностью.

4.6 Природно-экологические предпосылки использования подземного пространства

Современные города сталкиваются с проблемами интенсивного роста, что неизбежно ведет к дефициту озелененных пространств в центральной части. Коммерческая застройка активно захватывает озелененные пустыри и лесопарковые массивы, лишая город природного каркаса. Эта проблема также решается за счет создания многоуровневой системы озеленения: применения зеленых кровель, наземных парковых площадей и использования современных достижений науки и техники для проектирования системы подземных парков.

На текущий момент лучший пример использования подземного пространства для парковой функции — подземный парк Low Line (рис. 10), США. Нью-Йорк является одним из крупнейших мегаполисов с рядом вытекающих из этого проблем. Так, в юго-восточной части Манхэттена в 1948 г. из-за закрытия железной дороги утратил свою функцию подземный вокзал Williamsburg Bridge Railway terminal. В 2011 г. архитектор Джеймс Рэмси разработал проектное предложение по реорганизации подземного пространства заброшенного вокзала в парковое пространство, поскольку дефицит озелененных территорий — одна из основных проблем мегаполиса.



Рис. 10 - Low Line Underground, США

Проект был принят к реализации в 2015 г., его строительство завершилось в 2021 г. Данный проект разработан в контексте переосмысления устаревших функций в пользу более рационального использования городских территорий. Предполагается, что парк не только поможет приуменьшить проблему дефицита озеленения, но и станет одним из знаковых мест Нью-Йорка, позволит разнообразить вариантность туристических маршрутов.

Парк представляет собой озелененное подземное пространство, площадь которого составляет более 2 га. Вопрос с естественным освещением пространства парка решен следующим образом — освещение устроено посредством системы линз, зеркал и волоконно-оптических кабелей (рис. 11).

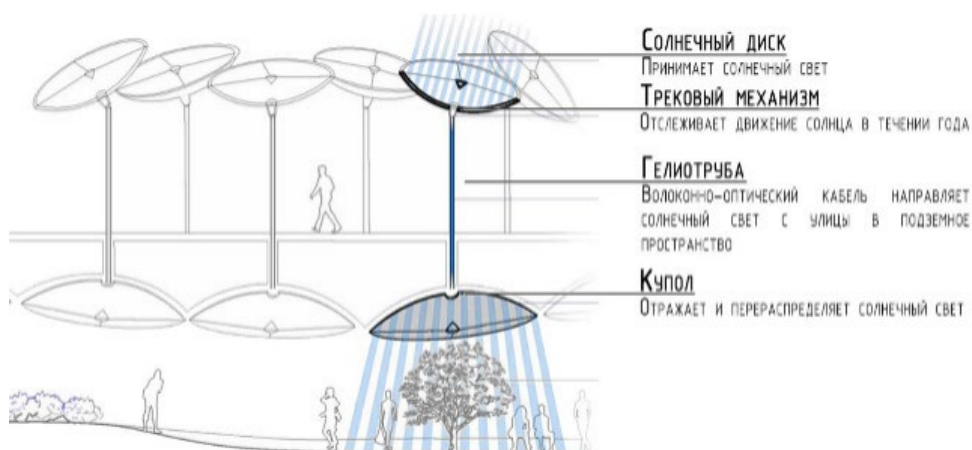


Рис. 11 - Схема устройства волоконно-оптических кабелей

Данная система позволяет перенаправлять свет с поверхности земли и крыш соседних зданий в подземное пространство парка. Ключевой особенностью парка является объединение растений из разных климатических поясов, не произрастающих на одной территории в природной среде. Кроме озеленения в парке располагаются места для отдыха, спортивные площадки и малые архитектурные формы.

По задумке авторов после строительства основного объема парка на свободных территориях начнется строительство многофункционального жилого комплекса, подземная часть которого будет соединена с парком переходом. Такое решение позволит привлечь посетителей в парк и положить начало создания подземного уровня Нью-Йорка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрены проблемы и преимущества, связанные с внедрением подземных городских пространств в мастер-план современных городов. Так же были рассмотрены требования, выдвигаемые для снижения ущерба окружающей среде при их строительстве. Сформированы основные положения, которые доказывают выгоду при включении подземных пространств в современные мастер-планы крупнейших городов.

1. Современный центр города не является комфортным местом для проживания, решить данную проблему поможет переосмысление роли подземного пространства в современной градостроительной повестке. Рациональное использование подземного пространства и формирование полноценного подземного уровня города позволит перенести часть общественных функций в подземные пространства, освободив место под значимые социальные объекты на поверхности.

2. Затраты на строительство объектов подземной архитектуры незначительно превышают стоимость возведения классического здания, однако в долгосрочной перспективе позволяют сократить расходы на эксплуатацию и обслуживание здания. Экономический эффект от комплекса подземных зданий или же сети в значительной степени положительно влияет на благополучие города, в котором он размещен.

3. Использование подземного пространства с целью распределения транспортных потоков является приоритетным направлением для крупных и крупнейших городов, так как, во-первых, позволяет создать безопасную окружающую среду, что благоприятно сказывается на ситуации с трафиком в городе. Во-вторых, вынос ряда транспортных путей под землю и размещение на их месте общественных объектов положительно отражается на экологии района строительства.

4. Строительство объектов подземной архитектуры на территории России позволит не потерять ценный архитектурный облик городов и внедрить необходимые функции, не разрушая визуальные качества среды, что в теории должно положительно повлиять на туристический потенциал городов, сделав их притягательным не только для туристов, но и для жителей города.

5. Рациональное использование городского пространства за счет внедрения подземных уровней создаст благоприятные условия для всесезонного использования города, что актуально для городов севера России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год / Росгидромет. – Москва, 2024.
2. Структура и содержание мастер плана / ВЭБ.РФ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://service.veb.ru/natsionalnyy-standart-master-planov/>
3. Распоряжение правительства РФ от 13 февраля 2019 г. № 207–р «Об утверждении Стратегии пространственного развития РФ на период до 2025 г.». (ред. от 30.09.2022) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72074066/>
4. «Underground space: Opportunity or a non-sense option? » / P.R. Silva / Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024 – с. 241-244.
5. Архитектурная экология: учеб. пособие для студентов / Е.Р. Никонова. / Пенза: ПГУАС, 2016. – 120 с.
6. Лондонское метро / Википедия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Лондонский_метрополитен
7. Underground transport: An overwiev / Jianqiang Cui, John D. Nelson / Tunneling and Underground Space Technology, 2019 – с. 122-125
8. Совершенствование модели территориального планирования для целей развития городского подземного пространства / В. Л. Беляев / Экология урбанизированных территорий, 2023 – С. 72-78.
9. Planning and Designing Successful Underground Facilities: A summary of lessons learned from worldwide projects / Raymond Sterling and Surbana Jurong / Surbana Jurong Consultants Pte Ltd - 2023 – 26 с.
10. Экология города: [учебное пособие] / В. Л. Вершинин. / Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. – 88 с.
11. Механизмы разработки и внедрения мастер-плана / ВЭБ.РФ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://service.veb.ru/natsionalnyy-standart-master-planov/>
12. Видение российского города будущего / ВЭБ.РФ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://service.veb.ru/natsionalnyy-standart-master-planov/>
13. Deep Landscape / Elisabeth Sjödahl / Oslo School of Architecture and Design, 2024. – 205 с.

14. Bibliometric analysis of research challenges and trends in urban underground space / You Zhang, Liang Zheng [и др] / Deep Undergr Sci Eng, 2024 с. 1-9
15. The impact of tunnelling existing transport infrastructure on liveability and residential attractiveness / Daan du Croix Timmermans / University of Groningen – 2024. – 59 с.