



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 Экологические индикаторы городского подземного пространства

Исполнитель Кофман Давид Вадимович
(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)

«11» 06 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1. Городское подземное пространство – как ресурс.....	6
1.2 Освоение городского подземного пространства.	10
1.3 Урбанизация	13
1.4 Экологическая безопасность в контексте подземного строительства	14
Глава 2. Экологические индикаторы.....	19
2.1 Экологические индикаторы устойчивого развития	19
2.2 Экологические индикаторы городского подземного пространства	23
2.3 Назначение индексов геоэкологической безопасности урбанизированных территорий	32
Глава 3 Предложение и методология экологических индикаторов городской экосистемы.....	40
Выводы.....	49
Список используемой литературы	52

Введение

Использование городского подземного пространства в крупнейших городах мира значительно растет использование городского пространства. Основным движущими факторами, является нехватка места на поверхности и потребность в улучшении окружающей среды, включая проблемы загрязнения окружающей среды. В условиях ограниченности земельных ресурсов и необходимости сохранения экологического баланса особую актуальность имеет развитие городского подземного пространства. Его освоение является одним из перспективных направлений устойчивого развития современных городов, позволяющим решать комплекс градостроительных, транспортных, экологических и социальных проблем.

Подземные пространства представляют собой ресурс для развития городской инфраструктуры, позволяя эффективно использовать территорию города.

Устойчивое развитие включает в себя баланс между экономическими, социальными и экологическими аспектами, чтобы повысить качество жизни сейчас и в будущем. Устойчивость - это лишь одна из концепций, которые требуют учета городских показателей; совсем недавно были разработаны концепции экосистемных услуг, устойчивости, умных городов, которые требуют ввода городских данных. Таким образом, городские показатели становятся более общим понятием, относящимся к разработке, сбору и анализу данных из различных аспектов городской жизни, а затем применению этих знаний для улучшения городской среды.

В последнее десятилетие в России и в мире происходит интенсивное освоение городского подземного пространства в целях размещения объектов

транспортной инфраструктуры. Это позволяет городам получить ряд положительных экономических, экологических и других результатов. Вместе с тем нерациональное использование ресурсов может привести к значительным отрицательным последствиям. Необходим анализ существующих методов оценки данного вида ресурсов, его использования в транспортных и других целях, а также возможностей регулирования данных процессов.

Обычно городские показатели представлены в виде списков, в которых отдельные показатели сгруппированы в соответствии с предметом или областью знаний. Данные, лежащие в основе этих списков, имеют различную степень полноты и точности с точки зрения мониторинга показателей. Для сбора данных по конкретным индикаторам могут использоваться различные методологии, начиная от мониторинга на местах и всеобъемлющих числовых данных, заканчивая экспертными оценками и ранжированием.

Цель работы заключается в разработке методологических основ экологической оценки и анализе экологических индикаторов городского подземного пространства.

Задачи

1. Проанализировать существующие классификации индикаторов городского подземного пространства.
2. Разработать методику оценки экологической ситуации городского подземного пространства при помощи экологических индикаторов.
3. Сформировать рекомендации по использованию экологических индикаторов городского подземного пространства

Объектом исследования является подземное пространство городских территорий как один из видов природных ресурсов, используемый для размещения объектов городской инфраструктуры.

Предметом исследования являются экологические процессы, возникающие при использовании подземного пространства для развития городской инфраструктуры.

Глава 1. Городское подземное пространство – как ресурс

Устойчивое развитие предполагает гармоничное сочетание экономических, социальных и экологических аспектов, с целью повышения качества жизни как нынешнего, так и будущих поколений. Важным условием является установление диалога между обществом, бизнесом и государством. На практике необходимо создавать условия для совместного взаимодействия власти, бизнеса и общественных организаций. Это включает привлечение инвестиций в инфраструктурные проекты и развитие социальных инициатив. Особое внимание следует уделять экологическим программам, например, внедрению новых технологий по переработке отходов и повышению энергоэффективности.

Общество должно быть вовлечено в процессы принятия решений. Важным направлением является обучение граждан вопросам устойчивого развития и привлечение их к реализации различных проектов. Такой подход способствует созданию более комфортной, безопасной среды для жизни всех жителей города.

За последние десятилетия как в России, так и во всем мире наблюдается активное освоение городского подземного пространства в целях размещения транспортной и иной инфраструктуры. Это позволяет городам достигать ряда положительных экономических и экологических результатов. Однако нерациональное использование этих ресурсов может привести к серьезным негативным последствиям. Поэтому важно анализировать существующие методы оценки подземных ресурсов, их использование в транспортных и иных сферах, а также разрабатывать механизмы регулирования данных процессов.

Подземное пространство часто рассматривается как естественные или созданные человеком полости внутри земной коры, используемые для различных хозяйственных и иных целей. Подземное пространство часто рассматривают как естественные или искусственно созданные полости а

недрах земли, используемых для хозяйственных или иных целей. Ряд авторов [1, 2] считает, что подземное пространство можно отнести к группе ресурсов называемых пространственные они служат средой для жизни и деятельности людей. Наиболее важными характеристиками источников «пространственных» ресурсов являются их геометрические показатели (размеры, форма и др.), время существования (с данным состоянием), содержание (чем заполнены), с какими объектами или средами граничат и в каких отношениях с ними находятся. Основными направлениями использования пространственных ресурсов человеком являются: проживание; создание и сохранение материальных и других благ Автор [1] определяет подземное пространство как вид ресурсов недр, используемый в качестве среды для проживания, размещения объектов или протекания процессов. Источниками же подземного пространства являются естественные или искусственно созданные полости в недрах земли, а также участки недр, в которых могут быть созданы полости, используемые для указанных целей.

Основными характеристиками источников подземного пространства являются: глубина от поверхности земли, объем и форма, свойства окружающего массива, территориальное расположение, устойчивость (способность сохранять свою форму во времени), возможность доступа с поверхности земли и др.

Умнов В. А. [147] также приводит классификацию состояний подземного пространства, приведенную на рис. 1.



Рисунок 1. Классификация состояний подземного пространства Умнов В.А

Основными характеристиками источников подземного пространства являются: глубина от поверхности земли, объем и форма, свойства окружающего массива, территориальное расположение, устойчивость (способность сохранять свою форму во времени), возможность доступа с поверхности земли и др.

Автор [1] определяет основное полезное свойство подземного пространства как способность вмещать в себя какие-либо объекты или процессы. В качестве наиболее значимых полезных характеристик подземного пространства приводятся следующие: имеет относительно стабильные климатические характеристики (температурно-влажностный режим); изолировано от разного рода поверхностных воздействий, таких, как шум, вибрация, радиоактивность и т.д.; относительно герметично, а также способно удерживать тепловую и другие виды энергии; влияние любого объекта, расположенного под землей на окружающую среду значительно ниже и в лучшей степени может контролироваться; подземные здания часто не требуют существенных затрат на внешнюю отделку, служат значительно дольше и требуют гораздо более низких эксплуатационных затрат, чем

поверхностные; подземное пространство в ряде случаев легче осваивать, чем поверхностное, так как оно не зависит от топографии и дробления на частные участки.

В качестве основных недостатков ресурса, по сравнению с поверхностным пространством, отмечаются: высокая естественная влажность; отсутствие дневного света; невозможность свободного доступа с поверхности земли, т.к. спуск и подъем осуществляются через определенные выработки (в некоторых случаях это является достоинством); наличие горного давления и возможность сдвижения горных пород вследствие создания или использования подземных пустот; более высокие капитальные затраты при строительстве здания под землей, чем на поверхности [1].

Оценкой природных ресурсов можно назвать деятельность, направленную на определение их общественной полезности (ценности). Иначе, для конкретного вида ресурсов оценка - это определение вклада результатов его использования в повышение уровня удовлетворения общественных потребностей с учетом затрат на использование. В ряде случаев под оценкой также понимают результаты такой деятельности

Необходимость оценки природных ресурсов обусловлена в первую очередь их ограниченностью по количеству и качеству и вытекающей из этого необходимостью постоянного поиска новых источников и рационального использования уже имеющихся. В связи с этим она является необходимой для следующих видов человеческой деятельности: принятие решений о целесообразности использования источников природных ресурсов, определение очередности и оптимальных вариантов использования природных источников, определение размеров компенсаций при передаче источника от одного пользователя (собственника) ресурса другому или компенсаций их полного изъятия (потерь)

1.2 Освоение городского подземного пространства.

В современной градостроительной практике подход к росту городов за счет увеличения территории прилегающих свободных земель, часто оказывается либо невозможным из-за природно-физических условий, либо экономически нецелесообразным. 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 среды через такие направления, как уплотнение застройки, освоение не используемых участков и, в первую очередь, использование подземного пространства.

Освоение подземного пространства охватывает широкий спектр направлений, начиная с нефтегазовой отрасли и геологоразведочных работ. Среди них особое место занимает строительство объектов подземной инфраструктуры, связанное с возведением различных сооружений. К таким объектам относятся метро, канализационные коллекторы, а также месторождения полезных ископаемых.

Представляется целесообразным разделить подземных зон города по функциональному использованию на основные типы

В действующем законодательстве РФ, в частности в Градостроительном Кодексе указано, что в состав территориальных зон могут включаться: -жилые; - общественно-деловые; -производственные; -зоны инженерной и транспортной инфраструктур; -зоны сельскохозяйственного использования; -зоны рекреационного назначения; -зоны особо охраняемых территорий; -зоны специального назначения; -зоны размещения военных объектов; - иные виды территориальных зон.

Между тем, для каждой территориальной зоны определяются соответствующие параметры развития и накладываются ограничения путем установления градостроительных регламентов. В градостроительной практике

еще никому не удавалось точно соотнести зоны функциональные и территориальные. Как правило, территориальные зоны существенно меньше функциональных, а их назначение более четко определено.

Подземные пространства являются ключевым элементом городской инфраструктуры, способствуя решению задач, вызванных стремительной урбанизацией и увеличением численности населения. С расширением городов и уменьшением доступной поверхности земли, использование подземных зон становится эффективным способом улучшения качества жизни и повышения устойчивости городских территорий. Ниже представлены главные преимущества применения подземных пространств в городской инфраструктуре:

1) Оптимизация использования территорий.

Рост спроса на городское пространство требует внедрения инновационных подходов к землепользованию. Подземные пространства предоставляют возможность рационально использовать ограниченную площадь в густонаселённых городах. Перемещая такие функции, как парковки, транспортные узлы и инженерные коммуникации, под землю, города освобождают поверхность для создания парков, рекреационных зон и жилых кварталов, что значительно улучшает качество жизни горожан.

2) Экологические преимущества.

Применение подземных пространств способствует экологической устойчивости городов. Размещая инфраструктуру под землей, удаётся снизить уровень загрязнения воздуха и уменьшить транспортные заторы. Это улучшает качество воздуха и снижает шумовое загрязнение, создавая более комфортную среду обитания. Кроме того, подземная застройка помогает сохранить зелёные насаждения и природные экосистемы, уменьшая площадки для поверхностной застройки.

3) Экономические преимущества.

Развитие подземной инфраструктуры приносит значительные экономические выгоды. Создание многофункциональных подземных объектов, таких как торговые центры или спортивные комплексы, стимулирует локальную экономику и создаёт рабочие места как на этапе строительства, так и при эксплуатации. Более того, подземные сооружения требуют меньших затрат на обслуживание благодаря сниженной подверженности воздействию окружающей среды.

4) Социальная справедливость и доступность.

Грамотно спроектированные подземные пространства могут способствовать социальной инклюзивности, предоставляя доступ к общественным удобствам для различных слоёв населения. Кроме того, интеграция подземных объектов с общественным транспортом повышает мобильность.

5) Интеграция с городским планированием.

Для эффективного использования подземных пространств необходимо их включение в общие стратегии развития города. Это требует координации между государственными органами, частными застройщиками и общественными организациями, чтобы подземные объекты гармонично вписывались в общее представление о развитии городской территории. Такой системный подход обеспечивает учёт как надземных, так и подземных потребностей города.

Таким образом, подземные пространства играют многогранную роль в развитии городской инфраструктуры и позволяют решать ключевые проблемы современных городов. С ростом численности городского населения и усилением экологических вызовов, использование подземных зон становится критически важным для создания устойчивой, комфортной и справедливой городской среды.

Осознавая потенциал подземных пространств как ценного ресурса городского планирования, города могут заложить фундамент для устойчивого будущего, где развитие сочетается с сохранением экологии и социальной справедливостью.

1.3 Урбанизация

Урбанизация как глобальный процесс концентрации населения в городах и усиления их роли в социально-экономическом развитии общества оказывает многогранное влияние на окружающую среду. Одной из наиболее острых экологических проблем является загрязнение атмосферы. Города, из-за высокой плотности промышленных предприятий и транспортных потоков, становятся основными источниками выбросов вредных веществ в воздух. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, более 90% городского населения мира дышит воздухом, качество которого не соответствует санитарным нормам. Это приводит к росту заболеваемости органов дыхания, сердечно-сосудистой системы и другим негативным последствиям для здоровья.

Кроме того, урбанизация сопровождается увеличением объёмов сточных вод, попадающих в водные объекты. Несмотря на существующие системы очистки, реки, озёра и подземные воды в городах подвергаются значительному загрязнению. Основными источниками загрязнения выступают промышленные предприятия, жилищно-коммунальное хозяйство и поверхностный сток с урбанизированных территорий.

Также в ходе городского строительства происходит нарушение и уничтожение естественного почвенного покрова, заменяемого искусственными материалами. Городские почвы зачастую содержат повышенные концентрации тяжёлых металлов, нефтепродуктов и других вредных веществ, что снижает их экологическую функцию и создаёт угрозу здоровью населения.

Расширение городских территорий ведёт к уничтожению естественных экосистем, фрагментации местообитаний и сокращению биологического разнообразия. Городская среда способствует проникновению инвазивных видов, что дополнительно угрожает местным экосистемам.

Города являются основными центрами образования твёрдых коммунальных и промышленных отходов. Особенно остро проблема утилизации и размещения

отходов стоит в крупных городах и мегаполисах, где ежегодно образуются миллионы тонн мусора.

Урбанизированные территории формируют специфический микроклимат, отличающийся от окружающей среды. Эффект "городского теплового острова" проявляется в повышении температуры воздуха на 1-5°C по сравнению с прилегающими территориями, что негативно сказывается на здоровье жителей и увеличивает энергопотребление.

Высокая шумовая нагрузка от транспорта, промышленных объектов и других источников является серьёзной экологической проблемой городской среды. Длительное воздействие шума может вызывать нарушения сна, стресс, снижение работоспособности и способствовать развитию сердечно-сосудистых заболеваний.

Для создания комфортной и безопасной городской среды крайне важно решать перечисленные экологические проблемы. Одним из перспективных направлений минимизации негативных воздействий на окружающую среду при сохранении экономического роста является освоение подземного пространства городов.

1.4 Экологическая безопасность в контексте подземного строительства

Экологическая безопасность в контексте подземных строительных работ является важнейшим аспектом обеспечения устойчивого развития городов. Активное освоение подземного пространства связано с многочисленными экологическими рисками, такими как загрязнение грунтовых вод, деградация почвенного покрова, изменение гидрологических условий, шумовое и вибрационное воздействие, а также нарушение природных экосистем. Для оценки и поддержания экологического баланса применяются экологические индикаторы — показатели, отражающие состояние окружающей среды и эффективность природоохранных мер.

Ключевым экологическим индикатором является качество грунтовых вод. Контроль содержания вредных веществ, таких как тяжелые металлы, нефтепродукты и химические соединения, позволяет определить степень загрязнения подземных водоносных горизонтов, что особенно важно при строительстве и эксплуатации подземных объектов. Мониторинг состояния почвенного покрова также является необходимым — он включает оценку физико-химических свойств и уровня загрязненности почвы, что помогает выявлять негативные последствия строительных работ для поверхности земли и природных экосистем.

Еще одним важным показателем является геологическая устойчивость и деформации грунтов. Контроль за изменениями в грунтовых массах и диагностическими деформациями позволяет своевременно предотвращать опасности проседаний, прослоек и обрушений, которые могут привести к экологическим авариям. Уровень шума и вибрации, возникающих при проведении строительных и эксплуатационных работ, также входит в число важнейших индикаторов, поскольку нарушение допустимых нормативов может негативно сказаться на здоровье населения, а также вызвать повреждение окружающих зданий.

Качество воздуха внутри подземных сооружений, включая концентрацию кислорода, углекислого газа и вредных газов (например, радона), является показателем безопасной эксплуатации. Регулярное измерение этих параметров обеспечивает создание здоровых условий для персонала и пользователей объектов. В случаях, когда подземное строительство сопряжено с воздействием на природные территории или парки, важно отслеживать состояние биоценозов, изменение их структур и численности видов.

Для точной оценки состояния экологической безопасности применяются современные методы и технологии, включая лабораторные анализы проб воды и почвы, автоматизированные системы контроля воздуха, шумомеры, геодезические измерения и экологические моделирования. Такой комплексный подход позволяет выявлять потенциальные угрозы на ранних стадиях и своевременно принимать меры по их устранению или минимизации.

Использование экологических индикаторов в управлении подземными проектами способствует не только снижению негативного воздействия на окружающую среду, но и повышает доверие общества к реализации городских программ развития. Благодаря им осуществляется контроль за соблюдением нормативов и стандартов, планирование мероприятий по охране окружающей среды и формирование экологического баланса в городской среде.

В целом, эффективное использование экологических индикаторов при реализации подземных работ позволяет обеспечить экологическую безопасность, сохранить природные ресурсы и здоровье населения, а также сосредоточить усилия на создании более устойчивых и комфортных для жизни городских пространств. Внедрение таких систем мониторинга является важным этапом развития современного городского пространства и обязательным условием для устойчивого и экологичного урбанистического будущего.

Глава 2. Мониторинг городского подземного пространства

Первым ученым, который употребил термин «геоэкология», был немецкий географ К. Троль. Он использовал это название для обозначения экологической направленности ландшафтоведения. Позже, благодаря усилиям энциклопедиста Н.П. Реймерса, классическую экологию стали называть биоэкологией, чтобы отличать ее от социальной экологии и геоэкологии.

Геоэкологический мониторинг определяется в Санитарных нормативах и правилах (СНиП) 2.01.15–90 как единая система, включающая комплексные наблюдения за инженерно-геологическими процессами, эффективностью инженерной защиты, а также состоянием сооружений и территорий на этапах строительства и эксплуатации подземных объектов. Кроме того, в его задачи входит подготовка рекомендаций по усилению инженерной защиты окружающей среды от воздействия горно-строительной деятельности.

В другом документе, РД015900-124-96, геоэкологический мониторинг трактуется как процесс слежения, оценки и анализа изменений в геосфере и их негативных последствий, с инженерным обоснованием превентивных и восстановительных мероприятий. Он является одной из подсистем абиотического мониторинга, обеспечивающего наблюдения, оценку, прогноз и управление изменениями геологической среды.

Геоэкологический мониторинг представляет собой систему наблюдений и прогнозов изменений состояния литосферы, прежде всего техногенного характера. Он служит частью управления иррационального использования геологической среды, предоставляя оценочную и прогнозную информацию о состоянии, структуре и свойствах этой среды, необходимую для принятия управленческих решений.

Основные цели программы геоэкологического мониторинга заключаются в получении, хранении и обработке информации о современном состоянии, свойствах и структуре геологической среды, а также о типах и интенсивности её изменений, вызванных освоением подземного пространства. Эти данные помогут выяснить причины активизации природно-техногенных процессов и составить прогнозы их

развития. Кроме того, геоэкологический мониторинг обеспечивает информацией мероприятия по охране и рациональному использованию природной среды.

Управление геологической средой в условиях использования подземного пространства является важным аспектом подземного мониторинга. Объём подземных сооружений, не связанных с добычей полезных ископаемых, в развитых странах удваивается каждые десять лет, что увеличивает их функциональность. В подземных пространствах располагаются различные инфраструктуры, такие как метрополитен, промышленные комплексы, машинные залы электростанций, санатории, музеи и хранилища.

Основные задачи геоэкологического мониторинга направлены на получение данных о состоянии, свойствах и структуре геологической среды в местах размещения подземных сооружений и соседних районах. Также важна организация контроля за изменениями геологической среды, вызванными горно-строительной деятельностью, и обеспечение своевременной информации о состоянии этих изменений для всех заинтересованных организаций.

Инструменты геоэкологического мониторинга включают оценку количественных и качественных изменений геологической среды на протяжении жизненного цикла подземного сооружения, моделирование и составление краткосрочных и долгосрочных прогнозов изменений в геологической среде под влиянием строительства. Также необходимо оценивать реакцию экосистем на изменения состояния геологической среды, связанные с горно-строительными процессами.

Конечной экологической целью геоэкологического мониторинга является рациональное использование возобновляемых и невозобновляемых ресурсов, а также защита литосферы в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

Глава 2. Экологические индикаторы

2.1 Экологические индикаторы устойчивого развития

Оценка качества жизни городского населения требует исследования всех факторов, определяющих такое качество: экономических, социальных и экологических. Для этого необходима разработка соответствующих индикаторов устойчивого развития городов. В настоящее время большинство городов мира и нашей страны развиваются неустойчиво. В моей работе рассматривается возможности адаптации для России подходов к разработке индикаторов устойчивости городов на основе индекса человеческого развития, разработанного Программой развития ООН. И индекса скорректированных чистых накоплений Всемирного банка.

В настоящее время существует много исследований по разработке индикаторов устойчивого развития городов. Для измерения качества и устойчивости городской окружающей среды был реализован специальный проект Программы по охране окружающей среды ООН(UNEP) и Глобальной базы информационных ресурсов UNEP\GRID-Arendal. В результате проекта для подготовки докладов по охране окружающей среды городов в интернете была представлена система индикаторов , которые дают представление о состоянии окружающей среды в городах и позволяют анализировать отдельные городские проблемы более детально. Первоначальный набор индикаторов был разработан в 1998 году. Все имеющиеся подходы объединяют экономические, экологические и социальные компоненты и индикаторы для изучения подробностей настоящего и будущих поколений.

UNEP\GRID были выделены две системы городских индикаторов: 1) система ключевых, включающих 29 показателей: 2) общая система, включающая ключевые и специфические городские индикаторы, состоящая из 90 показателей. Была разработана матрица ключевых индикаторов

устойчивого развития для городов (Таблица 1.). матрица городов обеспечивает общий обзор и сопоставление этих широко используемых показателей. Знак + в индикаторном столбце означает, что аналогичный показатель является частью системы индикаторов соответствующей организации. Этот подход был выбран, чтобы сопоставить деятельность международного уровня и различных мер, используемых в городах. Выбор индикаторов направлен на достижение баланса между различными мероприятиями в рамках устойчивого развития городов и системами индикаторов международных организаций. Не все из включенных в перечень показателей в рамках проекта по подготовке докладов по охране окружающей среды городов(CEROI) используется в других международных системах.

Таблица 1

Ключевой индикатор	О ЕИ	ЕА ОС	Е Ф	МСМ ЭИ	ЦНП ООН
Доступ к питьевой воде				+	+
Выбросы в воздух	+		+		
Качество воздуха	+	+	+		+
Потребление энергии		+	+	+	
Зеленые зоны		+	+		
Цены на жилье					+
Плотность населения		+			

Рост населения		+			+
Качество питьевой воды		+		+	
Рециклирование		+		+	
Отношение ренты к доходам					=
Очистка воды		+		+	+
Потребление воды	+	+	+	+	+
Виды транспорта		+	+		+

Обозначение: ОЕИ – общие европейские индикаторы, ЕАОС – Европейское агентство по окружающей среде, ЕФ – Европейский фонд улучшения условий проживания и работы; МСМЭИ – Международный совет по местным экологическим инициативам. ЦНПООН – центр Организации Объединенных Наций по населенным пунктам.

выявлено, что совместимость, сопоставимость, единообразие и постоянный мониторинг данных о городских показателях (включая показатели устойчивого развития) создают значительные сложности для исследований в различных регионах и отраслях промышленности/экономики. Лучший способ учитывать показатели устойчивого развития в городских программах — это включить соответствующие показатели на самом низком уровне иерархии в рамках установленных категорий. Предложены три ключевых дескриптора для мониторинга использования показателей устойчивого развития:

1. объем разработанных показателей устойчивого развития (млн м³);
2. плотность использования показателей устойчивого развития (м³/м²);
3. выработанный объем показателей устойчивого развития на человека (м³/человек).

Дополнительно могут быть собраны данные о доле городских функций, реализуемых в подземном и надземном пространствах, а также о стратифицированном использовании показателей устойчивого развития по глубине.

В настоящее время средняя плотность использования показателей составляет примерно 0,05 м³/м² (что можно интерпретировать как виртуальную глубину использования в 5 сантиметров), а выработанный объем на одного человека достигает около 10 м³. В центральных районах города, например в деловых центрах, виртуальная глубина использования может достигать нескольких метров.

Ключевым фактором, влияющим на развитие показателей устойчивого развития, является состояние грунта, так как оно значительно влияет на стоимость подземных работ и строительные риски. Однако благоприятные наземные условия, например, слабые грунты с высоким уровнем насыщенности водой, не рассматриваются в настоящее время как препятствие для развития показателей устойчивого развития, что подтверждается активным использованием таких подходов в европейских городах, например, в Амстердаме.

Теоретически, показатель «Объем освоенных показателей устойчивого развития на душу населения» должен более точно отражать использование таких показателей в городах, поскольку исключает концептуальные сложности, связанные с определением точной площади для анализа плотности. Однако наилучшая корреляция достигнута с показателем «Плотность использования показателей устойчивого развития».

2.2 Экологические индикаторы городского подземного пространства.

Основная задача экологических индикаторов — предоставить информацию о текущем состоянии окружающей среды и о влиянии человеческой деятельности на неё так, чтобы выявлять новые экологические проблемы и оценивать эффективность принятых решений. В рамках этого они должны не только отображать текущий уровень загрязнения и экологического состояния, но и показывать тенденции изменений по сравнению с целевыми показателями, находить причинно-следственные связи между состоянием окружающей среды и нагрузками на неё, а также выявлять взаимосвязи между экологическими, экономическими и социальными аспектами.

В настоящее время использование экологических индикаторов широко признано на международном уровне и реализуется в рамках различных программ и механизмов. К примеру, такие показатели используются в рамках системы показателей устойчивого развития, утвержденных Комиссией по устойчивому развитию ООН, а также в вопросниках статистического отдела ООН и Программы ООН по окружающей среде (ЮНЕП). Кроме того, эти показатели применяются в рамках оценки эффективности экологической деятельности в рамках международных обзоров, подготовленных ЕЭК ООН, а также включены в доклад «Киевская оценка» (2003) и в основные показатели Европейского агентства по окружающей среде. В рамках рекомендаций Всемирной организации здравоохранения существует утвержденный перечень ключевых показателей состояния окружающей среды для Европы.

Со времён начала 2000-х годов экологические индикаторы стали важнейшим инструментом оценки экологического состояния в странах Восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии (ВЕКЦА). В ходе многочисленных консультаций представители этих стран отобрали и согласовали 118 экологических индикаторов из общего перечня из 354, предложенного Европейским агентством по окружающей среде. Этот набор включает показатели по важнейшим экологическим направлениям: атмосферный воздух (25 индикаторов), изменения климата (11), водные ресурсы (35), земли (6), биоразнообразие (12), отходы (12), а также показатели, связанные с секторами экономики: сельское хозяйство (3), энергетика (7) и транспорт (7). Таким образом, система индикаторов, разработанная в рамках проекта UNEP, представляет собой важный инструмент для оценки состояния городской среды и принятия обоснованных решений, направленных на улучшение качества жизни в городах.

В современном городе эффективное управление является сложной задачей. Рост урбанизации приводит к постоянному притоку населения и увеличению техногенных территорий, что вызывает ухудшение качества окружающей среды. Перед системой городского менеджмента встают новые вызовы, в том числе экологические, которые непосредственно влияют на качество жизни населения. Несмотря на уже существующие многочисленные исследования, актуальность разработки систем городских индикаторов качества окружающей среды только возрастает. Они служат инструментом для измерения, визуализации и обсуждения острых экологических проблем города. Индикаторы формируют количественную и качественную характеристику, дают возможности для оценки ситуации, помогают подойти комплексно к вопросам защиты окружающей среды. Главная цель разработки систем индикаторов – обоснование приоритетов в развитии городской среды на этапе управленческих и градостроительных решений. Это также делает их инструментом предотвращения экологического ущерба, который представляет собой разность между экологическим ущербом при отсутствии

проводимых природоохранных мероприятий и ущербом, уменьшенным благодаря реализации этих мероприятий. Как правило, индикатор упрощает решение сложной задачи, сводя ее оценку к нескольким количественным или качественным показателям. Индикаторами могут выступать и статистические данные, и параметры, которые рассчитаны на основе этих данных, и качественные величины. Согласно временной методике определения предотвращенного экологического ущерба от 09.03.1999, предотвращенный экологический ущерб от загрязнения окружающей природной среды представляет собой оценку в денежной форме возможных отрицательных последствий от загрязнения природной среды, которые удалось избежать в результате природоохранной деятельности, осуществления природоохранных мероприятий и программ, направленных на сохранение или улучшение качественных и количественных параметров, определяющих экологическое качество окружающей среды в целом и ее отдельных эколого - ресурсных компонентов. Городские индикаторы качества окружающей среды дают информацию для реализации подобных мероприятий, представляют количественные и качественные показатели в удобной для анализа форме. Системы индикаторов устойчивого развития городов начали разрабатываться с 70-х гг. XX в. К наиболее авторитетным организациям по созданию и наполнению данных систем относят: Всемирный Банк, Европейскую сеть городских исследований, Европейское агентство по окружающей среде Международную организацию по стандартизации, и ряд других. Обычно существующие системы индикаторов качества окружающей среды включают несколько десятков разнообразных показателей. На сегодня предложено несколько ключевых подходов к их ранжированию. 188 «Оригинальные исследования» (ОРИС) • № 10 • 2022 ores.su 1. Система, созданная ООН-Хабитат. Согласно рекомендациям данной организации, все индикаторы делятся на три вида: ключевые, дополнительные и специфические. Такая система предоставляет общую информацию об устойчивости городской территории, состоянии экологии и может быть использована для

межтерриториальных сравнений. 2. Система «тема – подтема – индикатор» созданная Комиссией по устойчивому развитию ООН. В соответствии с ее подходом индикаторы выделены по темам (атмосфера, почва, вода, озеленение и т.д.) и подтемам (качество почвы, качество воздуха, качество воды, количество зеленых насаждений и т.д.). С помощью этой системы можно дать оценку эффективности использования эколого-ресурсного потенциала и выявить факторы ограничения развития, связанные с его истощением. Преимуществом данной системы является то, что она применяется к любой территории, без потери качества исследования, а также дает наиболее полную характеристику компонентов окружающей среды. 3. Система «проблема – индикатор», акцентирует внимание на основных проблемах, каждой из которой соответствует свой спектр индикаторов. Подобный подход часто встречается при построении систем на муниципальном уровне, т.к. на общегородском, как правило, нельзя четко разделить экологические, экономические и социальные показатели. Применяют данную систему для решения первоочередных и явно выраженных городских проблем. При большом выборе экологических индикаторов, каждому из них присущи свойства, которые и характеризуют их общее назначение: – обеспечение информационного предупреждения на ранних этапах планирования; – пространственно-временное сравнение различных ситуаций; – возможность прогноза; – выстраивание приоритетов в решении проблем; – оценка результатов принятых решений. Важность связи между компонентами в системе индикаторов намного важнее, чем высокая точность некоторых значений. Это означает, что данные, которые недостаточно полны для точного изучения какого-либо индикатора на краткосрочных временных интервалах, вполне приемлемы для анализа общей тенденции. [2]. Для примера, автором работы была составлена система городских индикаторов качества окружающей среды, которая отвечает основным факторам, определяющим величину предотвращенного экологического ущерба на территории субъектов Российской Федерации согласно методике, а именно

[3]: - снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу; - снижение сбросов загрязняющих веществ в поверхностные водоемы и подземные горизонты; - снижение загрязненности земель химическими веществами; - создание и поддержание природных комплексов путем создания охраняемых и заповедных территорий, запрет несанкционированных сплошных рубок и застройки на этих территориях. Система построена по принципу «тема – подтема – индикатор» упоминавшимся выше Система городских индикаторов качества окружающей среды. Таблица 2. Система построенная по принципу «тема – подтема – индикатор»

Тема	Подтема	Индикаторы
Окружающая среда	Атмосферный воздух	доля болезней органов дыхания у детей от общего числа детских заболеваний, %
	Водные объекты	Повышение универсального комбинаторного индекса загрязнения (до и после)
	Почвенный покров	Содержание свинца в почве, мг/кг
	Зеленные насаждения	Уровень озеленения по отношению к нормативному

Экологические индикаторы и индексы устойчивого

Развития городов в глобальном и национальных масштабах.

Базовые принципы устойчивого развития были сформулированы на конференции ООН в Рио-де-Жанейро в 1992 году и включают три ключевых направления: экономическую стабильность и сотрудничество, социальное благополучие и экологическое равновесие. Сегодня общепризнана необходимость использования комплексной системы взаимосвязанных индикаторов — экологических, экономических и социально-экономических — для оценки устойчивого развития. Такая система позволяет принимать более обоснованные управленческие решения, направленные на снижение негативного воздействия человека на окружающую среду, улучшение экологических условий жизни и уменьшение экологических угроз для здоровья городского населения.

В настоящее время разрабатывается множество международных и национальных инициатив, направленных на создание индикаторов и индексов устойчивого развития. Они помогают собирать базовые данные о качестве жизни в разных странах и регионах. Одним из самых распространённых и масштабных является система индикаторов «Ecological Footprint» (Экологический след), которая используется для изучения и сравнения различных стран мира по более чем 550 параметрам.

Впервые внедрение экологических индикаторов предложила Комиссия по устойчивому развитию ООН в 1996 году. Позже подобные системы были разработаны и применяются рядом уважаемых организаций, таких как Йельский и Колумбийский университеты в США, Всемирный фонд дикой природы (WWF), а также Программа ООН по населённым пунктам (UN-HABITAT). Все эти индикаторы включают данные из разных компонентов

окружающей среды и рассчитываются регулярно — ежегодно или с небольшой периодичностью. Они позволяют не только оценить текущее экологическое положение конкретного региона или страны, но и сравнить результаты с другими территориями в глобальном контексте, а также измерять прогресс в области экологии и управления природными ресурсами.

Однако, несмотря на существование подобных систем, по-прежнему остаются методологические и статистические сложности, которые затрудняют создание универсальных и международно признанных индикаторов для оценки экологической составляющей качества жизни в городах. В частности, пока отсутствуют такие показатели, которые позволяли бы объективно сравнивать экологическое состояние городов на глобальном уровне.

В России накоплен значительный опыт разработки индикаторов устойчивого развития на региональном уровне. Например, исследователь С.Н. Бобылев и его коллеги разработали матрицу ключевых индикаторов устойчивого развития, адаптированных для оценки городов. Выбранные индикаторы направлены на достижение баланса между различными аспектами устойчивого развития и учитывают системы показателей, используемых международными организациями.

Для оценки экологического состояния регионов в России применяются различные показатели, такие как природоемкость — используемые природные ресурсы и объемы загрязнений на единицу конечной продукции; агрегированные индикаторы, включая истинные сбережения, индекс развития человеческого потенциала, природный капитал и экологические показатели по отдельным компонентам среды. Такие комплексные подходы помогают более

точно отражать влияние экологических факторов и ущерб для здоровья населения, что способствует более эффективной экологической политике.

Особое внимание в отечественной практике уделяется системам интегральных индексов, которые используются для приоритетного планирования социально-экономического развития при разработке городских стратегий. Среди них выделяется «индекс качества городской среды», отражающий степень готовности города к современным вызовам и позволяющий выявлять существующие проблемы городской среды.

Безопасность является одним из ключевых критериев оценки городского пространства. Она не только определяет уровень существующих угроз, но и оценивает параметры среды, которые могут потенциально нанести вред жизни и здоровью людей. Использование индекса качества городской среды позволяет проводить рейтинг городов с целью выявления приоритетных направлений развития и улучшения условий проживания.

Учитывая современные тенденции развития городов в России, исследователь И.А. Прядко отмечает появление множества новых экологических проблем, связанных с урбанизацией и ростом инфраструктуры, что требует системного подхода к мониторингу и управлению экологической ситуацией в городских территориях.

В результате усложнения геоэкологических условий развития городов наблюдается активизация новых, ранее несвойственных данной местности, геологических процессов, что приводит к ухудшению экологической ситуации. Несмотря на значительные успехи в разработке и внедрении экологических индикаторов на местном и региональном уровнях в России, до сих пор не учитываются важные для обеспечения экологической безопасности городов показатели, отражающие устойчивость геологической среды. Одним

из препятствий для внедрения таких геоэкологических индикаторов является отсутствие открытых и доступных данных, необходимых для их расчёта.

Это подчёркивает необходимость создания и внедрения новых, более эффективных индикаторов, в том числе геоэкологических, которые позволят проводить качественный анализ, сбор и мониторинг состояния экологической безопасности в городских территориях. Анализ различных публикаций показывает, что в России пока не существует единого подхода к оценке экологической безопасности регионов и городов. Компоненты, используемые для такой оценки, как правило, не включают геоэкологические индикаторы.

Современные методики и алгоритмы оценки обладают индивидуальным характером: они часто сосредоточены на решении частных задач, оценивают лишь отдельные аспекты экологической безопасности, широко опираются на экспертные оценки, требуют большого объёма исходных данных и не позволяют проводить комплексную оценку на разных уровнях агрегации. Вследствие этого результаты таких исследований сложно сравнивать между собой, их трудно проверить и практически невозможно воспроизвести на других объектах.

В настоящее время, чтобы предотвратить риски бедствий, вызванных опасными природными и природно-техногенными процессами на урбанизированных территориях, необходимо разработать систему индикаторов геоэкологической безопасности. Опыт многолетних исследований, проводимых сотрудниками Института географии Российской академии наук, позволил сформулировать основные подходы к созданию интегрального индекса геоэкологической безопасности урбанизированных

территорий. Такой индекс будет необходим для проведения как глобальных, так и региональных рейтингов качества городской среды.

2.3 Назначение индексов геоэкологической безопасности урбанизированных территорий

Экологическая безопасность урбанизированных территорий считается важной составляющей общей экологической безопасности. Среди различных групп экологических угроз к числу особо значимых относятся геоэкологические опасности, такие как опасные геологические и гидрологические процессы, а также загрязнение почв под воздействием деятельности человека. В таблице приведены примеры индикаторов, имеющих важное значение для мониторинга и оценки условий безопасного развития городов. Индикаторы геоэкологической безопасности описывают текущие и потенциальные геоэкологические опасности, что важно для обеспечения устойчивого развития территорий. Они могут иметь количественную оценку на основе статистических и мониторинговых данных.

Индекс геоэкологической безопасности представляет собой числовую характеристику, основанную на одном или нескольких индикаторах. Основная задача разработки такого индекса — предоставление комплексной, релевантной и сопоставимой информации о геоэкологических угрозах для городских территорий, что важно для принятия решений в планировании и развитии городских пространств, а также для координации мероприятий по обеспечению экологической безопасности.

Для достижения этих целей необходимо решить несколько важнейших задач: провести анализ опыта разработки и внедрения экологических индексов безопасности на различных уровнях и определить их применимость и достаточность для оценки уровня экологической безопасности урбанизированных территорий.

Основные группы экологических опасностей и примеры индикаторов для комплексной оценки экологической ситуации в городах были бы сформулированы дополнительно, чтобы обеспечить полноту данных для анализа и принятия управленческих решений.

Таблица 3. Структура групп экологических опасностей, включающая геоэкологические, на урбанизированных территориях.

Природные	Антропогенные
Опасные метеорологические явления	Загрязнение атмосферы
Сокращение биоресурсов	Техногенные наземные и подземные аварии
Недостаточность озеленения территории	Размещение отходов
Опасные экзогенные геологические процессы	Радиационное загрязнение почвы
Опасные эндогенные геологические процессы	Геохимически загрязненные почвы
Опасные гидрологические явления	Загрязненные поверхностные и подземные воды

Основные группы экологических опасностей и примеры их индикаторов для комплексной оценки экологической безопасности урбанизированных территорий

Таблица 4

Номер		
1	Опасные метеорологические явления	Ураганы(частота, скорость ветра) Осадки(Интенсивность количество)
2	Сокращение биоресурсов	Сокращение биоразнообразия

		(количество видов, численность, количество краснокнижных видов)Сокращение площадей лесов (пожары, вырубка, вредители)
3	Недостаточность озеленения территории	Общая площадь бульваров, парков, ООПТ Количество зеленых насаждений на 1 жителя
4	Опасные экзогенные геологические процессы	Оползни (площадь пораженности, интенсивность проявления)Суффозионно-карстовые (площадь пораженности,
5	Опасные эндогенные геологические процессы	Землетрясения (вероятность, балльность) Радонопроявления (превышение допустимых пределов доз облучения) интенсивность
6	Опасные гидрологические явления	Наводнения (повторяемость, продолжительность) проявления)
Антропогенный класс		
7	Загрязнение атмосферы	Объем сбрасываемых загрязненных вод

		загрязнение донных отложений (площадь, СПЗ
8	Техногенные наземные и подземные аварии	Ареалы загрязненных почв (площадь, СПЗ) (площадь, СПЗ
9	Размещение отходов	Ареалы загрязненных почв (площадь, превышение концентрации радионуклидов над нормой)
10	Радиационное загрязнение почвы	Объемы складированных отходов загрязнение почв и подземных вод
11	Геохимически загрязненные почвы	Подземные взрывы при строительстве, прорыв магистральных подземных коммуникаций Провалы, прогибы
12	Загрязненные поверхностные и подземные воды	Объем выбросов загрязняющих веществ Заболеваемость населения

Использование индексов геоэкологической безопасности оправдано в случаях, когда удаётся чётко прослеживать причинно-следственные связи. Основная сложность при объединении данных в такие индексы заключается в выборе исходных показателей, при этом важно сохранять их значимость. С ростом уровня объединения информации усложняется сопоставимость различных индикаторов. Для снижения риска возникновения геоэкологических опасностей в городах необходимо иметь достоверные данные о потенциальных опасных явлениях. В связи с этим требуется

разработать унифицированный набор индикаторов, который бы в полном объёме отражал особенности опасных природных, природно-техногенных и техногенных процессов на территории города. Включение блока “индикаторы геоэкологической безопасности” в состав интегральной системы “индекс качества городской среды” является необходимым условием обеспечения комплексной экологической безопасности городов.

Основываясь на международном опыте, в контексте определения индекса геоэкологической безопасности урбанизированных геосистем выделяют три основных подхода:

1. Создание системы индикаторов, каждый из которых отражает отдельные аспекты безопасности городской территории. Этот подход позволяет выделить ключевые показатели, связанные с приоритетными геоэкологическими опасностями на конкретной территории. Для удобства и эффективности выбираются наиболее значимые базовые индикаторы, каждый из которых соответствует определённому виду опасности. Такой метод особенно востребован в локальном планировании.

2. Реализация оценки по подсистемам показателей, разделённым на природные, природно-техногенные и техногенные опасности, согласно принятой классификации. Основная сложность здесь заключается в корректном распределении видов геоэкологических угроз по этим классам и разработке единой методики их оценки, применимой независимо от класса. Этот подход ориентирован преимущественно на нужды профильных отраслей.

3. Формирование агрегированного (интегрального) индекса, который отражает общую степень геоэкологической безопасности урбанизированной геосистемы. При этом учитывается сочетание различных видов опасностей,

вероятность их одновременного проявления и возможные последствия. Этот метод является наиболее сложным, но при этом самым эффективным и востребованным, поскольку позволяет проводить сравнения не только на региональном, но и на федеральном уровнях, например, при оценке условий для инвестиционных проектов. Такой количественно выраженный индекс необходим органам принятия решений, поскольку отражает общую степень безопасности территории и экологичность её развития. Рост значения индекса свидетельствует о повышении безопасности, снижение — об увеличении риска геоэкологических угроз. Главной сложностью данного подхода является обеспечение сопоставимости индикаторов разных классов опасностей и разработка обоснованной системы весовых коэффициентов для их интеграции.

Учитывая разнообразие природных и социально-экономических характеристик городов, территорию целесообразно разбивать на однородные участки — урбогеосистемы, которые подвержены одинаковым или сходным видам потенциальных опасностей и проявляют схожую реакцию на воздействия. Для каждой выделенной урбогеосистемы формируется свой набор индикаторов, учитывающий специфические природные и техногенные особенности территории. Это, в свою очередь, усложняет процесс расчёта интегрального индекса геоэкологической безопасности.

В итоге индексы геоэкологической безопасности урбанизированных территорий должны отражать следующие аспекты:

прогнозируемые изменения, связанные с реализацией опасных геоэкологических процессов и явлений, включая их вероятность и продолжительность;

уровень чувствительности или уязвимости объектов, подвергающихся воздействию;

определение негативных последствий, вызванных геоэкологическими угрозами.

Посредством индикаторов отклика осуществляется управление состоянием окружающей среды и рисками возможных негативных изменений. Это реализуется через международные соглашения, правовые нормы и мероприятия, направленные на улучшение экологической ситуации и предотвращение ущерба.

Геоэкологические индикаторы должны включать предельные пороговые значения показателей, изменение которых служит сигналом для принятия экстренных мер. Надёжность собираемых данных определяется их доступностью, соответствием, научной и статистической обоснованностью, а также возможностью верификации. Индикаторы могут быть ранжированы по степени важности для конкретной территории: выделяют ключевые или базовые, которые могут использоваться для разных городов, а также дополнительные или специфические, важные для конкретного региона. Специальные показатели могут иметь меньшую значимость, чем базовые, и актуальны только для определённых территорий.

При оценке реакции объектов на геоэкологические угрозы возникают определённые сложности. В случае экономических объектов в качестве ориентировочной меры уязвимости используется срок амортизации, в то время как для природных компонентов такие нормативы практически не разработаны. Процесс выбора индикаторов в основном определяется заинтересованными сторонами. Региональные и местные органы власти должны выступать основными ответственными за внедрение индикаторов.

Учитывая уникальные особенности каждой городской территории — экономико-социальные и природные — применение одних и тех же индикаторов может быть неэффективным. Методы определения индексов варьируются от прямого подсчёта и использования удельных значений до сравнения с нормативами, анализа аналогичных ситуаций или моделирования воздействий на конкретных реципиентов. Общепринятая методика расчёта риска — это произведение

вероятности проявления опасного явления и уязвимости объекта, однако для точной оценки необходимы достоверные данные о возможном ущербе, которые зачастую отсутствуют. В подобных случаях рекомендуется применять комплексные, непараметрические методы оценки, основанные на относительных значениях, а вероятность событий рассчитывается с учётом их повторяемости.

Глава 3 Предложение и методология экологических индикаторов городской экосистемы

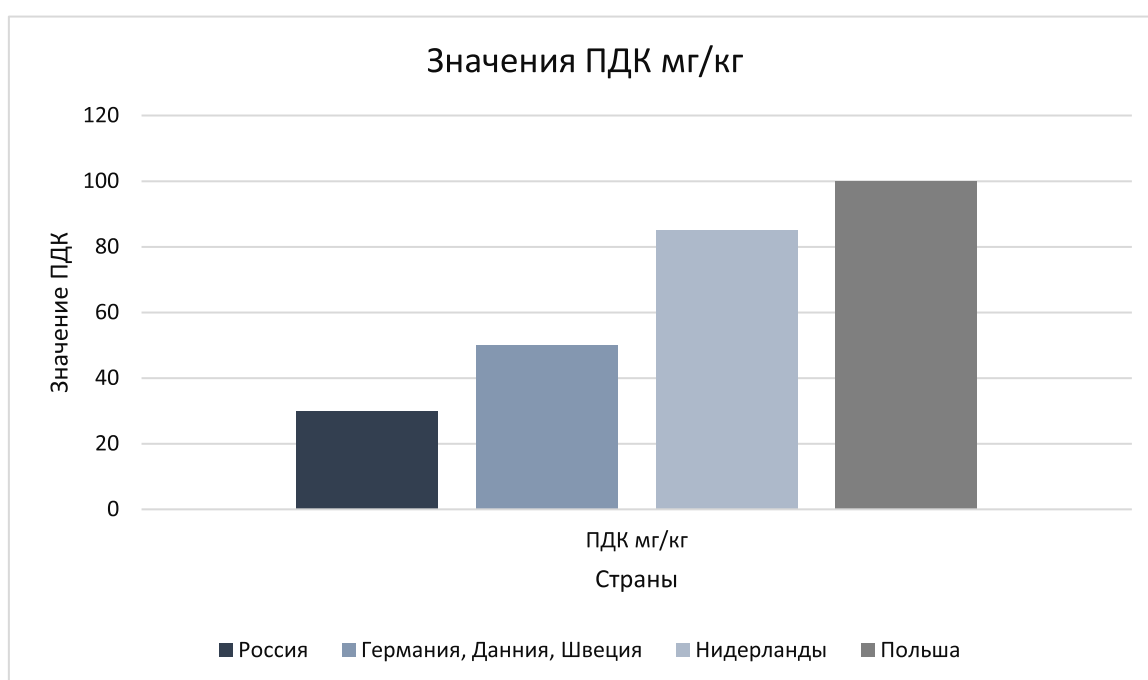
Разработка экологических индикаторов для городского подземного пространства должна базироваться на основных задачах — обеспечении достоверной информации о состоянии окружающей среды в подземной части города и оценке воздействия человеческой деятельности. Такие показатели позволяют выявлять новые экологические проблемы, контролировать эффективность реализуемых мер и планировать мероприятия по повышению экологической устойчивости городских подземных систем.

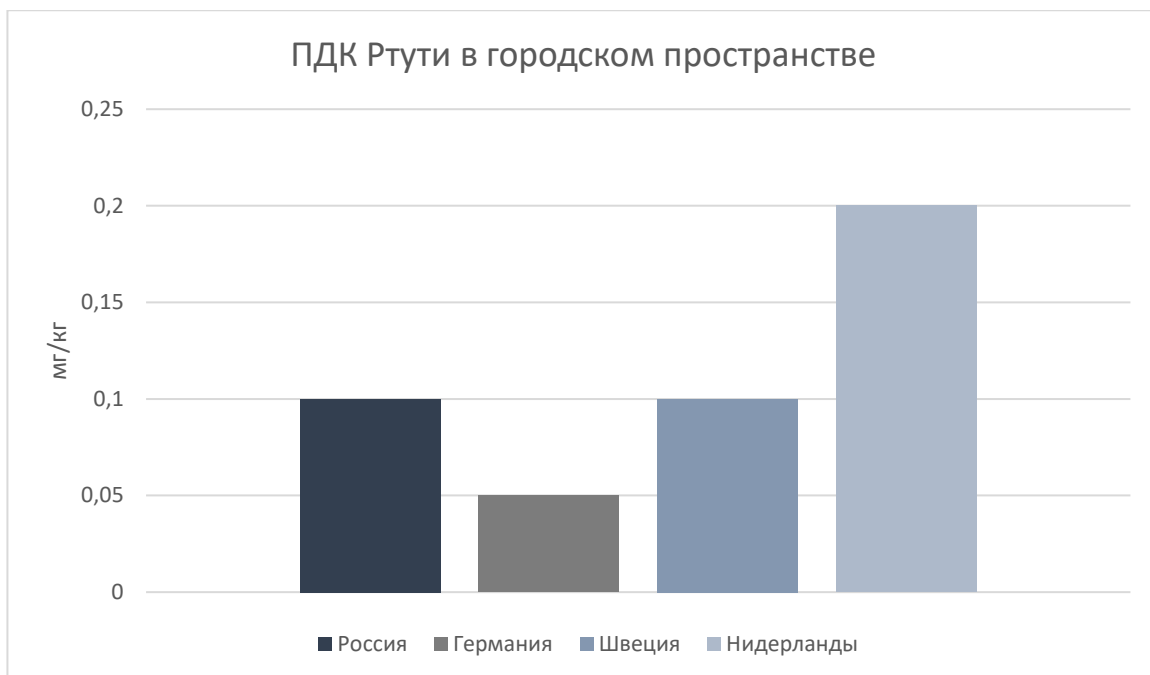
При этом рекомендуется учитывать направления, выделенные в целях устойчивого развития ООН, для интеграции местных данных в глобальный контекст и повышения универсальности мониторинга.

Первым важным показателем является состояние грунтового покрова подземных сооружений. Это включает уровень загрязнения грунтов тяжелыми металлами, химическими веществами и радионуклидами, уровень уплотнения грунта, а также степень его деградации. Показатель состояния грунтового покрова подземных сооружений представляет собой комплексную характеристику, отражающую качество почвы и её экологический статус. В структуру этого показателя входят такие компоненты, как уровень загрязнения тяжелыми металлами и химическими веществами, степень радиационного загрязнения, характеристики уплотнения грунта и степень его деградации.

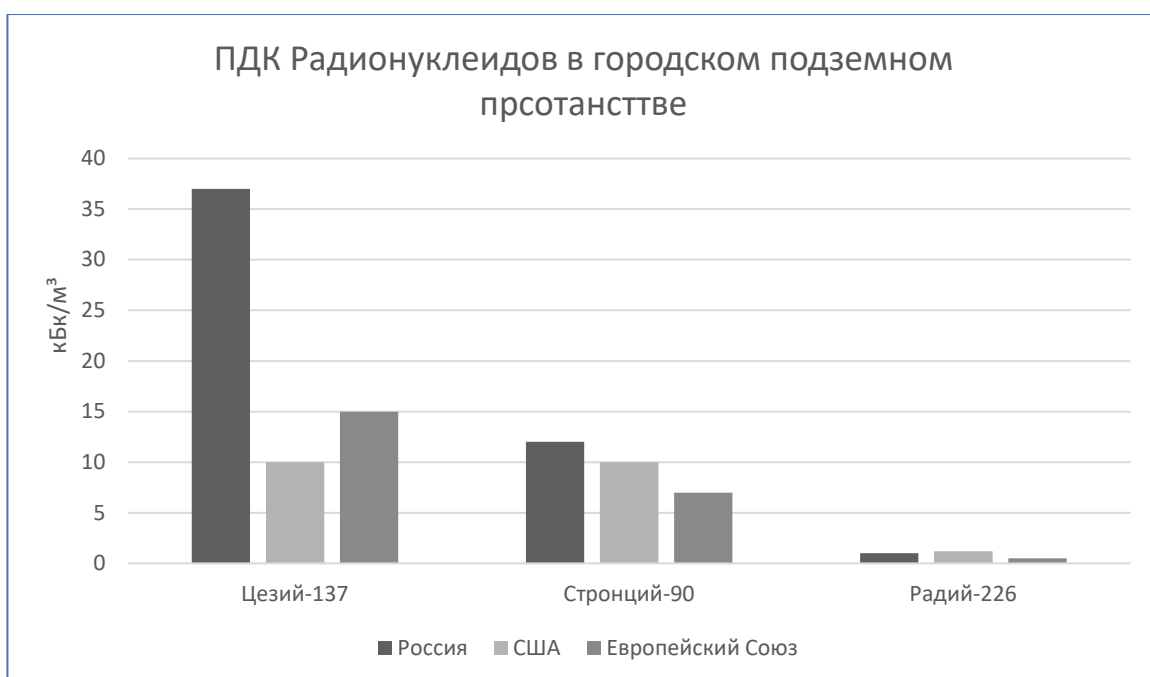
Оценка загрязненности грунтов основывается на концентрациях опасных веществ, таких как свинец, кадмий, ртуть, мышьяк, никель и хром, а также на содержании органических соединений, включая полициклические

ароматические углеводороды и нефтепродукты. Эти показатели сравниваются с нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК), установленными в национальных и международных стандартах. Например, для свинца допустимый уровень в грунтах составляет порядка 32–100 мг/кг в зависимости от типа территории — жилой или промышленной. Для кадмия и ртути этот показатель ниже и примерно равен 0.1-1 мг/кг. Превышение этих значений указывает на наличие в грунте опасных загрязняющих веществ, что создаёт риск для здоровья населения и негативно сказывается на состоянии подземных сооружений.





Не менее важным аспектом является радиационный фон в грунте. Он оценивается по содержанию природных и антропогенных радионуклидов, таких как уран, торий и Cs-137. Согласно нормам радиационной безопасности, фоновый уровень радиации не должен превышать 0,3 мкЗв/ч на поверхности. В случае превышения допустимых уровней необходимо применять меры по ограничению доступа и реабилитации территории, поскольку повышенные радиационные показатели могут представлять опасность для здоровья и окружающей среды.

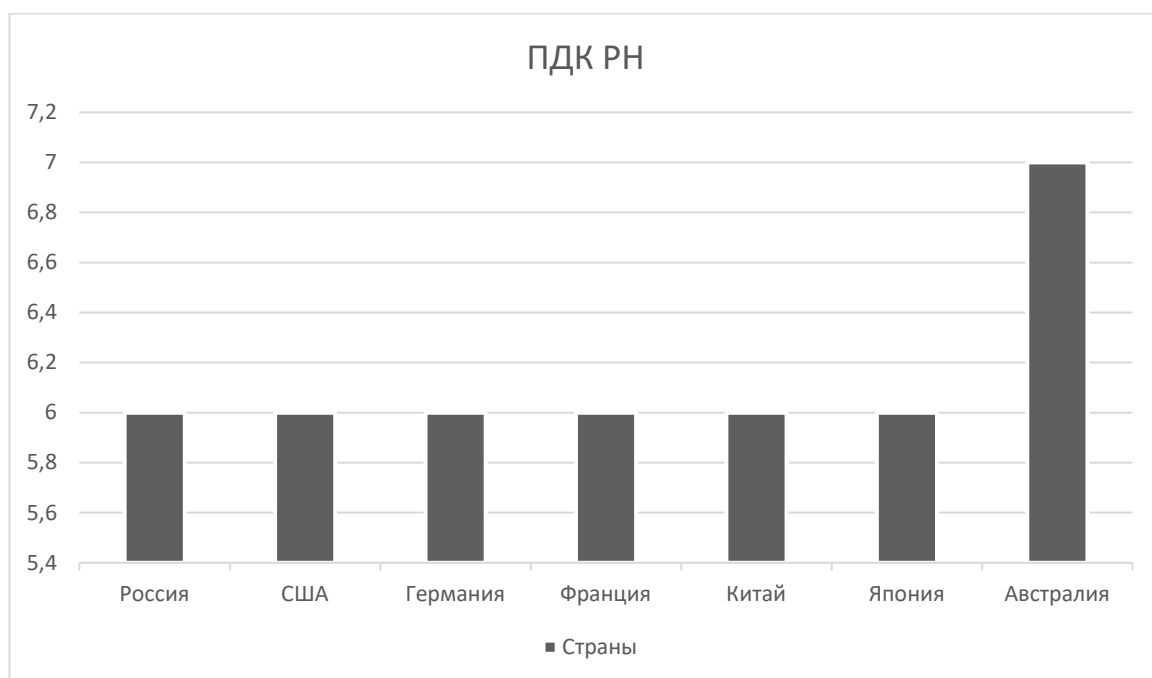


Также важным компонентом является степень уплотнения грунта, которая влияет на гидрогеологические свойства почвы, её проницаемость, устойчивость к механическим нагрузкам и газообмен. Избыточное уплотнение, вызванное деятельностью строительных и транспортных объектов, ведет к ухудшению экологических функций почвы — снижению биологической активности и увеличению риска просадок или деформаций подземных сооружений. Для оценки этого параметра используют показатели плотности грунта и его пористости, при этом предпочтительно, чтобы значения плотности оставались в пределах естественных для данного типа грунта, поскольку отклонения свидетельствуют о деградации почвы вследствие антропогенного воздействия.

1. Нормативные значения:
2. Плотность для различных типов грунта например:
3. Песок: 1500 - 2000 кг/м³
4. Глина: 1500 - 2200 кг/м³
5. Супесь: 1400 - 2100 кг/м³

Последним компонентом является степень деградации грунта, которая проявляется в эрозии, размыве химического состава, утрате плодородия и уменьшении биологической активности. Мониторинг этого параметра включает анализ физического состояния почвы — структуры и влажности, химического баланса — уровня pH и содержания органических веществ, а также микробиологических показателей — наличия микроорганизмов и корневых систем. Значительные изменения по сравнению с нормативными эталонами свидетельствуют о деградации грунта и необходимости проведения мер по его восстановлению. Таким образом, комплексная оценка состояния грунтового покрова в подземных системах позволяет своевременно выявлять

экологические риски, управлять их последствиями и обеспечивать безопасность эксплуатации подземных объектов в условиях городской среды.



Второй ключевой индикатор экологического состояния городского подземного пространства — это состояние эксплуатационной инфраструктуры подземных сооружений и качество подземных вод. Данный показатель отражает техническое и экологическое состояние инженерных систем, а также уровень воздействия подземных конструкций на гидрологические условия и окружающую среду.

Составляющими этого индикатора являются уровень повреждений и износа подземных сооружений, наличие протечек и подтоплений, а также качество подземных водных ресурсов. Оценка состояния конструкций включает анализ физического износа элементов туннелей, канализационных систем, коммуникаций и других подземных объектов, выявление трещин, деформаций, коррозии и других дефектов, которые могут привести к нарушению герметичности и безопасности сооружений. Высокий уровень повреждений увеличивает риск аварий и может приводить к негативным

экологическим последствиям, таким как утечка загрязняющих веществ в грунт и подземные воды.

Особое внимание уделяется выявлению и контролю протечек и подтоплений внутри подземных систем. Постоянное или периодическое проникновение воды может вызывать ускоренный износ конструкций, формирование коррозионных процессов, а также служить источником распространения загрязнений. Протечки часто становятся причиной ухудшения микроклимата в подземных помещениях, способствуют развитию плесени и другим биологическим поражениям, что в конечном итоге снижает безопасность и комфорт использования инфраструктуры.

Качество подземных водных ресурсов рассматривается с точки зрения содержания в них растворённых веществ, микроорганизмов, химических загрязнителей и физико-химических показателей, таких как показатель pH, жёсткость воды, содержание металлов и органических веществ. Загрязнение подземных вод может возникать как вследствие проникновения сточных вод через дефекты в инженерных системах, так и в результате более широкого антропогенного воздействия. Мониторинг качества подземных вод жизненно важен для предотвращения распространения загрязнений в водоносные горизонты, поддержания здоровья городской экосистемы и обеспечения питьевого водоснабжения.

Таким образом, комплексный анализ состояния эксплуатационной инфраструктуры и качества подземных вод позволяет не только оценить экологические риски, связанные с функционированием подземных объектов, но и своевременно выявлять и предотвращать потенциальные аварии. Это способствует снижению негативных воздействий на окружающую среду,

обеспечению безопасности жителей и рациональному управлению городским подземным пространством.

Третий важный экологический индикатор городского подземного пространства — уровень гидрологического баланса и водного режима подземных зон. Этот показатель отражает состояние водных процессов, протекающих в грунте и подпочвенных слоях, а также их влияние на устойчивость и безопасность подземных сооружений и окружающей среды.

Основными составляющими данного индикатора являются уровень водонасыщенности грунтов, объемы подъема и спада уровней подпочвенных вод, показатели деградации водных ресурсов, а также наличие случаев затоплений или дефицита воды. Уровень водонасыщенности оценивает степень насыщения грунта водой, что напрямую влияет на прочностные характеристики почв, их способность к фильтрации и устойчивость к деформации. Изменения в этом параметре могут служить индикаторами нарушения естественных гидрологических процессов вследствие антропогенного вмешательства.

Объем подъема и спада подпочвенных вод демонстрирует динамику колебаний уровня подземных вод, которая зависит от сезонных и технологических факторов. Значительные колебания могут приводить к появлению зон подтопления или, наоборот, к снижению водонасыщенности, что негативно сказывается на техническом состоянии подземных сооружений и окружающей экосистемы.

Мониторинг деградации водных ресурсов включает оценку химического состава, минерализации и загрязнения подпочвенных вод. Повышение концентраций солей, токсичных элементов или органических загрязнителей свидетельствует о процессе деградации, что требует принятия мер по предотвращению дальнейшего ухудшения качества воды и восстановлению гидрологического баланса.

Этот параметр показывает объем воды, содержащийся в грунте, относительно общего объема грунта. Например, если водонасыщенность составляет $0,2 \text{ м}^3/\text{м}^3$, это означает, что в одном кубическом метре грунта содержится 0,2 кубических метра воды, что эквивалентно 20%. Измеряется в м^3 воды на м^3 грунта ($\text{м}^3/\text{м}^3$) или проценты (%).

Также важным аспектом является выявление случаев затоплений и дефицита воды. Затопления подземных пространств могут вызывать ослабление инженерных конструкций, увеличивать риск аварий и ухудшать эксплуатационные условия, тогда как дефицит воды негативно влияет на устойчивость грунтов и биологические процессы в почве. Контроль этих факторов позволяет своевременно управлять рисками, планировать защитные мероприятия и снижать вероятность экологических и технических катастроф.

Таким образом, комплексный анализ гидрологического баланса и водного режима подземных пространств играет ключевую роль в обеспечении экологической устойчивости и безопасности городского подземного пространства, способствует эффективному управлению водными ресурсами и поддержанию благоприятных условий эксплуатации подземных сооружений.

Четвёртый важный экологический индикатор, характеризующий состояние городского подземного пространства, — это объём и качество

отходов, образующихся в подземных зонах. Этот показатель отражает как количество, так и состав различных видов отходов, связанных с деятельностью в подземных сооружениях, и является ключевым для оценки экологических рисков, связанных с их накоплением и обращением.

В составе данного индикатора учитываются отходы, образующиеся в ходе строительных, ремонтных и эксплуатационных работ в подземных пространствах, включая строительный мусор, остатки материалов, а также технологические отходы, возникающие при функционировании инфраструктуры. Особое внимание уделяется выявлению присутствия загрязнённых или опасных материалов, таких как химические вещества, асбест, токсичные промышленно-химические соединения и прочие компоненты, способные нанести вред почве, подземным водам и экосистеме в целом.

Мониторинг объёма отходов обеспечивает контроль за масштабами накопления и тенденциями их генерации, что позволяет планировать организацию их сбора, хранения, переработки и утилизации, а также предусматривать мероприятия по минимизации образования отходов. Контроль качества отходов и их состава — важный аспект предупреждения распространения токсичных и опасных веществ в подземном пространстве, поскольку нарушения требований к обращению с такими материалами могут привести к загрязнению грунтов и подземных вод, создавая серьёзные экологические и санитарные проблемы.

Регулярный и систематический мониторинг объёма и качества отходов способствует повышению эффективности экологического менеджмента в городской среде, позволяет оперативно выявлять нарушения в обращении с

отходами и предотвращать негативные последствия. Таким образом, данный индикатор является неотъемлемой частью комплексной системы управления экологической безопасностью подземного пространства, способствуя сохранению благоприятных условий для устойчивого развития городской инфраструктуры.

Пятый важный индикатор — количество и состояние зеленых и биологических элементов в подземных зонах, таких как растения, биоценозы, микроорганизмы. Эти показатели помогают оценить экологический статус биологического состава и уровень биофильтрации или самоочищения почвенно-грунтовых слоев.

Пятый важный экологический индикатор, характеризующий состояние городского подземного пространства, — это количество и состояние зелёных и биологических элементов, присутствующих в подземных зонах. К этой группе относятся растительные организмы, биоценозы и микроорганизмы, которые играют ключевую роль в поддержании экологического баланса и обеспечении природных процессов самоочищения и биофильтрации в почвенно-грунтовых слоях.

Оценка данного показателя включает определение биологического разнообразия, плотности и здоровья растительных сообществ, а также анализ состояния микроорганизмов и других компонентов биоценозов, обитающих в подземной среде. Растения и микроорганизмы выполняют важные функции — они способствуют разложению органических веществ, биodeградации загрязнителей и поддержанию структуры почвы, что напрямую влияет на качество грунта и подземных вод. Наличие богатых и сбалансированных биоценозов свидетельствует о высоком экологическом статусе подземных зон и наличии эффективных природных механизмов очистки и стабилизации среды.

Особое внимание уделяется уровню биофильтрации — способности биологических компонентов почвенно-грунтового комплекса поглощать и нейтрализовать различные загрязнители, включая тяжелые металлы, органические соединения и другие токсичные вещества. Высокий уровень биофильтрации повышает экологическую устойчивость подземных систем и снижает риски накопления вредных веществ, улучшая качество почвы и подземных вод.

Регулярный мониторинг количества и состояния биологических элементов позволяет выявлять негативные тенденции, связанные с утратой биоразнообразия или нарушением экологических функций почвы, что может служить индикатором деградации подземных экосистем. Данные исследования являются основой для принятия управленческих решений, направленных на восстановление и поддержание биологического баланса в городском подземном пространстве.

Таким образом, учет и анализ биологического состава и функционального состояния зелёных и микробиологических компонентов подземных зон играет ключевую роль в комплексной оценке экологического состояния, способствует сохранению природных механизмов самоочищения и обеспечивает устойчивость городской экологической среды

Эти показатели в совокупности позволяют получить системное представление о состоянии экологической безопасности подземных систем города и эффективности предпринимаемых мер. Хорошо настроенный мониторинг поможет выявлять токсичные или опасные загрязнения, оценивать риски возникновения аварий и предотвращать экологические кризисы.

Выводы

По результатам анализа была подтверждена гипотеза, что экологические индикаторы для городского подземного пространства имеют критическое значение для обеспечения устойчивого развития городской инфраструктуры. Эти индикаторы позволяют не только оценить текущее состояние окружающей среды в подземной части городов, но и выявлять новые экологические проблемы, возникающие в результате человеческой деятельности. Это является основополагающим для создания научно обоснованных и эффективных стратегий управления экосистемами.

Экологические индикаторы играют ключевую роль в систематическом мониторинге состояния подземного пространства. Они обеспечивают возможность контролировать эффективность реализуемых мероприятий по улучшению экологической ситуации и планировать новые действия, направленные на повышение устойчивости городских подземных систем. Систематический анализ получаемых данных позволяет оперативно выявлять негативные изменения и соответствующим образом корректировать принимаемые решения.

В связи с необходимостью интеграции местных данных в глобальный контекст рекомендуется учитывать направления, выделенные в целях устойчивого развития ООН. Это позволит повысить универсальность мониторинга и обеспечить соответствие местных экологических стратегий международным стандартам. Такой подход способствует более эффективному обмену знаниями и технологиями между городами и регионами, а также увеличивает шансы на успешную реализацию мероприятий по охране окружающей среды.

Одним из центральных индикаторов состояния экологической ситуации является состояние грунтового покрова подземных сооружений. Данный

индикатор непосредственно влияет на качество жизни в городской среде, так как уровень загрязнения грунтов тяжелыми металлами и химическими веществами имеет критическое значение для здоровья населения. Регулярный анализ загрязненности грунтов на наличие опасных веществ и радионуклидов является обязательным условием для поддержания экологического баланса в городах.

Оценка загрязненности грунтов осуществляется на основе концентраций таких опасных веществ, как свинец, кадмий, ртуть и другие токсичные соединения, а также радиационного фона. Превышение предельно допустимых концентраций указывает на необходимость немедленного принятия мер по защите здоровья населения и сохранению экологического равновесия. Важно выработать четкие критерии и системы оповещения при превышении установленных норм, что позволит снизить риски для здоровья людей и негативные последствия для экосистем.

Учитывая существующие угрозы, связанные с загрязнением подземного пространства, регулярный мониторинг состояния грунтового покрова и уровней радиации становится неотъемлемой частью экологического управления. Систематический контроль позволяет своевременно выявлять и устранять потенциальные экологические риски, что, в свою очередь, существенно улучшает качество жизни в городских условиях.

На основе анализа экологических индикаторов были разработаны рекомендации по улучшению экологической безопасности подземных территорий. Эти рекомендации включают меры по очистке и реабилитации загрязненных земель, направленных на снижение негативного воздействия на окружающую среду. Важно обеспечить взаимодействие между государственными органами, научными учреждениями и бизнесом для

реализации комплексных мероприятий, направленных на поддержку экологической устойчивости городских подземных экосистем.

Таким образом, создание системы экологических индикаторов для городского подземного пространства является необходимым шагом для обеспечения устойчивого развития городской инфраструктуры и улучшения качества жизни населения.

Список используемой литературы

1. Умнов В.А. Экономическая оценка и рациональное использование ресурсов подземного пространства. - М.: МГГУ, 1999.- 204 с.
2. Рудяк М.С. Рациональное использование городского подземного пространства для гражданских объектов. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2003. - 235 с.
3. Глозман, О. С. Градостроительные основы формирования подземных пространств / О. С. Глозман. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Мир науки", 2017. – 196 с. – ISBN 978-5-9500228-4-5. – EDN UTOUVY.
4. Заиканов В. Г., Минакова Т. Б., Булдакова Е. В., Сависько И. С. Индексы и индикаторы геоэкологической безопасности урбанизированных территорий // Вестник Томского государственного университета. Геология и геофизика. — 2019. — Т. 418, № 2. — С. 65–75. — DOI: 10.17223/2410921X/418/5.
5. Бера Б., Чинта С., Махаджан Д. А., Сайладжа А., Махаджан Р. Urbanization and Its Impact on Environmental Sustainability: A Comprehensive Review // Harbin Gongcheng Daxue Xuebao (Journal of Harbin Engineering University). — 2023. — August.
6. ГОСТ 17.4.3.01-83. Охрана природы. Почвы. Общие требования к проведению оценки состояния почвы. — М.: Издательство стандартов, 1983. — 36 с.
7. Роспотребнадзор. ПДК химических веществ в окружающей среде. [Электронный ресурс]. — URL: <https://rospotrebнадzor.ru> (дата обращения: 25.03.2023).
8. Санитарные правила и нормы (СанПиН) "Гигиенические требования к содержанию свинца в почвах". — М.: Роспотребнадзор, 2011. — 25 с.