

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ РЕГИОНАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ (НА ПРИМЕРЕ ПРОБЛЕМЫ ПОДТОПЛЕНИЙ В ГОРОДЕ РОСТОВЕ-НА-ДОНУ)

Куликов М. М.^{1*}, Тартанов К. В.¹

¹ Южно-Российский государственный политехнический
университет (НПИ) имени М. И. Платова,

Новочеркасск, Россия

* kulikovmichael@yandex.ru

Аннотация. *Введение.* В статье проводится анализ локальных подтоплений и оценка эффективности систем водоотведения в г. Ростове-на-Дону, отражена необходимость разработки муниципальными образованиями стратегических планов противодействия подтоплениям с учетом прогнозируемых рисков. При этом необходимо разработать как инженерно-технические решения, так и мероприятия организационного характера, нацеленные на предупреждение чрезвычайных ситуаций. *Материалы и методы.* Методологическую основу исследования составляют системный подход и метод аналогий, позволяющие рассматривать создание цифровых моделей городов (ЦМГ) как развивающуюся систему в контексте управления инфраструктурой региона. Применены также сравнительный и контент-анализ практики и научных источников. *Результаты исследования.* Проведенный анализ показал, что управление инфраструктурой городов в контексте предотвращения чрезвычайных ситуаций и оптимизации затрат на ее поддержание в условиях цифровизации характеризуется недостаточным уровнем использования новых технологических инструментов, включая цифровое моделирование городов. Основными этапами внедрения ЦМГ является создание 3D-моделей с аналитическими слоями, использование ИИ, применение созданных моделей в управлении решением проблем региональной инфраструктуры. Поток информации о состоянии городской инфраструктуры идет от городских служб в ЦМГ, там данные обрабатываются, предлагается вариант решения, который передается в центр принятия решений, а затем реализуется на городском уровне для решения проблемы. Ключевые технологии и программное обеспечение, используемые для создания цифровых моделей городов: географические информационные системы (ГИС), информационное моделирование зданий (BIM), технологии LiDAR и аэрофотосъемка, специализированное ПО для 3D-моделирования, информационное моделирование города (CIM). Основные группы специалистов, их роль в проекте создания цифровой модели города – это разработчики ПО, эксперты по IoT, аналитики данных, специалисты по визуализации, градостроители, команда по управлению проектом, специалисты по устойчивому развитию, юридические эксперты, эксперты по безопасности, специалисты по UX/UI, социальные исследователи, инженеры по системам автоматизации. Использование цифровых моделей городов возможно для развития зеленой инфраструктуры и управления климатическими рисками в регионах. *Обсуждение и заключение.* Внедрение цифровой модели города для управления системой водоотведения в Ростове-на-Дону обуславливает серьезное продвижение вперед в управлении региональной инфраструктурой, что позволит городу эффективно справляться с природными вызовами. Установлено, что комплексный подход, включающий моделирование, оптимизацию существующих систем и проектирование новых решений, обеспечит защиту городских территорий от негативного влияния климатических факторов. Обосновано, что несмотря на

достаточно высокий объем инвестиций, необходимых для разработки и актуализации ЦМГ, величина предотвращенного ущерба от внедрения цифровых моделейкратно превышает эти затраты, а срок окупаемости составляет 1-5 лет в зависимости от города и особенностей модели. Для ЦМГ Ростова-на-Дону срок окупаемости модели составляет три года. Показано, что ЦМГ Ростова-на-Дону сможет стать примером модели умного и устойчивого города, готового к различным природным вызовам. Показано, что разработанная цифровая модель города может применяться для мониторинга и управления инфраструктурой в других городах и регионах России.

Ключевые слова: цифровая модель, подтопления, водоотведение, геоинформационные технологии (ГИС), предиктивное моделирование, экономическое моделирование, оптимизация.

Для цитирования: Куликов М. М., Тартанов К. В. Цифровая модель как инструмент решения проблем региональной инфраструктуры (на примере проблемы подтоплений в городе Ростове-на-Дону). *Вестник Ростовского государственного экономического университета (РИНХ)*. 2025;2(32):46-66. doi: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.90.2.004.

Research article

JEL R11 C63 R58

DIGITAL TWIN TECHNOLOGY AS A TOOL FOR ADDRESSING REGIONAL INFRASTRUCTURE CHALLENGES: A CASE STUDY OF URBAN FLOODING IN ROSTOV-ON-DON

Kulikov M.^{1*}, Tartanov K.¹

¹ *South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. Platov, Russia, Novocherkassk*

* *kulikovmichael@yandex.ru*

Abstract. *Introduction.* The article analyzes local flooding and assesses the effectiveness of drainage systems in Rostov-on-Don, reflects the need for municipalities to develop strategic plans to combat flooding, taking into account the predicted risks. At the same time, it is necessary to develop both engineering and technical solutions and organizational measures aimed at preventing emergency situations. *Materials and methods.* The methodological basis of the study is a systems approach and the method of analogies, which allow us to consider the creation of digital city models (DCM) as a developing system in the context of regional infrastructure management. Comparative and content analysis of practice and scientific sources are also used. *Research results.* The analysis showed that urban infrastructure management in the context of emergency prevention and cost optimization for its maintenance in the context of digitalization is characterized by an insufficient level of use of new technological tools, including digital city modeling. The main stages of DCM implementation are the creation of 3D-models with analytical layers, the use of AI, and the application of the created models in managing the solution of regional infrastructure problems. The flow of information about the state of the urban infrastructure comes from city services to the CMG, where the data is processed, and a solution is proposed, which is transferred to the decision-making center, and then implemented at the city level to solve the problem. Key technologies and software used to create digital models of cities: geographic information systems (GIS), building information modeling (BIM), LiDAR technologies and aerial photography, specialized software for 3D-modeling, city information modeling (CIM). The main groups of specialists, their role in the project of creating a digital model of the

city are software developers, IoT experts, data analysts, visualization specialists, urban planners, project management team, sustainable development specialists, legal experts, security experts, UX/UI specialists, social researchers, automation engineers. The use of digital models of cities is possible for the development of green infrastructure and climate risk management in the regions. *Discussion and conclusion.* The implementation of a digital city model for managing the wastewater disposal system in Rostov-on-Don determines a significant advance in the management of regional infrastructure, which will allow the city to effectively cope with natural challenges. It has been established that an integrated approach, including modeling, optimization of existing systems and design of new solutions, will ensure the protection of urban areas from the negative impact of climatic factors. It has been substantiated that despite the fairly high volume of investments required to develop and update the digital city model, the amount of damage prevented from the implementation of digital models is many times higher than these costs, and the payback period is 1-5 years depending on the city and the features of the model; for the digital city model of Rostov-on-Don, the payback period of the model is 3 years. It has been shown that the digital city model of Rostov-on-Don can become an example of a smart and sustainable city model ready for various natural challenges. It has been shown that the developed digital city model can be used to monitor and manage infrastructure in other cities and regions of Russia.

Keywords: digital model, flooding, water drainage, geoinformation technologies (GIS), predictive modeling, economic modeling, optimization

For citation: Kulikov M., Tartanov K. Digital twin technology as a tool for addressing regional infrastructure challenges: a case study of urban flooding in Rostov-on-Don. *Vestnik of Rostov State University of Economics (RINH)*. 2025;2(32):46-66. doi: 10.54220/v.rsue.1991-0533.2025.90.2.004.

Введение

Проблематика локальных подтоплений и недостаточной эффективности систем водоотведения в российских городах, включая Ростов-на-Дону, представляет собой одну из ключевых задач в сфере управления городской средой. С нарастанием темпов урбанизации и изменениями климатического характера наблюдается усиление гидрологической нагрузки на инфраструктуру, что обуславливает рост числа критических ситуаций, сопряженных с нарушением функционирования инженерных систем, ухудшением условий проживания населения и нанесением ущерба городскому хозяйству.

На сегодняшний день органы местного самоуправления предпринимают ряд оперативных мер, направленных на устранение последствий экстремальных осадков. В частности, организуются специализированные штабы, координирующие мероприятия по аварийной откачке воды и восстановлению транспортной до-

ступности. Одновременно ведется аналитическая и проектная работа, направленная на формирование устойчивой модели водоотведения, способной адаптироваться к изменяющимся природно-климатическим и антропогенным условиям. С учетом высокой метеозависимости региона губернатором Ростовской области были инициированы действия по разработке муниципальными образованиями стратегических планов противодействия подтоплениям с учетом прогнозируемых рисков. Указанные документы должны включать как инженерно-технические решения, так и мероприятия организационного характера, нацеленные на предупреждение чрезвычайных ситуаций.

Анализ текущей ситуации в Ростове-на-Дону показывает, что уязвимость городской территории к паводковым явлениям во многом обусловлена не только естественно-географическими особенностями, включая сложный рельеф и водную насыщенность отдельных участков, но и последствиями несбалансированной

застройки, несоответствующего выбора строительных материалов и устаревания сетей водоотведения. Неэффективное пространственное планирование в совокупности с низкой водопроницаемостью современных покрытий приводит к увеличению поверхностного стока и перегрузке дренажной инфраструктуры.

В этом контексте становится актуальным применение инновационных решений, опирающихся на потенциал цифровизации. Использование геоинформационных систем (ГИС), методов гидравлического моделирования и концепций умного города (Smart City) предоставляет возможности для повышения точности прогнозирования, оптимизации проектных решений и комплексного управления водными потоками на урбанизированных территориях.

Материалы и методы

В рамках настоящего исследования был проведен обзор отечественной и зарубежной практики в области адаптивного управления ливневыми и паводковыми рисками. Результаты анализа позволили установить, что внедрение технологий пространственного анализа, сенсорного мониторинга и интеллектуального регулирования способно значительно повысить устойчивость городской среды к гидрометеорологическим угрозам.

Предлагаемая в статье концепция предусматривает интеграцию инженерных, цифровых и управленческих решений, ориентированных на минимизацию негативных последствий подтоплений, повышение надежности городской инфраструктуры и обеспечение комфортной жизнедеятельности населения в условиях возрастающей климатической изменчивости.

Результаты исследования

Анализ существующих проблем Ростова-на-Дону

Ростов-на-Дону сталкивается с множеством вызовов, связанных с изменениями климатических условий, ростом интенсивности застройки и недостаточ-

ной модернизацией существующих инженерных систем.

В последние годы подтопления в различных районах города стали происходить по многочисленным причинам. Одной из ключевых причин является отсутствие детальной вертикальной планировки, приводящее к неэффективной организации рельефа и, как следствие, ухудшению естественного водоотведения. Это усугубляется увеличением застройки вблизи водоразделов, что препятствует привычным путям стока и создает новые сложности в регулировании водных потоков.

Исследования показывают, что новые здания часто возводятся без учета особенностей местного рельефа, что приводит к скоплению воды на участках, которые ранее выполняли роль естественных дренажных систем. Например, имея данные о том, что глубина залегания грунтовых вод на некоторых участках Ростовской агломерации поднялась до 20 метров, можно утверждать, что в условиях активной застройки ситуация будет только ухудшаться. И уже в 2023 г. средний уровень грунтовых вод составил 11,97 метров ниже поверхности земли, а максимальный уровень грунтовых вод был зафиксирован на уровне 10,56 метров, график представлен на рисунке 1. Ситуация также усугубляется нарушением баланса открытых и закрытых пространств. Строительные материалы с низкой проницаемостью снижают возможности естественного стока, что приводит к образованию временных водоемов даже в случае незначительных осадков [1]. В декабре 2023 г. осадки в Ростове составили более 64 мм при норме 58 мм, а в январе 2024 г. – 120 мм, что составляет 207 % от нормы, график сравнения фактических и нормативных осадков представлен на рисунке 2. Ростов-на-Дону имеет среднегодовую сумму осадков около 618 мм. Осадки распределены неравномерно: максимум приходится на декабрь, минимум – на октябрь [2].



Рисунок 1 – Уровень грунтовых вод в 2023 г.

Figure 1 – Groundwater level in 2023

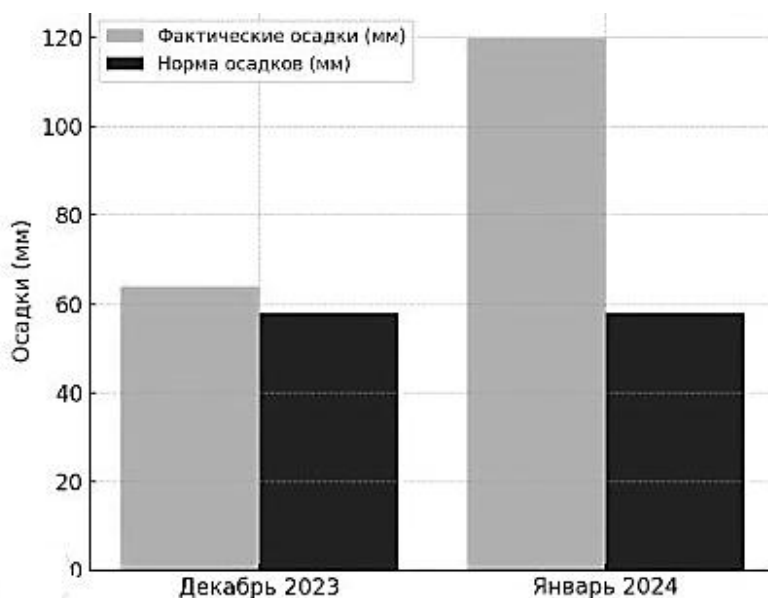


Рисунок 2 – Сравнение фактических и нормативных осадков

Figure 2 – Comparison of actual and normative precipitation

Критической проблемой является также нехватка актуальных данных о состоянии грунтовых вод и действующих систем водоотведения. Гидрогеология Ростовской агломерации была относительно хорошо изучена лишь до 1990-х гг. На сегодняшний день в Ростове функционирует только один пункт наблюдения за подземными водами на улице Зоологическая 26Б (район ростовского зоопарка), он состоит из двух скважин, только одна из которых оборудована для наблюдения за

грунтовыми водами, а вся система мониторинга подземных вод в Ростовской области состоит всего из 52 наблюдательных пунктов [3].

Искусственные преграды, такие как запруды и засыпка устьев балок, могут создавать серьезные проблемы. Примером этого является ситуация с Калмыцкой балкой в Ростовской области, где вмешательство в природные условия привело к катастрофическим последствиям.

В ноябре 2023 г. жители поселка Ленинаван, расположенного вдоль Калмыцкой балки и реки Сухой Чалтырь, столкнулись с серьезным подтоплением. Уровень воды поднялся до 60 см, затопив подвалы и коммуникации. Одной из при-

чин подтопления стали обильные осадки: в 2022 г. количество выпавших осадков превысило климатическую норму почти на 50 %. Сравнение фактических осадков и климатической нормы в Ростове-на-Дону в 2022 г. представлено на рисунке 3.

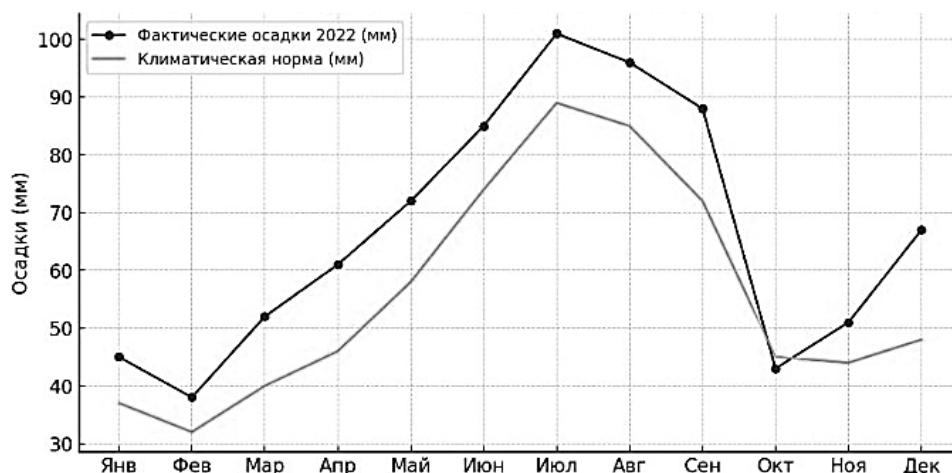


Рисунок 3 – Сравнение фактических осадков и климатической нормы в Ростове-на-Дону в 2022 г.

Figure 3 – Comparison of actual precipitation and climatic norm in Rostov-on-Don in 2022

Ключевым фактором стало нарушение естественного водоотведения из-за незаконных застроек, нарушивших требования земельного и водного законодательства, что привело к засыпке части Калмыцкой балки. Это вмешательство в природный ландшафт нарушило естественные пути стока воды, что в сочетании с повышенным уровнем осадков привело к затоплению территорий.

Для предотвращения дальнейших подтоплений администрация Мясниковского района рассматривает возможность согласования точки сброса сточных вод из централизованной системы водоотведения с территории садоводческих некоммерческих товариществ (СНТ) «Выраж» и «Братство» в Калмыцкую балку. Это решение направлено на восстановление естественного водоотведения и предотвращение подобных ситуаций в будущем.

Данный случай подчеркивает важность сохранения естественных дренаж-

ных систем и осторожного подхода к градостроительным решениям, особенно в районах с повышенным риском подтоплений [3, 4, 5].

Решение проблем с водоотведением и подтоплением подразумевает комплексную стратегию: улучшение существующей инфраструктуры, регулярное обслуживание и очистка водостоков, а также интеграция зеленых технологий. На сегодняшний момент администрация города использует только традиционные способы для уменьшения разрушительных последствий, но это, к сожалению, не меняет ситуацию в целом. Например, планируется построить канал протяженностью более 500 метров, закуплено 11 новых насосов для улучшения водоотведения [6, 7].

Издержки на восстановление поврежденной инфраструктуры и убытки частных предприятий ощутимо сказываются на экономике города, усиливая риск социального недовольства и ставя под

угрозу дальнейший экономический рост, что можно подтвердить несложными расчетами: например, чтобы откачать 1 кубометр грунтовых вод, нужно затратить 300 рублей, а если учесть реальные объемы откачиваемой воды, то затраты только на одну проблемную зону могут превышать десятки миллионов. Ежегодно бюджет города только увеличивает расходы на противопаводковые мероприятия, на содержание и ремонт систем водопонижения, на содержание и ремонт сетей дождевой канализации и их очистных сооружений.

Использование современных технологий, таких как моделирование и прогнозирование, может указать на зоны риска и подготовить город к непредвиденным метеоусловиям. Общественные инициативы и вовлечение граждан в процесс управления зелеными зонами также играют ключевую роль в решении данной проблемы.

Применение современных технологий способствует более точной оценке ущерба и быстрому распределению ресурсов, что позволяет улучшить ситуацию с подтоплениями в Ростове-на-Дону.

Обсуждение

Анализ существующих цифровых моделей городов

Изучая отечественный и международный опыт в области городского развития, можно уверенно утверждать, что применение современных технологий способствует более точной оценке ущерба и быстрому распределению ресурсов.

Борьба с подтоплениями грунтовыми водами ведется во многих российских городах, таких как Нижний Новгород, Краснодар, Тула, Пенза и Москва. В частности, для защиты Пензы от подтопления разрабатываются общегородские схемы, которые способны объединить существующие водозащитные сооружения в единый комплекс, что значительно ускоряет восстановление городской инфраструктуры [8]. Москва как один из крупнейших мегаполисов мира активно решает проблемы градостроительства, используя современные и инновационные методы. В столице уже разработан цифровой двойник города, который основан на передовой цифровой модели.

Основные компоненты схемы работы цифрового двойника Москвы показаны в таблице 1.

Таблица 1 – Основные компоненты схемы работы цифрового двойника Москвы
Table 1 – Main components of the scheme of operation of the digital twin of Moscow

Компонент	Основные задачи	Особенности
Создание 3D-модели	Создание 3D-модели города на основе аэрофотоснимков и наземных фотографий	Используется более 16 млн аэрофотоснимков в год
Аналитические слои	Сбор и обновление данных по 5 тыс. аналитических слоев в реальном времени	Слои обновляются в реальном времени
Использование ИИ	Обработка изображений, улучшение качества фото, удаление мешающих объектов	ИИ обрабатывает изображения и накладывает их на 3D-модель
Применение в управлении	Помощь в градостроительстве, планировании и управлении городом	Цифровой двойник оптимизирует процессы управления и ЖКХ
Инструменты аналитики	Моделирование сценариев и прогнозирование последствий решений	Позволяет моделировать разные сценарии и оценивать их влияние

Это позволяет эффективно управлять городским пространством и способствует более сбалансированному развитию города. Анализируя опыт Москвы,

Владислав Полянин, кандидат географических наук, порекомендовал внедрять элементы зеленой инфраструктуры, такие как посадка трав вдоль дорог, созда-

ние кюветов с растительностью и биофильтрационных лотков, чтобы очищать ливнестоки. Эти элементы будут выполнять функцию фильтрации, а также украсят городской ландшафт, создавая дополнительные зеленые зоны, способные охладить воздух в жаркую погоду. В долгосрочной перспективе такие меры могут снизить эксплуатационные расходы от 15 до 80 % в зависимости от применяемых технологий [11].

Такое понятие, как зеленая инфраструктура, стало активно развиваться в последние десятилетия, и многие города уже используют этот принцип для улучшения городской экологии и качества жизни. Одним из первых городов, применивших элементы зеленой инфраструктуры, считается Сингапур. С помощью зеленых зон, коридоров и крыш в нем была образована уникальная экосистема, которая снизила сток дождевой воды и уменьшила нагрузку на канализационную систему, а также принесла экономическую выгоду в виде увеличения туристического потока и повышения цен на недвижимость. Проект охватывает площадь более 101 гектара и включает три основных пространства: «Сады у залива», «Облачные сады» и «Супердеревья». Концепция супердеревьев, реализованная в Сингапуре, представляет собой пример инновационного синтеза архитектурного дизайна и экологической инженерии. Эти вертикальные конструкции, достигающие высоты от 25 до 50 метров, основаны на металлических каркасах, интегрированных с растительностью. Они служат не только визуальной доминантой городской среды, но и функциональным элементом устойчивой инфраструктуры. В частности, супердеревья оборудованы системами сбора атмосферных осадков, что позволяет использовать дождевую воду для полива насаждений. Ряд конструкций дополнительно оснащен фотоэлектрическими панелями, обеспечивающими производство электроэнергии для нужд освещения и других коммунальных задач, тем самым

способствуя энергоэффективности городской экосистемы.

Примером интеграции принципов зеленой инфраструктуры в управление водными ресурсами является Копенгаген, который, сталкиваясь с возрастающей частотой и интенсивностью осадков, переосмыслил традиционные подходы к организации ливневой канализации. Практика показала, что существующая система водоотведения оказалась недостаточной при экстремальных погодных условиях. В рамках градостроительной трансформации были инициированы научные исследования, подтвердившие экономическую и экологическую эффективность внедрения таких решений, как зеленые кровли и биофильтрационные пруды. Данные элементы не только способствуют снижению нагрузки на инженерные сети, но и улучшают микроклимат, увеличивают биологическое разнообразие, а также снижают эффект «городского теплового острова».

Анализ комплексной стратегии устойчивого развития Копенгагена демонстрирует, что использование зеленой инфраструктуры в сочетании с цифровыми инструментами моделирования городской среды способствует выработке адаптивных решений, адекватных вызовам урбанизированной среды XXI в. Как Сингапур, так и Копенгаген в настоящее время активно применяют цифровые двойники (Digital Twins) и другие формы пространственного анализа для планирования и оптимизации городских экосистем. Эти города иллюстрируют высокую степень интеграции экологических и информационных технологий в городское управление [10, 11, 12, 13, 14].

Весенний паводок 2024 г. в Республике Казахстан стал крупнейшим гидрологическим событием за последние десятилетия. Его причиной стало быстрое таяние снежного покрова при наличии глубоко промерзшего грунта, что препятствовало инфильтрации талых вод. Это явление охватило ряд регионов страны, включая Костанайскую, Актюбинскую и

Западно-Казахстанскую области. На реке Урал зафиксирован подъем уровня воды до 10 метров, что превысило критическую отметку на два метра. Были эвакуированы свыше 120 тысяч человек, размещенных во временных пунктах и обеспеченных гуманитарной поддержкой. Особенно серьезной ситуация оказалась в Костанайской области, где подтоплению подверглись сотни жилых домов, а свыше 9 тысяч человек были вынуждены покинуть свои жилища. Согласно мнению ряда специалистов, подобные масштабные паводки обусловлены климатическими изменениями, провоцирующими экстремальные метеорологические условия.

В ответ на нарастающие климатические риски в 2024 г. в Казахстане началась активная цифровизация процессов управления водными угрозами. Существенным шагом в этом направлении стало внедрение автоматизированной системы Tasqyn, предназначенной для прогнозирования и моделирования паводковых процессов. Данная система позволяет оперативно рассчитывать объемы притока в водохранилища, прогнозировать параметры весеннего половодья и определять потенциальные зоны затопления. Это техническое решение стало важным инструментом в минимизации ущерба от наводнений и создании основ для формирования адаптивной модели управления гидрологическими рисками в условиях изменяющегося климата. Система интегрирована с глобальной системой оповещения о наводнениях GloFAS, что обеспечивает долгосрочные прогнозы паводков на период половодья по 135 рекам.

Национальная компания «Казахстан гарыш сапары» активно использовала спутниковые снимки для мониторинга паводков и моделирования зон затопления. Модуль Fast Flood позволял моделировать паводковую ситуацию с помощью глобальной модели и цифровой модели земной поверхности, что способствовало своевременному выявлению

потенциально опасных участков. В Северо-Казахстанской области была запущена система дронов для мониторинга паводков. Дроны совершали полеты трижды в день, собирая данные с мест, подверженных паводкам, что обеспечивало оперативное реагирование на изменения ситуации. Для сотрудников МЧС и региональных подразделений было разработано приложение Dangers, которое отображало участки с высоким риском затопления, позволяя оперативно принимать меры по предотвращению чрезвычайных ситуаций.

Интеграция цифровых технологий в систему предупреждения и ликвидации последствий паводков, осуществленная в Казахстане в 2024 г., продемонстрировала высокий потенциал современных инструментов в обеспечении проактивного управления гидрологическими рисками. Особую значимость приобрела система Tasqyn, способная не только формировать высокоточные прогнозы притока воды, но и моделировать потенциальные зоны подтопления с учетом топографических и метеорологических данных. Это обеспечило возможность заблаговременного принятия решений по эвакуации населения из уязвимых территорий, а также оперативного укрепления гидротехнических и защитных сооружений.

Значительный вклад в организацию контроля за паводковой ситуацией внесли технологии дистанционного зондирования и аэровизуализации. Спутниковый мониторинг в сочетании с применением беспилотных летательных аппаратов обеспечил непрерывное наблюдение за изменениями уровня воды и техническим состоянием гидротехнической инфраструктуры. Полученные данные позволяли экстренным службам своевременно выявлять угрозы и оперативно реагировать на критические изменения ситуации.

Дополнительным инструментом, повысившим эффективность взаимодействия между службами гражданской за-

щиты, стали мобильные программные средства, обеспечивающие передачу информации о рисках в режиме реального времени и позволяющие координировать действия различных подразделений в условиях чрезвычайной ситуации.

Паводковая ситуация весной 2024 г. в Казахстане наглядно продемонстрировала, что применение цифровых решений в управлении природными катастрофами способствует значительному повышению точности прогнозирования, скорости принятия решений и эффективности мер реагирования. Этот опыт может служить ориентиром для формирования адаптивных систем предупреждения и реагирования на стихийные бедствия в условиях нарастающей климатической нестабильности.

Использование цифровых моделей и двойников позволяет не только предсказывать паводки, но и выявлять зоны риска, что содействует более оперативному реагированию в экстренных ситуациях. Этот подход становится важным

инструментом для предотвращения разрушений и ускорения восстановительного процесса [14].

Можно сделать вывод, что в российских городах, где проблема подтопления грунтовыми водами имеет актуальное значение, в основном применяются традиционные методы для ее решения. Основные из них представлены в таблице 2. Эти методы могут комбинироваться и адаптироваться в зависимости от конкретных условий и особенностей градостроительства в каждом городе.

Следует подчеркнуть, что основной недостаток традиционных методов заключается в их недостаточной гибкости, что затрудняет быструю реакцию на изменяющиеся климатические и экологические условия. Прогнозы климатологов сообщают, что тропические ливни будут все более частым явлением в российских городах, это усугубит проблемы с грунтовыми водами, поэтому традиционные подходы должны заменяться новыми.

Таблица 2 – Традиционные подходы к решению проблем
Table 2 – Traditional approaches to problem solving

Традиционный подход	Описание	Достижимый результат	Преимущества	Недостатки
Дренажные системы	Использование каналов, труб и колодцев для отвода воды	Контроль уровня грунтовых вод, предотвращение подтоплений	Простота установки, низкая стоимость	Неэффективны при резких изменениях уровня воды
Насосные системы	Откачка воды насосами	Снижение уровня воды в подземных водоемах, минимизация риска затопления	Снижение подтоплений	Высокие эксплуатационные расходы
Гидроизоляция	Применение защитных материалов	Защита фундаментов и подвалов зданий от проникновения воды	Защита фундаментов и подвалов	Ограниченный срок службы
Ландшафтное благоустройство	Изменение уклона земли, создание водосточников	Предотвращение скопления ливневых вод на поверхности, уменьшение их просачивания в грунт	Улучшение городской среды	Зависимость от погодных условий
Контроль за застройкой	Регулирование строительства	Предотвращение строительства в зонах с высоким уровнем грунтовых вод	Снижение подтоплений	Ограничение на развитие территории

Таким образом, необходимыми мерами для борьбы с подтоплениями станут пересмотр градостроительных планов и интеграция современных методов анализа, таких как геоинформационные технологии и предиктивное моделирование. Эти усилия позволят наладить надежную координацию действий и значительно улучшат управление водными процессами. В связи с этим важнейшей задачей становится гармонизация взаимодействий между системами управления водными ресурсами, градостроительными проектами и экосистемами. Интеграция разнородных компонентов городской инфраструктуры в единую цифровую платформу – так называемую цифровую модель города – представляет собой стратегически значимый этап в совершенствовании механизмов управления городской средой.

Под цифровыми моделями городов (ЦМГ) понимаются комплексные виртуальные репрезентации урбанизированных территорий, формируемые с использованием современных информационных и коммуникационных технологий. Такие модели охватывают широкий спектр характеристик городской системы – от транспортных потоков и жилого фонда до инженерных сетей и природных объектов.

ЦМГ выполняют важную функцию в сфере пространственного планирования и управления развитием территорий. Они позволяют не только воспроизводить актуальное состояние городской среды, но и проводить прогнозные расчеты, оценивать последствия проектных решений, оптимизировать распределение ресурсов и повышать эффективность функционирования инфраструктурных систем. Особенно значимой становится роль цифровых моделей в реализации концепции умного города (Smart City), где они выступают в качестве основы для интеграции больших данных, сенсорных систем и автоматизированных алгоритмов принятия решений.

Применение ЦМГ в практике городского управления способствует формированию обоснованной и адаптивной политики в сфере развития городской территории, повышает прозрачность и координацию межведомственного взаимодействия, а также непосредственно влияет на улучшение качества жизни населения за счет повышения комфорта, безопасности и устойчивости городской среды к внутренним и внешним вызовам.

Схема взаимодействия цифровой модели городов с городом и центром принятия решений представлена на рисунке 4.

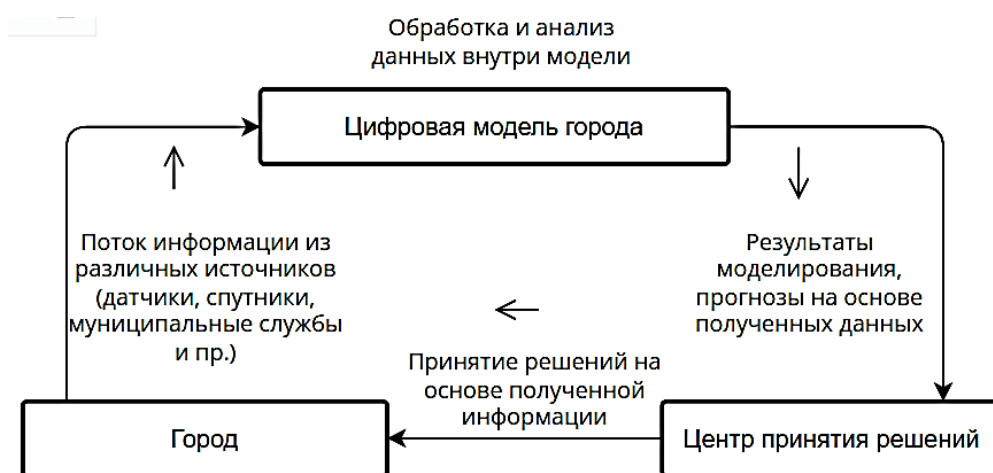


Рисунок 4 – Схема взаимодействия цифровой модели городов с городом и центром принятия решений

Figure 4 – Scheme of interaction of the digital urban model with the city and the decision-making center

Для создания цифровых моделей городов (ЦМГ) используется широкий спектр современных технологий и программных инструментов, которые позволяют максимально точно воссоздать городской ландшафт, здания, инфраструктуру и природную среду в формате 3D. Эти инструменты помогают не только визуализировать город, но и анализировать его функционирование, прогнозировать развитие и принимать обоснованные управленческие решения. Рассмотрим основные технологии и программное обеспечение, которые используются для создания цифровых моделей городов.

Одним из ключевых компонентов создания цифровых моделей городов является использование географических информационных систем (ГИС), которые предназначены для сбора, обработки и анализа геопространственных данных. ГИС позволяют работать с картографической информацией, данными о рельефе, инфраструктуре, инженерных сетях и другими параметрами городской среды.

Ключевые технологии, программное обеспечение и их функциональность, которые используются для создания цифровых моделей городов, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Ключевые технологии и программное обеспечение, используемые для создания цифровых моделей городов, и их функциональность
Table 3 – Key technologies and software used to create digital city models and their functionality

Технология	Программное обеспечение	Функциональность	Пример использования
Географические информационные системы (ГИС)	ArcGIS, QGIS	Интеграция слоев данных (рельеф, дороги, здания, сети), визуализация, создание и редактирование карт, анализ данных	Создание цифровой модели города, моделирование затоплений, оценка нагрузки на дороги и инфраструктуру
Информационное моделирование зданий (BIM)	Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCAD	Создание детализированных 3D-моделей зданий, интеграция с ГИС, моделирование инженерных систем, оценка влияния на застройку	Проектирование новых зданий в городах, оценка их влияния на освещенность и транспортные потоки
Технологии LiDAR и аэрофото-съемка	Agisoft Metashape, Pix4D	Создание точных 3D-моделей рельефа и зданий, анализ изменений ландшафта и застройки	Воссоздание города с высокой детализацией, анализ воздействия новых зданий на инсоляцию и транспорт
Специализированное ПО для 3D-моделирования	Blender, SketchUp	Визуализация городской среды, создание анимаций, проработка освещенности и текстур	Моделирование внешнего вида города, анализ изменений после строительства новых объектов
Информационное моделирование города (CIM)	Autodesk Civil 3D, InfraWorks	Интеграция всех данных в единую цифровую модель, моделирование развития города, определение нагрузок и зон затопления	Прогнозирование развития города, моделирование работы инфраструктуры, прогнозы для изменения транспортных потоков и коммунальных систем

Программное обеспечение ArcGIS – одна из самых популярных ГИС-платформ, которая позволяет создавать карты, анализировать пространственные данные, моделировать рельеф и строить

трехмерные модели. QGIS – бесплатная платформа с открытым исходным кодом, обладающая широким набором инструментов для геодезии, картографии и пространственного анализа. Функциональ-

ность – интеграция различных слоев данных (рельеф, дороги, здания, сети), визуализация пространственных объектов на карте, создание и редактирование цифровой топографической основы города, анализ геопрограммных данных для оценки плотности застройки, распределения зеленых зон, участков затопления и др. Например, при создании цифровой модели Москвы ГИС используются для точного отображения границ объектов, дорог, инженерных сетей и прочих элементов городской инфраструктуры. На основе этих данных можно моделировать затопления, оценивать нагрузку на дороги или предсказывать влияние застройки на транспортные потоки.

Существенным компонентом цифровой трансформации в архитектурно-строительной отрасли является технология информационного моделирования зданий, известная под аббревиатурой BIM (Building Information Modeling). В отличие от традиционных методов проектирования, BIM предполагает не только создание трехмерных визуальных моделей строительных объектов, но и интеграцию в них комплексной информации, охватывающей все аспекты жизненного цикла объекта: архитектурные и конструктивные характеристики, параметры инженерных систем, используемые материалы, а также данные о стоимости строительства, эксплуатации и последующего обслуживания.

Информационные модели в формате BIM формируют основу для междисциплинарного взаимодействия специалистов – архитекторов, инженеров, строителей, эксплуатационных служб, что обеспечивает целостный подход к проектированию и управлению объектами недвижимости.

Применение BIM способствует снижению проектных рисков, повышению точности расчетов и ускорению согласовательных процедур за счет высокой степени детализации проектной документации и автоматизации процессов.

В числе наиболее распространенных программных решений, реализующих принципы информационного моделирования, следует выделить платформу Autodesk Revit, обладающую широким функционалом для создания параметрических моделей зданий с привязкой к всем необходимым инженерным, конструктивным и экономическим характеристикам. Кроме того, популярностью в профессиональной среде пользуется программное обеспечение Graphisoft ArchiCAD, активно применяемое в архитектурной практике и предназначенное для проектирования сложных объектов с высокой степенью детализации. Функциональность – создание детализированных 3D-моделей зданий и объектов, интеграция с ГИС для привязки зданий к рельефу и городской инфраструктуре, моделирование инженерных коммуникаций (тепло, вода, электричество и т. д.), оценка влияния нового строительства на существующую застройку. Например, при проектировании нового квартала в Москве или Ростове-на-Дону в цифровую модель города добавляются 3D-модели будущих зданий. Это позволяет заранее оценить их влияние на освещенность, тень, транспортные потоки и нагрузку на инженерные сети.

Для создания максимально точной цифровой модели города используется технология LiDAR (Light Detection and Ranging) – метод лазерного сканирования, который позволяет с высокой точностью определять рельеф, расположение зданий и объектов инфраструктуры. В сочетании с аэрофотосъемкой LiDAR помогает создать трехмерную карту города с точностью до нескольких сантиметров. LiDAR-сканеры – лазерные системы, установленные на самолетах, вертолетах или дронах, которые сканируют территорию и создают облако точек (point cloud), описывающее рельеф и здания.

Аэрофотосъемка – использование дронов или самолетов для съемки города с воздуха. Программное обеспечение: Agisoft Metashape используется для об-

работки данных аэрофотосъемки и построения 3D-моделей. Pix4D позволяет обрабатывать данные с дронов и строить точные трехмерные модели. Функциональность – создание цифровой модели рельефа города, определение высоты зданий, деревьев и других объектов, анализ изменений ландшафта и застройки. Например, для создания 3D-модели Москвы в 2022 г. было использовано более 16 миллионов аэрофотоснимков, что позволило воссоздать город с высокой детализацией. В результате можно анализировать, как новые здания повлияют на инсоляцию (доступность солнечного света) или на транспортную сеть.

Для визуализации и создания городской среды широко используются программы для 3D-моделирования. Они позволяют не только воссоздавать внешний вид города, но и визуализировать сценарии его развития. Программное обеспечение: Blender – бесплатная и мощная программа для создания 3D-моделей и анимации. SketchUp – удобное ПО для моделирования зданий, объектов и городской среды. Функциональность – визуализация городской среды с учетом текстур и материалов, проработка освещенности и затененности зданий, создание анимаций развития города. Благодаря этим инструментам можно заранее представить, как будет выглядеть городской район после строительства или реконструкции. Например, можно смоделировать, как новое здание затенит прилегающий двор, как изменится вид города с разных ракурсов.

На последнем этапе все данные (рельеф, здания, инфраструктура) объединяются в единую информационную модель города (City Information Modeling, CIM). Эта концепция позволяет связать между собой геопространственные данные, модели зданий, информацию о коммуникациях и инженерных сетях. Программное обеспечение: Autodesk Civil 3D – одна из самых мощных платформ для создания и управления цифровыми моделями городов.

InfraWorks позволяет моделировать дорожную сеть, мосты, развязки и другие элементы инфраструктуры. Функциональность – интеграция всех данных в единую цифровую модель. Моделирование развития города на 10-20 лет вперед. Определение зон затопления, нагрузок на инфраструктуру и т. д. Например, в Москве CIM-модель позволяет моделировать работу метро, дорог, коммунальных систем и прогнозировать, как изменения в инфраструктуре повлияют на городскую среду.

Также в ЦМГ учитываются принципиальные аспекты работы систем водоотведения. Эффективное управление ливневыми и сточными водами требует проектирования дренажных систем, которые минимизируют затопления, очищают сточные воды и защищают окружающую среду. Цифровые модели позволяют моделировать движения вод, выявлять потенциальные проблемные зоны и оценивать эффективность уже существующих систем.

Ландшафтный дизайн играет важную роль в системах водоотведения, поскольку продуманное планирование зеленых насаждений, парков и открытых пространств способствует естественному дренажу и снижению эрозии. Грамотно спроектированные ландшафты могут аккумулировать и очищать дождевую воду, создавая экосистемы, улучшающие здоровье горожан. Владельцы объектов могут в реальном времени получать информацию о состоянии зданий, что помогает своевременно осуществлять ремонты и обслуживание, тем самым продлевая срок службы объектов и уменьшая затраты.

Таким образом, цифровая модель города, основанная на современных технологиях, становится мощным инструментом для эффективного проектирования, управления и поддержки устойчивого развития городских пространств.

Проект «Кластер Ломоносов» и развитие территорий вокруг Индустриального парка «Руднево» и жилого ком-

плекса в Мневниковской пойме являются примерами того, как цифровые технологии помогают не только в планировании, но и в оптимизации городской инфраструктуры.

Кластер «Ломоносов» – проект, представляющий собой крупный жилой и коммерческий комплекс, который был заранее смоделирован в цифровом двойнике города.

Использование цифровой модели позволяет оценить, как будущий комплекс повлияет на уже существующую инфраструктуру: транспортные потоки, нагрузку на коммунальные сети, а также экологическую ситуацию.

Цифровой двойник помогает выявить потенциальные проблемы еще на стадии проектирования, например, затруднения в движении транспорта или перегрузку дорог. Кроме того, с помощью 3D-моделей можно точно оценить, как новый комплекс будет выглядеть в контексте окружающей застройки, и провести анализ солнечной инсоляции, чтобы избежать затенения соседних территорий. Это важный аспект для планирования зеленых зон и обеспечения комфортных условий для будущих жителей.

Индустриальный парк «Руднево» и новый жилой комплекс в Мневниковской пойме – для этих проектов цифровое моделирование стало основным инструментом в процессе планирования и оптимизации. Модели позволяют интегрировать в процесс проектирования не только здания, но и целую сеть инфраструктуры: транспортные пути, инженерные сети, зоны для рекреации и т. д. Особенно важным стало использование цифрового двойника для анализа воздействия этих объектов на окружающую среду. Например, для «Руднево» важным моментом было моделирование загрязнения воздуха, транспортных потоков и оценка нагрузки на близлежащие дороги. Аналогично для жилого комплекса в Мневниковской пойме цифровая модель помогла

оптимизировать расположение зданий и общественных объектов так, чтобы обеспечить удобный доступ к социальным и торговым зонам, минимизировав воздействие на экологию.

Все эти проекты наглядно показывают, как цифровое моделирование становится неотъемлемой частью городского планирования, помогая избежать множества проблем на стадии строительства и обеспечивать устойчивое развитие города.

В России объем инвестиций на создание ЦМГ в рамках проекта «Умный город» составляет не менее 360 млрд рублей за период с 2019 по 2024 г. Эти средства включают частные и региональные инвестиции за 5 лет, причем федеральный бюджет направил на проект 813 млрд рублей в рамках национальной программы «Цифровая экономика».

Цифровизация городов охватывает различные умные решения, такие как системы управления трафиком и ЖКХ. Ростов-на-Дону выступает одним из ключевых участников этого проекта в Ростовской области, наряду с такими крупными городами, как Волгодонск и Таганрог, занимая высокие позиции в национальных рейтингах.

Ростов-на-Дону, Волгодонск и Таганрог – важные участники этой программы в Ростовской области. Именно в этих городах активно внедряются умные технологии, позволяющие существенно повысить качество городского управления, снизить уровень загрязнения, оптимизировать использование ресурсов и улучшить доступ граждан к необходимым сервисам.

Ростов-на-Дону выделяется среди других городов региона, занимая высокие позиции в национальных рейтингах по уровню цифровизации и инновациям в городской среде.

В таблице 4 представлены ключевые особенности цифровизации в Ростовской области.

Таблица 4 – **Ключевые особенности цифровизации в Ростовской области**
 Table 4 – **Key features of digitalization in Rostov region**

Показатель	Значение	Комментарий
Объем инвестиций на создание ЦМГ (2019-2024)	Не менее 360 млрд рублей	Включает частные и региональные инвестиции
Федеральное финансирование (национальная программа «Цифровая экономика»)	813 млрд рублей	Бюджет, направленный на развитие цифровой инфраструктуры
Основные области цифровизации	Системы управления трафиком, ЖКХ, умные транспортные системы, мониторинг города	Интеграция умных решений для улучшения городской жизни
Ключевые города в Ростовской области	Ростов-на-Дону, Волгодонск, Таганрог	Ведущие города по уровню цифровизации и внедрению инноваций
Позиции Ростова-на-Дону в национальных рейтингах	Высокие позиции	Активное развитие цифровых технологий в городском управлении

Срок окупаемости ЦМГ зависит от нескольких факторов, включая размер компании, объем инвестиций и ожидаемую прибыль. В целом, срок окупаемости инвестиций может варьироваться от 1 до 5 лет, в среднем составляя 2-3 года. Примеры успешных проектов показывают, что срок окупаемости может быть даже меньше года.

Частота обновления ЦМГ зависит от развития и изменений городской инфраструктуры, то есть в быстрорастущих городах обновлять нужно чаще. Рекомендуется обновлять каждые 1-3 года. Очень важно, чтобы обновления происходили регулярно, например, раз в год или несколько лет, в зависимости от потребностей и доступных данных, так как от этого зависит актуальность и точность модели.

Интеграция новых технологических решений в инфраструктуру урбанизированных территорий неизбежно влечет за собой необходимость актуализации соответствующей цифровой модели города (ЦМГ). Актуализация ЦМГ обеспечивает ее соответствие реальному состоянию городской среды, что, в свою очередь, критически важно для обеспечения корректности аналитических расчетов и эффективности принимаемых управленческих решений.

Вопрос стоимости разработки или актуализации цифровой модели зависит от ряда факторов и подлежит индивидуальному расчету. Начальная стоимость может составлять порядка 50 тысяч рублей, однако окончательная сумма формируется с учетом специфики объекта моделирования: его площади, плотности застройки, сложности инженерной инфраструктуры и целевых задач проекта. В случае крупных муниципалитетов стоимость существенно возрастает из-за объема обрабатываемых данных, необходимости комплексной интеграции разнородных источников информации и высокой степени детализации модели.

Дополнительные расходы могут быть связаны с оплатой труда квалифицированных специалистов, поддержкой программного обеспечения, техническим сопровождением и обеспечением бесперебойного функционирования цифровой платформы. В каждом конкретном случае объем таких затрат определяется масштабом и содержанием проекта, а также выбранными технологиями.

Примером практического применения цифрового моделирования в решении актуальных инфраструктурных задач является проект создания ЦМГ города Ростова-на-Дону, направленный на модернизацию системы водоотведения и

минимизацию рисков локальных подтоплений. Применение интеллектуальных инструментов моделирования открывает новые возможности для формирования устойчивой городской среды. Проект включает поэтапное внедрение технологических решений, охватывающих диагностику текущего состояния, моделирование сценариев развития и оптимизацию механизмов регулирования ливневого стока. В условиях усиливающегося климатического давления цифровая трансформация систем водоотведения становится важнейшим элементом устойчивого развития городов. Первый шаг к эффективному управлению – это моделирование сценариев, базирующееся на детальном сборе данных.

Используя метеорологическую информацию, такую как осадки, температура и скорость ветра, вместе с данными о состоянии водоемов, мы можем точно прогнозировать возможные подтопления. Гидравлическое моделирование, основанное на современных гидродинамических моделях, позволяет оценить потоки воды и выявить наиболее уязвимые участки, подверженные затоплениям при различных сценариях осадков – от нормальных до экстремальных.

Следующий этап заключается в оптимизации существующих систем водоотведения. Анализ текущей инфраструктуры, включая трубопроводы, насосные станции и ливневые системы, позволяет выявить слабые места, подвергающиеся засорению или недостаточному водоотведению.

Комплексная оценка эффективности функционирования существующих водоотводных решений при различных метеорологических сценариях создает основу для обоснованного формирования рекомендаций по их модернизации. В рамках такого анализа целесообразно выявлять элементы, утратившие эксплуатационную пригодность, а также участки системы, нуждающиеся в повышении

пропускной способности. Полученные результаты служат предпосылкой для последующего планирования инженерных мероприятий по адаптации городской дренажной инфраструктуры к экстремальным погодным условиям.

На следующем этапе предполагается разработка и проектирование новых инженерных решений, направленных на снижение рисков подтоплений в зонах, характеризующихся повышенной уязвимостью. В частности, строительство дополнительных ливневых каналов, организация разветвленных дренажных систем и внедрение временных водоотводных конструкций представляют собой действенные меры по улучшению городской водоотводной сети.

Особый интерес вызывают модульные водоотводные системы, обладающие высокой степенью адаптивности и способные оперативно реагировать на резкие изменения гидрологической обстановки, включая внезапные и интенсивные осадки.

Важной составляющей устойчивого подхода к регулированию поверхностного стока является развитие элементов природоподобной инфраструктуры. Создание зеленых пространств, в том числе парковых территорий, эксплуатируемых крыш с растительным покрытием, а также функционального озеленения с применением влаголюбивых растений, способствует улучшению водопоглощающей способности городской среды. Эти меры не только снижают нагрузку на систему водоотведения, но и одновременно улучшают микроклимат, повышают эстетическую ценность городской территории и формируют биологически активные пространства в условиях плотной застройки.

Создание цифровой модели города требует слаженной работы множества специалистов, каждый из которых вносит уникальный вклад в процесс разработки (табл. 5).

Таблица 5 – Основные группы специалистов, их роль в проекте создания цифровой модели города и ключевые характеристики
 Table 5 – Main groups of specialists, their role in the project of creating a digital city model and key characteristics

Группа специалистов	Роль в проекте	Ключевые характеристики
Архитекторы цифровой модели	Разработка и совершенствование цифровой модели города, интеграция различных уровней инфраструктуры	Высокие знания в области архитектуры и городской планировки
Инженеры-проектировщики	Создание концептуальных моделей с использованием BIM, CAD и GIS	Знания в области проектирования и технологий моделирования
Разработчики ПО	Обеспечение разработки программного обеспечения и оптимизации цифрового двойника	Опыт в программировании и разработке систем, знание ИТ-технологий
Эксперты по IoT	Интеграция датчиков и средств связи для сбора и передачи данных	Специализация в области интернета вещей и коммуникационных технологий
Аналитики данных	Обработка и анализ данных для создания прогнозов и предложений	Знания в области обработки данных, аналитики и статистики
Специалисты по визуализации	Создание реалистичных 3D-моделей и визуализаций с использованием VR/AR-технологий	Знания в области графического дизайна, 3D-моделирования и VR/AR-технологий
Градостроители	Планирование и развитие инфраструктуры, улучшение городской среды	Опыт в градостроительстве, понимание городской политики и планирования
Команда по управлению проектом	Координация действий участников, управление временем и финансовыми ресурсами	Навыки управления проектами, командной работы, финансового планирования
Специалисты по устойчивому развитию	Оценка экологических и социальных последствий проектов	Знания в области экологии и устойчивого развития, способность работать с природными ресурсами
Юридические эксперты	Обеспечение соблюдения нормативных требований и стандартов	Знания в области законодательства, соблюдения норм и стандартов
Эксперты по безопасности	Разработка мер защиты данных и инфраструктуры, обеспечение безопасности системы	Специализация в области кибербезопасности и защиты информации
Специалисты по UX/UI	Оптимизация интерфейсов для удобства пользователей	Опыт в дизайне пользовательского интерфейса, понимание потребностей пользователей
Социальные исследователи	Исследование потребностей и мнений жителей, интеграция социальных аспектов в проекты	Специализация в области социологии, работа с общественными запросами
Инженеры по системам автоматизации	Создание решений для управления городской экосистемой	Знания в области автоматизации процессов, умение разрабатывать интеллектуальные системы

Заключение

Внедрение цифровой модели для управления системой водоотведения в Ростове-на-Дону является не просто ша-

гом вперед в развитии инфраструктуры, но настоящей революцией, которая позволит городу эффективно справляться с природными вызовами. Комплексный

подход, включающий моделирование, оптимизацию существующих систем и проектирование новых решений, обеспечит защиту городских территорий от негативных последствий погодных условий. Несмотря на высокую стоимость разработки и обновления ЦМГ, стоимость предотвращенного ущерба от внедрения цифровых моделей кратко превышает затраты на модель, а срок окупаемости составляет 1-5 лет в зависимости от города и особенностей модели. Для ЦМГ Ростова-на-Дону срок окупаемости модели составляет три года. Таким образом, ЦМГ Ростова-на-Дону сможет стать примером модели умного и устойчивого города, готового к различным природным вызовам. Разработанная цифровая модель города может применяться для мониторинга и управления инфраструктурой в других городах и регионах России.

Список литературы

1. *Агеева, А. Ф.* Трехмерное моделирование цифровых аналогов городских систем с помощью агентного подхода // Искусственные общества. – 2021. – Т. 16, № 2. – С. 16-22.
2. Почвенные карты городов для унифицированной цифровой модели почвенного покрова России / Т. В. Ананко, М. И. Герасимова, Н. В. Савицкая // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. – 2024. – № 121. – С. 200-240.
3. *Борисова, Д. А., Чеботарев, Д. В.* Исторические предпосылки и перспективы формирования цифровой модели города // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и высшего образования: материалы V Национальной научно-практической конференции с международным участием. – Астрахань, 2022. – С. 241-243.
4. *Веретенникова, А. Ю., Семячков, К. А.* Инновационные модели цифровой экономики как фактор устойчивого развития умных городов // Региональная экономика и управление. – 2022. – № 3 (71).
5. *Заринов, А. С.* Особенности создания трехмерной цифровой модели центрального планировочного района города Перми по данным аэрофотосъемки // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 160-168.
6. *Кандалинцева, А. В.* Цифровая трансформация в градостроительстве. Применение искусственного интеллекта // Научный Лидер. – 2024. – № 4 (154). – С. 56-58.
7. *Косарев, А. В., Рогачева, С. М.* Цифровая модель города Саратов и его окрестностей // Гуманитарные и естественнонаучные факторы решения экологических проблем и устойчивого развития: материалы XX Международной научно-практической конференции. – Новомосковск, 2023. – С. 115-117.
8. Динамическая объектная модель защищенности цифровых распределенных подсистем умного города / В. М. Крундышев, М. О. Калинин, Е. В. Завадский, Г. С. Кубрин // Нео КВЕСТ. – 2024. – № 1. – С. 3-5.
9. Программная платформа построения цифровой модели города / С. А. Митягин, А. А. Ульянов, Д. Н. Абт, Д. В. Грачев // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019665855, 02.12.2019. Заявка № 2019664972 от 22.11.2019.
10. Цифровая модель города: принципы и подходы к реализации / С. А. Митягин, С. Л. Соболевский, А. И. Дрожжин, Д. Ю. Воронин, В. П. Евстигнеев, Н. П. Садовникова, Д. С. Парыгин, А. В. Чугунов // International Journal of Open Information Technologies. – 2019. – Т. 7, № 12. – С. 94-103.
11. *Полянин, В. О.* Ландшафтно-гидрологический подход к моделированию стока воды с речного водосброса: автореф. дис. канд. тех. наук.
12. *Сологаев, В. И.* Защита от подтопления в городском строительстве: учеб. пособие. – Омск, 2020. – 56 с.

13. *Тимиргалева, Р. Р., Морозова, В. Г.* Формирование модели взаимодействия элементов структуры хозяйственного комплекса города Севастополя на основе технологий цифровой экономики // *Естественно-гуманитарные исследования*. – 2020. – № 29 (3). – С. 337-341.

14. Организация зеленых зон в условиях плотной застройки города для получения цифровой модели рельефа / Ш. Хададов, Н. Мангушев, А. Красильникова, М. Алхилаев, О. Джейранов, Р. Тиханов, А. Алимов // *Экономика и предпринимательство*. – 2018. – № 8 (97). – С. 498-502.

List of references

1. *Ageeva, A.* Three-dimensional modeling of digital analogues of urban systems using an agent-based approach // *Artificial societies*. – 2021. – Vol. 16, № 2. – P. 16-22.

2. Soil maps of cities for a unified digital model of the soil cover of Russia / T. Ananko, M. Gerasimova, N. Savitskaya // *Bulletin of V. Dokuchaev Soil Institute*. – 2024. – № 121. – P. 200-240.

3. *Borisova, D., Chebotarev, D.* Historical background and prospects for the formation of a digital city model // *Innovative development of regions: potential of science and higher education : proceedings of V National scientific and practical conference with international participation*. – Astrakhan, 2022. – P. 241-243.

4. *Veretennikova, A., Semyachkov, K.* Innovative models of the digital economy as a factor in the sustainable development of smart cities // *Regional Economy and Management*. – 2022. – № 3 (71).

5. *Zaripov, A.* Features of creating a three-dimensional digital model of the central planning area of the city of Perm based on aerial photography. // *Bulletin of Siberian State University of Geosystems and Technologies*. – 2020. – Vol. 25, № 3. – P. 160-168.

6. *Kandalintseva, A.* Digital transformation in urban planning. Application of

artificial intelligence // *Scientific Leader*. – 2024. – № 4 (154). – P. 56-58.

7. *Kosarev, A., Rogacheva, S.* Digital model of the city of Saratov and its environs // *Humanitarian and natural science factors in solving environmental problems and sustainable development : proceedings of the XX international scientific and practical conference*. – Novomoskovsk, 2023. – P. 115-117.

8. Dynamic object model of security of digital distributed subsystems of a smart city / V. Krundyshev, M. Kalinin, E. Zavadskiy, G. Kubrin // *NeoQUEST*. – 2024. – № 1. – P. 3-5.

9. Software platform for building a digital model of city / S. Mityagin, A. Ulyanov, D. Abt, D. Grachev // *Certificate of registration of the computer program RU 2019665855, 02.12.2019. Application № 2019664972 from 22.11.2019*.

10. Digital model of the city: principles and approaches to implementation / S. Mityagin, S. Sobolevsky, A. Drozhzhin, D. Voronin, V. Evstigneev, N. Sadovnikova, D. Parygin, A. Chugunov // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2019. – Vol. 7, № 12. – P. 94-103.

11. *Polyanin, V.* Landscape-hydrological approach to modeling water runoff from a river spillway : author's abstract. dis. of candidate of technical sciences.

12. *Sologae, V.* Flood protection in urban construction : textbook. – Omsk, 2020. – 56 p.

13. *Timirgaleeva, R., Morozova, V.* Formation of a model of interaction of structural elements of the economic complex of the city of Sevastopol based on digital economy technologies // *Natural Sciences and Humanities*. – 2020. – № 29 (3). – P. 337-341.

14. Organization of green zones in densely built-up urban areas to obtain a digital terrain model / Sh. Khadadov, N. Mangushev, A. Krasilnikova, M. Alkhilaev, O. Dzheyranov, R. Tikhonov, A. Alimov // *Economy and Entrepreneurship*. – 2018. – № 8 (97). – P. 498-502.

Об авторах:

Куликов Михаил Михайлович, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры производственного и инновационного менеджмента Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Россия, kulikovmichael@yandex.ru

Тартанов Кирилл Викторович, магистрант кафедры производственного и инновационного менеджмента Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М. И. Платова, Новочеркасск, Россия, tartanovk@gmail.com

Конфликт интересов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the Authors:

Michail Kulikov, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production and Innovation Management of South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. Platov, Novocherkassk, Russia, kulikovmichael@yandex.ru

Kirill Tartanov, Undergraduate student of the Department of Production and Innovation Management of South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M. Platov, Novocherkassk, Russia, tartanovk@gmail.com

Conflict of Interest: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interest.