

# 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

**Аннотация** — В статье рассматривается применение системного подхода к декомпозиции и описанию города как системы, образованной градостроительной средой, людьми с особенностями их поведения в городе, а также обеспечивающими городскими инфраструктурами. Рассматриваемый подход применяется в качестве методологической основы для формирования требований к развитию городских территорий. Это позволяет обеспечить структурированность и непротиворечивость требований, что является достаточно актуальной задачей при планировании развития городских территорий. В статье показано, что предложенный подход может быть применен в качестве основы для построения цифровой модели города, как инструмента для решения сложных задач городского развития. В частности, приводится анализ природно-климатических факторов, оказывающих влияние на эффективность проектных решений по синтезу комфортной городской среды при использовании smart-технологий. Для формирования информационной основы цифровой модели города предлагается применять методы машинного обучения.

**Ключевые слова** — Умный город, городская среда, градостроительная система, системный подход, цифровая модель города, городские исследования, развитие территории, требования к развитию территории, машинное обучение, природно-климатические факторы

## I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных городов является сложной и нелинейной задачей, требующей учета большого числа средовых, социальных, экономических и экологических

Митягин Сергей Александрович, Университет ИТМО, директор Института дизайна и урбанистики, канд. технич. наук (mityagin@itmo.ru)

Соболевский Станислав Леонидович, Университет ИТМО, профессор-исследователь Института дизайна и урбанистики, докт. физ.-мат. наук (ss9872@nyu.edu)

Дрожжин Андрей Игоревич, Университет ИТМО, заместитель директора Института дизайна и урбанистики (drozhzhin@itmo.ru)

Воронин Дмитрий Юрьевич, Севастопольский государственный университет, зав. базовой кафедры "Программная инженерия интеллектуальных систем", канд. технич. наук (voronin@sevsu.ru)

Евстигнеев Владислав Павлович, Севастопольский государственный университет, вед. научн. сотр., канд. физ.-мат. наук (VPEvstigneev@sevsu.ru)

Садовникова Наталья Петровна, Волгоградский государственный технический университет, профессор кафедры САПР и ПК, докт. технич. наук (npsn1@yandex.ru)

Парыгин Данила Сергеевич, Волгоградский государственный технический университет, доцент кафедры САПР и ПК, канд. технич. наук (dparugin@gmail.com)

Чугунов Андрей Владимирович, Университет ИТМО, директор Центра технологий электронного правительства Института дизайна и урбанистики, канд. политич. наук (chugunov@itmo.ru)

факторов. В литературе развитие современных городов рассматривается не иначе как синоним улучшения качества жизни населения.

В этой связи формируются новые подходы к управлению процессом развития городских территорий ориентированные на формирование комфортной городской среды для всех категорий граждан во всем многообразии их взаимодействия с городом. Это в свою очередь предполагает неявное увеличение числа заинтересованных сторон, вносящих свои корректировки с состав требований к результату мероприятий по развитию городских территорий.

Таким образом, мы можем говорить о появлении достаточно новой проблемы, связанной с необходимостью выявления, учета и управления требованиями к развитию территорий в условиях их возможной противоречивости и латентности.

Другим аспектом, усложняющим управление развитием современных городов, является внутренняя структура взаимовлияния городских объектов, определяющая уровень адаптивности городской системы к воздействиям. Это делает трудно-прогнозируемыми эффекты от решений по развитию города [1, 2]. Вследствие этого весьма трудно предугадать успешность планируемых мероприятий и возможные негативные последствия.

Указанные аспекты обуславливают необходимость выработки нового методологического подхода к описанию городской территории как комплексной системы, включающей городскую среду, людей со спецификой их поведения и обеспечивающие инфраструктуры. Это должно обеспечить возможность выстраивания корректной системы требований к развитию города и предсказания эффектов от внедрения комплексных решений для всего города и отдельных его территорий.

В условиях, в целом, успешности применения информационных технологий для управления отдельными процессами городского развития не вызывает сомнения актуальность применения интеллектуальных технологий для решения комплексных задач развития города как сложной социотехнической системы [3, 4]. Поэтому, одним из актуальных направлений исследований является разработка методов представления и обработки знаний о городе с использованием технологий искусственного интеллекта [5, 6].

Традиционными можно считать подходы,

предполагающие сбор и последующую обработку городских данных для выработки решений в области управления городом и оптимизации городских процессов [7, 8].

Однако, описанные особенности целеполагания и управления развитием городских территорий требуют фиксации и накопления знаний о фактическом использовании людьми городских территорий и возникающих в результате эффектах, полноте и разнообразии возможностей, предоставляемых городом человеку. Без ответа на эти вопросы невозможно обеспечить ожидаемое качество жизни в городе.

В настоящей статье рассматривается подход, основанный на построении информационной модели города, отражающей особенности его внутренней структуры объектов, их взаимовлияния, а также взаимодействия с населением. Такой подход возможен при условии применения системного анализа в качестве методологической основы построения цифровой модели города. Применение предлагаемого подхода в задачах исследования и развития городских территорий должно обеспечить учет всех основных составляющих для создания комфортной городской среды для горожан.



Рис. 1 – Декомпозиция городской территории на трех уровнях

Уровень социальных активностей является базовым при формировании требований к городской среде, так как отражает фактическую жизнь в городе. Данный уровень описывается через формы взаимодействия людей с городской средой и возникающие при этом эффекты субъективного и объективного характера.

Физический градостроительный уровень формируется градостроительной системой города, включающей такие объекты как здания, дороги, парковые зоны, водные объекты и прочие. Особенности этого уровня в том, что с ним происходит взаимодействие людей. При этом изменение городской среды производится именно на этом уровне.

Уровень обеспечивающих условий формируется из таких составляющих как нормативные и законодательные ограничения территории, развитие транспортной инфраструктурой, уровень развития инженерных

Статья обобщает промежуточные результаты междисциплинарных исследований, связанных с разработкой различных аспектов концепции создания и развития цифровой модели города, осуществляемых межрегиональным коллективом из Санкт-Петербурга, Севастополя и Волгограда.

## II. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ГОРОДСКОЙ ТЕРРИТОРИИ

Базовым понятием является градостроительная система, являющаяся обобщающим понятием для совокупности пространственно-организованных и взаимосвязанных материальных элементов городской среды. Градостроительная система с одной стороны является средой общественной жизнедеятельности, а с другой требует нормативного, инженерного, транспортного и прочего обеспечений. В соответствии с принципами системного подхода городская территория может быть рассмотрена на трех уровнях: обеспечивающий уровень, физический градостроительный уровень и уровень социальной активности.

инфраструктур (водоснабжение, водоотведение, электричество, связь и пр.), обеспеченность социальной инфраструктурой (детские сады, школы, больницы, общественные центры и пр.).

Рассматривая взаимодействия этих уровней между собой легко отметить, что взаимодействие производится через физический градостроительный уровень. В то время как уровень социальных активностей с уровнем обеспечивающих условий не взаимодействуют напрямую. Взаимодействие обеспечивающего уровня с физическим градостроительным уровнем выражается в виде ограничений, заданных нормативно, законодательно или в мощности обеспечивающих инфраструктур.

Взаимодействие уровня социальных активностей с физическим градостроительным уровнем выражается в различных видах деятельности, которые производят люди из соответствующих социально-демографических групп на

территории соответствующих объектов городской среды. В рамках этой концепции формирование конкурентоспособной территории вне зависимости от ее функционального назначения определяется способностью территории удовлетворять требования (потребности) целевых групп горожан для этой территории, а также формировать положительные эффекты от взаимодействия с территорией.

Такого рода эффекты могут выражаться по-разному: как формальное наличие возможности удовлетворить потребности горожан [9], как положительные или отрицательные особенности субъективного восприятия горожанами окружающей среды [10,], как формируемые поведенческие установки, возникающие в результате опыта взаимодействия человека с городской территорией [11].

Таким образом, выявление и оценка эффектов, возникающих в результате взаимодействия горожан с городской территорией, является основой для формирования структуры требований представителей соответствующих социально-демографических групп населения к городской среде.

В этой связи возрастает значение социологических методов в исследованиях, сопровождающих создание и развитие цифровой модели города. В том числе следует проводить замеры уровня готовности граждан и лиц, участвующих в принятии решений, к внедрению умного города и реализации соответствующих проектов [13].

Следуя описанной концепции, можно определить общий порядок исследования территории при выявлении требований к ее развитию в рамках четырех направлений (см. рис. 2).

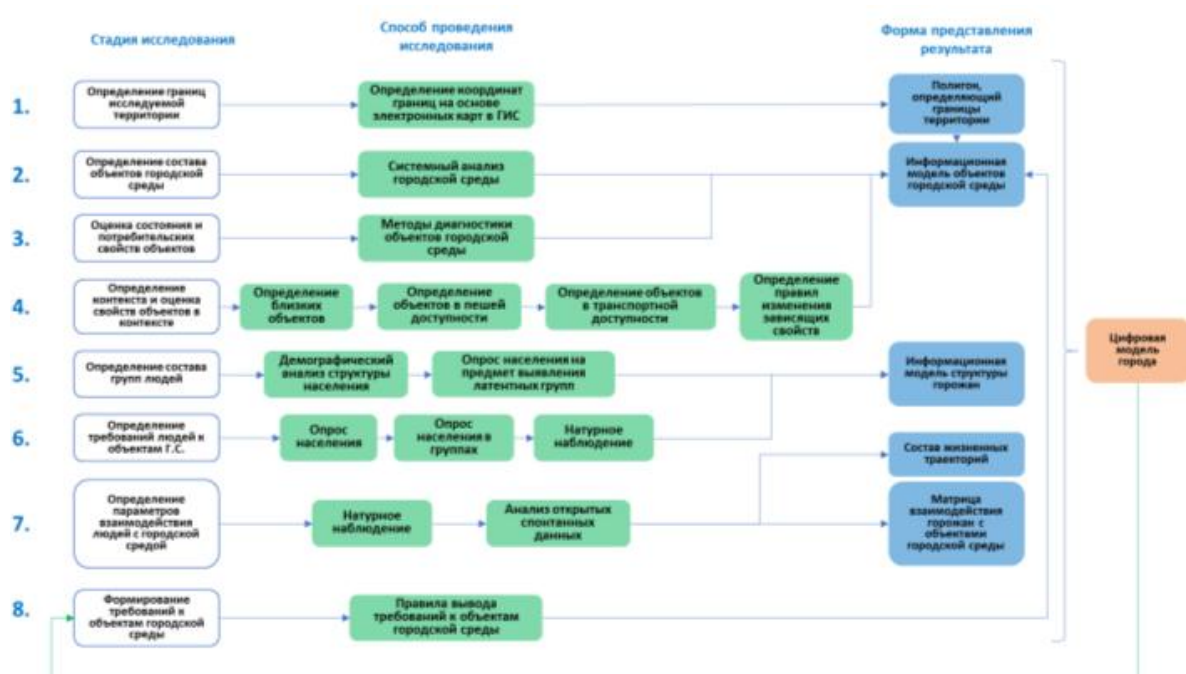


Рис. 2 – Порядок проведения системного анализа территорий

Во-первых, требуется осуществить описание исследуемой территории на уровне ограничений. Чаще всего территория определяется полигоном своих границ [12], а ее характеристики определяются использованием, с учетом нормативных и регламентных требований.

Во-вторых, необходимо описание градостроительной системы, сформированной на физическом уровне. Анализ в этом случае подлежит городская среда, сформированная на исследуемой территории. Он включает оценку состава и состояния городских объектов, уровня их взаимовлияния.

В-третьих, следует выявить ключевые заинтересованные стороны с точки зрения развития территории. При этом заинтересованными сторонами могут выступать как сами горожане, так и представители бизнеса, а также туристы и лица, временно пребывающие на территории города. Их описание требует достаточно подробной декомпозиции на целевые группы, так как от их состава зависит

качество оценки территории. При этом необходимо учитывать изменчивость состава и потребностей горожан в различных ситуациях и во времени.

В-четвертых, необходимо провести исследование форм взаимодействия горожан с городской средой. Формы взаимодействия определяют способ удовлетворения потребностей горожанами, используя рассматриваемую территорию. При этом необходимо учитывать несопоставимость отдельных форм взаимодействия [14]. На данном этапе подлежат выявлению и описанию эффекты, возникающие в результате взаимодействия конкретных категорий горожан с конкретными составляющими городской среды. Фактически, оцениваемые эффекты являются производной от городской среды, состава горожан и форм их взаимодействия.

Пятым шагом является формирование требований к развитию городской среды. При этом требования могут включать следующие виды:

Требования к видам обеспечений. Фактически это требования и ограничения, налагаемые на уровне обеспечивающих условий территории.

Требования к составу объектов определяют необходимость наличия соответствующего типа объекта для обеспечения соответствующей деятельности людей на территории. Состав объектов должен не противоречить требованиям к видам обеспечений.

Требования к размещению объектов определяют предпочтительное географическое расположение объектов по отношению к территории и друг к другу с учетом параметров взаимодействия объектов. Требования к размещению не должны противоречить требованиям к видам обеспечений территории и требованиям к составу объектов.

Требования к параметрам объектов определяют необходимые физические свойства и особенности объектов городской среды для обеспечения соответствующей деятельности людей. Эти требования не должны противоречить требованиям к видам обеспечений территории и требованиям к составу и размещению объектов.

Требования к исполнению объектов городской среды или нефункциональные требования характеризуют потребительские свойства объектов, не связанные напрямую с их использованием. Например, это может быть требования к дизайну или архитектурному исполнению городской среды.

Легко видеть, что требования к развитию городской среды естественным образом приводятся в иерархию в соответствии с уровнями декомпозиции. При этом требования высших уровней не могут противоречить требованиям низших уровней. В отдельных случаях это может приводить к противоречию. Средством, позволяющим разрешать противоречия, а также учитывать прогнозируемые эффекты следования линейным требованиям является цифровая модель города [15, 16]. Цифровая модель города, рассматривается, с одной стороны, как способ описания города и городских данных, но, что важнее, как способ организации и описания знаний о городе.

### III. ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ В УМНОМ ГОРОДЕ

На сегодняшний день научным сообществом признается острота проблемы гидрометеорологической безопасности, обусловленной прогрессирующим в последние десятилетия глобальным потеплением [17]. Климатический фактор становится явным вызовом устойчивому развитию отдельных регионов, причем основная угроза изменения глобального климата и его последствий для социально-экономической системы и окружающей среды исходит не от изменений климатического фона (к которой в той или иной мере они могут приспособиться), а от изменений в частоте и интенсивности экстремальных гидрометеорологических явлений [18]. В опубликованном Всемирным экономическим форумом списке глобальных рисков на 2017 г. в пятерке главных, ранжированных по вероятности возникновения, первую позицию заняли экстремальные погодные явления. За последние 20 лет их количество в России существенно возросло [19].

Вместе с ними возросли и погодно-климатические риски в секторах экономики и социальной сфере. Правильная их оценка является немаловажным аспектом устойчивого развития и адаптации социально-экономической сферы деятельности человека к изменениям климатических условий.

Уже сейчас города сталкиваются с серьезными угрозами возникновения опасных или стихийных гидрометеорологических явлений вследствие изменения глобального климата. К таким явлениям можно отнести опасное повышение уровня Мирового океана, наводнения, засухи, деградацию городских экосистем, обеднение водных ресурсов, снижение биоразнообразия и прочие негативные процессы в гео-, био- и антропоферах.

Территория России также является одной из самых уязвимых с точки зрения изменения климата [20]. Глобальные климатические тенденции проявляются также в характеристиках ветрового волнения и штормов на морских побережьях. В недавнем исследовании [21] был установлен квазипериодический характер изменчивости максимальных высот волн в Черноморском регионе с временным масштабом порядка 50 лет. Начиная с середины 20-х годов XX века, отмечается отчетливая тенденция к повышению уровня на морях России (за исключением Каспийского моря) [16], что, наряду с другими факторами, приводит к деградации побережий. Одно из важнейших последствий современных изменений климата – это изменение структуры гидрологического цикла, вследствие чего могут существенно измениться характеристики водности озер и стока рек [20, 22]. Существуют свидетельства изменений в режиме осадков на обширных территориях. Так, согласно [19], в России за последние 40 лет темпы роста годовых сумм осадков составили 2,1% за 10 лет.

Все эти изменения накладывают существенные ограничения на условия развития и перспективного планирования городской среды. Однако, существующая практика развития городской среды не учитывает климатические риски и их увеличения в будущем. По мере роста городов бурное и зачастую нерегулируемое строительство в районах повышенного риска усугубляет ущерб от наводнений и потепления климата, усиливает потенциальные угрозы для окружающей среды, здоровья населения, промышленного сектора экономики городов, критически важной городской инфраструктуры, включающей системы автомобильного и железнодорожного транспорта, мосты, электрические и телекоммуникационные сети, водоснабжение. Кроме того, природные заповедные территории, водно-болотные угодья и зоны сохранения биоразнообразия, расположенные внутри городов и в их окрестностях, как правило, также утрачиваются [23], нанося невосполнимый ущерб экосистеме.

Рассматривают две основные стратегии решения проблемы изменения климата, ориентированные, либо на «смягчение» последствий изменения климата, либо на «адаптацию» к этим последствиям [24]. Первая стратегия «смягчения» предполагает активное внедрение человека в природную среду для уменьшения источников выбросов парниковых газов, считающихся основным драйвером глобального потепления. В рамках

этой стратегии разрабатывается концепция «климат-нейтральных» городов, инфраструктура которых разработана таким образом, чтобы минимизировать выбросы парниковых газов – начиная с экологически чистого транспорта, заканчивая экологически и климатически «чистыми» технологиями строительства. Генерация электрической энергии (25%), транспорт (14%), промышленность в целом (21%), строительство и эксплуатация зданий (6%) суммарно ответственны за 66% объема выбросов парниковых газов, антропогенного происхождения. С другой стороны, эти виды деятельности, связанные с городской инфраструктурой, являются объектами управления в системе городской среды, а снижение воздействия городской среды на климат может быть целевой функцией «умных» решений, в том числе, при цифровой трансформации городских процессов.

Вторая стратегия «адаптации» предполагает поиск возможности избежать потенциального вреда, связанного с изменением климата, или, по крайней мере, снизить его потенциальный ущерб. В научной среде разработка решений для «умных» городов, соответствующих второй стратегии, до сих пор является не до конца решенным вопросом [25]. Любые исследования в этом направлении являются актуальными не только в глобальном масштабе, но и на региональном уровне.

В контексте этой стратегии существует два подхода к достижению цели снижения ущерба [26]. Первый наиболее распространенный путь связан с «оперативным» городским планированием с учетом ближайших (по времени) вероятных угроз и погодноклиматических рисков. В этом случае разрабатывается ряд мер по улучшению существующей инфраструктуры как некоторое дополнение к действующим планам развития урбанизированной территории. Второй подход будучи более основательным предполагает глубинные преобразования города для формирования инновационной городской среды, комфортной для населения и оптимальной для высокоэффективного производства в условиях нового глобального и регионального климата. Поскольку процесс изменения климата длится десятилетиями – такой подход выходит за рамки оперативного планирования и определяет долгосрочные контуры городской среды.

На современном этапе своего развития концепция «умных городов» больше не ограничивается только использованием информационных технологий, а все больше и больше включает в себя ориентацию на повышение качества жизни человека [27, 28]. Компоненты «умного города» также не ограничиваются физическими объектами инфраструктуры. Фактическими его элементами стали экономические процессы, мобильность, окружающая среда, население и качество их жизни [29]. В современных представлениях синтез концепции «умных городов» с системой городского планирования поможет преодолеть существующие барьеры в развитии городов будущего в том числе с учетом локальных климатологических особенностей региона и их отклика на глобальные изменения. Основой такого синтеза является переход от технологии-ориентированной к человек-ориентированной концепции «умных городов» [30], предпола-

гающей разработку комплекса мер и соответствующего инструментария для поддержания, улучшения и обеспечения устойчивого развития комфортной городской среды, интегрированной с естественной окружающей средой и гибкой по отношению к возможным климатическим изменениям.

#### IV. ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ОСНОВЫ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ГОРОДА

Для создания информационной основы цифровой модели города нужна объективная информация о состоянии городских территорий, которая может быть получена на основе анализа данных дистанционного зондирования Земли с использованием технологий машинного обучения.

Так, например, формирование системы озеленения, как правило, проводится в соответствии с проектом благоустройства территории, который составлен с учетом современных требований. Однако в процессе эксплуатации территорий состояние системы зеленых насаждений зачастую меняется не в лучшую сторону, таким образом, существует проблема объективной оценки уровня озелененности территории на основе доступной информации.

Предлагается использовать свёрточную нейронную сеть и данные космической съемки поверхности планеты для оценки древесного покрова городских пространств. На основе такого подхода можно определить критерий для оценки слоя “зеленой” инфраструктуры территории для цифровой модели конкретного города.

В основе исследования была гипотеза, согласно которой максимальный уровень озелененности территории, соответствует размещению жилого объекта в центре пешеходного диаметра, вся площадь которого покрыта деревянистыми растениями типа деревьев и/или крупных многолетних кустарников. Под пешеходным диаметром подразумевается расстояние, укладываемое в 10-минутную пешеходную изохрону.

В качестве исходных данных использовались обычные спутниковые изображения, предлагаемые общедоступными картографическими сервисами от Google ([www.google.ru/maps](http://www.google.ru/maps)), Yandex ([yandex.ru/maps/](http://yandex.ru/maps/)), Bing ([www.bing.com/maps](http://www.bing.com/maps)) и др. В качестве эталонной территории предлагается рассматривать участок площадью 1 кв. км в междуречье рек Абин и Михале (44.665527 с.ш., 38.192211 в.д.) в Абинском районе Краснодарского края, Россия, представленный на спутниковых снимках, предоставляемых компанией Яндекс [31] по данным “© 2012 DigitalGlobe, Inc., © ООО ИТЦ «СКАНЭКС», © CNES 2013” (рис. Ua). Озелененность такого участка, оцененная предлагаемым методом принимается равной 1 Abin. При этом, основываясь на нормах озеленения, установленных Всемирной организацией здравоохранения [32], можно принять следующие значения критерия “зеленого” качества городской территории, измеряемые предлагаемым индексом:

- менее 0,1 Abin – плохие условия;
- 0,1-0,4 Abin – удовлетворительные;
- 0,4-0,6 Abin – хорошие;

– более 0,6 Abin – отличные условия.

Для классификации фрагментов спутниковых снимков на предмет определения на них деревянистых зеленых насаждений использовалась свёрточная нейронная сеть, состоящая из трех слоев. В качестве исходных данных для классификации использовались фрагменты спутниковых снимков, полученные путем создания скриншотов, подготовленных в соответствии с определенными требованиями. Итоговые модели классификаторов в данном эксперименте обучались на совокупной выборке из 3 767 184 уникальных тайлов размером 25x25 пикселей.

Обучение классификатора первоначально было реализовано на 3 классах («Trees», «Grass», «Constructed»). Однако большая часть моделей не производила классификацию должным образом (получая NaN в параметрах «losses» и «accuracy»). Корректно обучился только один классификатор для трех классов за две эпохи. Модельное значение индекса 0.97 Abin. В связи с этим было решено объединить выборки «Grass» и «Constructed». Таким образом, обучение производилось для двух классов («Trees», «Miscellaneous»). В целом ситуация оказалась аналогичной обучению для трех классов.

Для реализации исследований были использованы операционная система CentOS Linux 7 (Core), Python 3.6.3, библиотеки машинного обучения Keras 2.1.3, Tensorflow 1.4.1, Theano 1.0.1, а также CUDA 9.0.176 Toolkit и CuDNN 7. В распоряжении исследовательской группы лаборатории UCLab имелось соответствующее оборудование для проведения эксперимента (Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2660, 2.2 GHz, 16 ядер, и GPU Nvidia Tesla K20c, 4Gb).

Обученные нейросетевые модели классификаторов, показавшие наилучшие результаты на эталонном участке, были применены для исследования произвольных участков территории с предварительно рассчитанным для них вручную индексами Abin. Тестирование проводилось на четырех участках территории, произвольно выбранных в Центральном и Василеостровском районах г. Санкт-Петербурга. Результаты распознавания в полном разрешении доступны по ссылке <https://drive.google.com/open?id=1IWpkZIOXS-Q1T250NUomtq7QQBHehZ9w> [33].

Разработанный комплекс моделей, на основе семантических сегментационных нейронных сетей, позволяет выявлять на спутниковых снимках территории объекты различных классов. Всего в ходе исследований было создано более тридцати моделей, позволяющих определять отдельные классы объектов или их комбинации, используемые для анализа зависимости размещения объектов территории и инфраструктуры городской среды. Обучение моделей производилось с использованием библиотеки глубокого обучения Keras, Open-CV и Numpy. Выбор такой связки определялся, в том числе, и имевшимся в распоряжении команды проекта набором графических ускорителей nVidia (Tesla P100, V100, ti 1080, др.). На рисунке 3 показан фрагмент работы программы дистанционного зондирования земли.



Рис. 3 – Скриншот результатов работы разработанного программного комплекса дистанционного зондирования земли

Каждая итоговая обученная модель нейросетевого классификатора построена на основе архитектур Unet. Модели отличаются глубиной, а также количеством входных и выходных данных.

На основе разработанных нейросетевых классификаторов решены задачи: оценки степени озеленения территории, обновление карты городской застройки посредством мониторинга изменений в составе объектов городской среды, контроль несанкционированного строительства, изменения площади объектов. Рассмотрена возможность решения ряда задач, связанных с мониторингом паводковой ситуации, изменениями площади водной поверхности, выявлением критического снижения уровня в реках и озерах в засушливый период; мониторингом изменения количества автомобилей в городе для расчета необходимой площади парковок, оценки парковочной ёмкости территории, контроля превышения допустимых концентраций токсичных веществ и канцерогенов в атмосфере крупных городов.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В статье приведен подход к описанию городской территории, основанный на методах системного анализа и используемый для последующего формирования требований к развитию городской среды. Этот подход может быть полезен для создания комфортных городов, предоставляющих необходимые, желательные и дополнительные возможности для горожан с точки зрения их взаимодействия с городской средой. То есть создания более конкурентоспособных и привлекательных городов для жизни.

Очевидно, что у предложенного подхода имеются ограничения, такие как сложность в сборе информации и в описании жизненных сценариев населения. Однако, с нашей точки зрения его преимуществом является обеспечение систематизации собираемых знаний в рамках единого формализма, что позволяет создать непротиворечивое и эффективное информационное обеспечение, используемое при анализе и планировании развития городских территорий.

По результатам проведенных исследований также определены механизмы получения объективной информации о состоянии территории города и отдельных объектов на основе использования методологии нейросетевой классификации.

Проведенные эксперименты позволяют говорить о приемлемой точности распознавания объектов заданных типов. При этом каждому распознанному фрагменту изображения может быть сопоставлен участок, привязанный к географическим координатам территории, а, следовательно, сформирован компонент цифровой модели города. Разработанные модели позволяют решать задачи, связанные с выбором обоснованных решений по планированию развития территории, экологической безопасности, оценке кадастровой стоимости земли, и др. Таким образом, методы, представленные в этом исследовании, могут использоваться для различных вариантов пространственного анализа и поддержки принятия решений в задачах управления городскими системами.

В дальнейшем планируется развивать проект и включить в цифровую модель самообучающийся элемент для обеспечения возможности автоматического анализа климатической ситуации без участия человека. Подобная платформа может быть востребована разработчиками разного рода сервисов, как мобильных приложений для граждан, так и для малого и среднего бизнеса, чья сфера интересов зависит от изменений климата.

Основным направлением развития предлагаемого подхода является синтез методологии оценки уровня комфортности городской среды. Это сложное междисциплинарное научное исследование, которое потребует совместной работы специалистов из различных предметных областей: урбанистов, социологов, специалистов по имитационному моделированию, ГИС-технологиям и сквозным цифровым технологиям. Примерами проактивных воздействий для обеспечения комфортной городской среды являются климат-ориентированные разработки в области умной мобильности (разработка «зеленого» транспорта), а также «умного» жизненного пространства (проектирование и строительство зданий с учетом микроклиматических условий пространства и доступных возобновляемых источников энергии). В частности, преобразование экосистемы городского пространства (создание «зеленого каркаса» города) также должно осуществляться как с учетом существующих мезо- и микроклиматических особенностей, так и с перспективой будущих климатических изменений. Таким образом, данная методология позволит проанализировать системные риски, связанными с экстремальными гидрометеорологическими явлениями и построить адекватную цифровую модель города, учитывающую развитие городского пространства в условиях меняющегося климата, которая станет опорным инструментальным средством для формирования устойчивых стратегий развития урбанизированной среды по основным направлениям: энергетика, водоснабжение, транспорт, землепользование, территориальное планирование и жилищное строительство, здравоохранение, образование и туризм. В основе таких стратегий должны лежать существующие сценарии изменения глобального климата на перспективу 2030, 2050, 2100 годы, спроецированные на масштабы региона города при использовании ГИС-технологий, имитационного моделирования, статистического и интеллектуального анализа данных и других технологий, развиваемых, в том числе, для

рынков будущего – в рамках концепции Национальной технологической инициативы.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Стратегическое управление социально-экономическим развитием территорий: методологические основы и прикладной инструментарий: моногр. / под общ. ред. А.В. Мехренцева. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2015. 235 с.
- [2] Agarwal A.K., Agarwal S.A.K. Management and Socio-Economic Development. New Delhi: Mittal Publications, 2014.
- [3] Zhang Y. et al. Real-time Machine Learning Prediction of an Agent-Based Model for Urban Decision-making // Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems. – International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2018. P. 2171-2173.
- [4] Kontokosta C. E., Tull C. A data-driven predictive model of city-scale energy use in buildings // Applied energy. 2017. Vol. 197. P. 303-317.
- [5] Psyllidis A., Bozzon A., Bocconi S., Bolivar C.T. A Platform for Urban Analytics and Semantic Data Integration in City Planning. Springer, 2015.
- [6] Wu N., Silva E. A. Artificial intelligence solutions for urban land dynamics: a review // Journal of Planning Literature. 2010. Vol. 24, №. 3. P. 246-265.
- [7] Hawas M.A. Are We Intentionally Limiting Urban Planning and Intelligence? A Causal Evaluative Review and Methodical Redirection for Intelligence Systems // IEEE Access. 2017. Vol. 5.P. 13253-13259.
- [8] Alonso L., Zhang Y.R., Grignard A., Noyman A., Sakai Y., ElKatsha M., Larson K. Cityscope: a data-driven interactive simulation tool for urban design. Use case volpe // International Conference on Complex Systems. Springer, Cham, 2018. P. 253-261.
- [9] Griego D. et al. Sensing and mining urban qualities in smart cities // Advanced Information Networking and Applications (AINA) // 2017 IEEE 31st International Conference. 2017. P. 1004-1011.
- [10] Fornara F., Bonaiuto M., Bonnes, M. Cross-Validation of Abbreviated Perceived Residential Environment Quality (PREQ) and Neighborhood Attachment (NA) Indicators // Environment and Behavior. 2010. Vol. 42 (2). P. 171-196.
- [11] Dębek M. Towards people's experiences and behaviours within their worlds: The integrative-transactional framework for studying complex people-environment interactions // Social Space. 2014. Vol. 8 (2). P. 1-55.
- [12] Rodoman B. B. Districting As a Way of Possessing Space // Regional Research of Russia. 2018. Vol. 8 (4). P. 301-307. DOI: 10.1134/S2079970518040081
- [13] Видясова Л.А., Смирнова П.В. Исследование образа «умного города» глазами жителей Петербурга // Информационные ресурсы России. 2019. №2. С.35-38. ISSN 0204-3653. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37262177>
- [14] Magarotto M., Faria de Deus R., Costa M.F., Masanet E. Green areas in coastal cities – Conflict of interests or stakeholders' perspectives? // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2017. Vol. 12 (8). P. 1260-1271. DOI: 10.2495/SDP-V12-N8-1260-1271
- [15] Stojanovski T. City Information Modelling (CIM) and Urban Design // City modelling & GIS. 2018. Vol. 1 (36). P. 506-516/
- [16] Stojanovski T. City Information Modeling (CIM) and Urbanism: blocks, connections, territories, people and situations // Society for Computer Simulation International. Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design, San Diego, 2013. P. 12.
- [17] IPCC Climate Change, Synthesis. Rep. Cont. W. G. I II III Fifth Assessment Rep IPCC. 2014. ed R K Pachauri and L A Meyer (Geneva: IPCC) P. 151.

- [18] Bronnimann S., Martius O., von Waldow H., Welker C., Luterbacher J., Compo G.P., Sardeshmukh P.D., Usbeck T. Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871 // *Meteorologische Zeitschrift*. 2012. Vol. 21 (1). P.13-27.
- [19] Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации. СПб, 2017. 106 с.
- [20] Евстигнеев В.М., Кислов А.В., Сидорова М.В. Влияние климатических изменений на годовую сток рек Восточно-Европейской равнины в XXI в. // *Вестник МГУ, сер. 5. География*. 2010. № 2. С. 3-10.
- [21] Polonsky A., Evstigneev V., Naumova V., Voskresenskaya E. Low-frequency variability of storms in the northern Black sea and associated processes in the ocean-atmosphere system // *Reg. Environ. Change*. –2014. – Vol.14, No.5. – P.1861-1871.
- [22] Zhang Z., Hu H., Tian F., Yao X., Sivapalan M. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China // *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2014. Vol. 18. P. 3951-3967.
- [23] Seto K.C., Sánchez-Rodríguez R., Fragkias M. The New Geography of Contemporary Urbanization and the Environment // *Annual Review of Environment and Resources*. 2010. Vol. 35 (1). P. 167–194.
- [24] Burton et al. *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies, and Measures*. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY. 2005.
- [25] Rosenzweig C., Solecki W., Hammer S.A., Mehrotra S. Cities lead the way in climatechange action // *Nature*. 2010. Vol. 467 (7318). P. 909-911.
- [26] Bazaz A., Bertoldi P., Buckeridge M., Cartwright A., de Coninck H., Engelbrecht F. et al. Summary for Urban Policymakers—What the IPCC Special Report on 1.5°C Means for Cities, IHHS Indian Institute for Human Settlements, Bengaluru, India, 2018. 30 p.
- [27] Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: definitions, dimensions, performance, and initiatives // *Journal of Urban Technology*. 2015. Vol. 22 (1). P. 3-21.
- [28] Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y. Smart cities of the future // *The European Physical Journal Special Topics*. 2012. Vol. 214 (1). P. 481-518.
- [29] Giffinger R., Gudrun H. Smart cities ranking: an effective instrument for the positioning of the cities? *ACE archit* // *City Environment*. 2010. Vol. 4. P. 7-26.
- [30] Kummitha R.K.R., Crutzen, N. How do we understand smart cities? An evolutionary perspective // *Cities*. 2017. Vol. 67. P. 43-52
- [31] YandexMaps: Абинский район Краснодарского края, Россия. <https://yandex.ru/maps/?ll=38.192211>
- [32] Нарбут Н.А., Матюшкина Л.А. Выбор и обоснование экологических критериев для оценки состояния городской среды // *Вестник Тихоокеанского государственного университета*. 2009. № 3 (14). С. 71-76.
- [33] Woody Plants Area Estimation Using Ordinary Satellite Images and Deep Learning / A. Golubev, N. Sadovnikova, D. Parygin, I. Glinyanova, A. Finogeev, M. Shcherbakov // *DTGS 2018 : Proceedings of the Third International Conference on Digital Transformation and Global Society, St. Petersburg, Russia, 20 May–2 June 2018*. – Springer IPS, 2018. – CCIS 858. – Part 1. – P. 302–313. – DOI : 10.1007/978-3-030-02843-5\_24



# City Digital Model: Principles and Approaches to Implementation

Sergei A. Mityagin, Stanislav L. Sobolevsky, Andrei I. Drozhzhin, Dmitri Yu. Voronin, Vladislav P. Evstigneev,  
Natalia P. Sadovnikova, Danila S. Parygin, Andrei V. Chugunov

**Abstract** — This paper considered the application of a systems approach to the decomposition and description of a city as a system formed by an urban environment, by people with special features of their behavior in the city as well as urban infrastructure which provide city functioning. The considered approach is used as a methodological basis for the requirements formation for the urban areas development. This allows ensuring the structured and consistent requirements, which is quite an urgent task when planning the urban areas development. The paper shows that the proposed approach can be applied as a basis for building a city digital model, as a tool for solving complex problems of urban development. In particular, an analysis of natural and climatic factors that have a fundamental influence on the smart city construction is provided. It is proposed to use machine-learning methods to form the information basis of a city digital model.

**Keywords** — Smart city, urban environment, urban planning system, systems approach, city digital model, urban research, area development, requirements to an area development, machine learning, climatic factors

## REFERENCES

- [1] Strategic Management of Socio-Economic Development: Methodological Framework and Application Tools / Eds. A.V. Mehrentsev. Ural State Forest Engineering University. 2015. (in Russian)
- [2] Agarwal A.K., Agarwal S.A.K. Management and Socio-Economic Development. New Delhi: Mittal Publications, 2014.
- [3] Zhang Y. et al. Real-time Machine Learning Prediction of an Agent-Based Model for Urban Decision-making // Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems. – International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2018. P. 2171-2173.
- [4] Kontokosta C. E., Tull C. A data-driven predictive model of city-scale energy use in buildings // Applied energy. 2017. Vol. 197. P. 303-317.
- [5] Psyllidis A., Bozzon A., Bocconi S., Bolivar C.T. A Platform for Urban Analytics and Semantic Data Integration in City Planning. Springer, 2015.
- [6] Wu N., Silva E. A. Artificial intelligence solutions for urban land dynamics: a review // Journal of Planning Literature. 2010. Vol. 24, № 3. P. 246-265.
- [7] Hawas M.A. Are We Intentionally Limiting Urban Planning and Intelligence? A Causal Evaluative Review and Methodical Redirection for Intelligence Systems // IEEE Access. 2017. Vol. 5.P. 13253-13259.
- [8] Alonso L., Zhang Y.R., Grignard A., Noyman A., Sakai Y., ElKatsha M., Larson K. Cityscope: a data-driven interactive simulation tool for urban design. Use case volpe // International Conference on Complex Systems. Springer, Cham, 2018. P. 253-261.
- [9] Griego D. et al. Sensing and mining urban qualities in smart cities // Advanced Information Networking and Applications (AINA) // 2017 IEEE 31st International Conference. 2017. P. 1004-1011.
- [10] Fornara F., Bonaiuto M., Bonnes, M. Cross-Validation of Abbreviated Perceived Residential Environment Quality (PREQ) and Neighborhood Attachment (NA) Indicators // Environment and Behavior. 2010. Vol. 42 (2). P. 171-196.
- [11] Dębek M. Towards people's experiences and behaviours within their worlds: The integrative-transactional framework for studying complex people-environment interactions // Social Space. 2014. Vol. 8 (2). P. 1-55.
- [12] Rodoman B. B. Districting As a Way of Possessing Space // Regional Research of Russia. 2018. Vol. 8 (4). P. 301-307. DOI: 10.1134/S2079970518040081
- [13] Vidyasova L.A., Smirnova P.V. The study of the image of the "smart city" through the eyes of the inhabitants of St. Petersburg // Russian Information Resources. 2019. №2. P.35-38. <https://elibrary.ru/item.asp?id=37262177> (in Russian)
- [14] Magarotto M., Faria de Deus R., Costa M.F., Masanet E. Green areas in coastal cities – Conflict of interests or stakeholders' perspectives? // International Journal of Sustainable Development and Planning. 2017. Vol. 12 (8). P. 1260-1271. DOI: 10.2495/SDP-V12-N8-1260-1271
- [15] Stojanovski T. City Information Modelling (CIM) and Urban Design // City modelling & GIS. 2018. Vol. 1 (36). P. 506-516/
- [16] Stojanovski T. City Information Modeling (CIM) and Urbanism: blocks, connections, territories, people and situations // Society for Computer Simulation International. Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design, San Diego, 2013. P. 12.
- [17] IPCC Climate Change, Synthesis. Rep. Cont. W. G. I II III Fifth Assessment Rep IPCC. 2014. ed R K Pachauri and L A Meyer (Geneva: IPCC) p. 151.
- [18] Bronnimann S., Martius O., von Waldow H., Welker C., Luterbacher J., Compo G.P., Sardeshmukh P.D., Usbeck T. Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871 // Meteorologische Zeitschrift. 2012. Vol. 21 (1). P.13-27.
- [19] Report on climate risks in the Russian Federation. SPb, 2017. 106 p. (in Russian).
- [20] Evstigneev V.M., Kislov A.V., Sidorova M.V. The impact of climate change on the annual flow of the rivers of the East European Plain in the XXI century // Vestnik MGU, vol. 5. Geography. 2010. № 2. pp. 3-10 (in Russian).
- [21] Polonsky A., Evstigneev V., Naumova V., Voskresenskaya E. Low-frequency variability of storms in the northern Black sea and associated processes in the ocean-atmosphere system // Reg. Environ. Change. –2014. – Vol.14, No.5. – P.1861-1871.
- [22] Zhang Z., Hu H., Tian F., Yao X., Sivapalan M. Groundwater dynamics under water-saving irrigation and implications for sustainable water management in an oasis: Tarim River basin of western China // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2014. Vol. 18. P. 3951-3967.
- [23] Seto K.C., Sánchez-Rodríguez R., Fragkias M. The New Geography of Contemporary Urbanization and the Environment // Annual Review of Environment and Resources. 2010. Vol. 35 (1). P. 167-194.
- [24] Burton et al. Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies, and Measures. Cambridge University Press, Cambridge, New York, NY. 2005.
- [25] Rosenzweig C., Solecki W., Hammer S.A., Mehrotra S. Cities lead the way in climatechange action // Nature. 2010. Vol. 467 (7318). P. 909-911.

- [26]Bazaz A., Bertoldi P., Buckeridge M., Cartwright A., de Coninck H., Engelbrecht F. et al. Summary for Urban Policymakers–What the IPCC Special Report on 1.5°C Means for Cities, IHHS Indian Institute for Human Settlements, Bengaluru. India, 2018. 30 p.
- [27]Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: definitions, dimensions, performance, and initiatives // *Journal of Urban Technology*. 2015. Vol. 22 (1). P. 3-21.
- [28]Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y. Smart cities of the future // *The European Physical Journal Special Topics*. 2012. Vol. 214 (1). P. 481-518.
- [29]Giffinger R., Gudrun H. Smart cities ranking: an effective instrument for the positioning of the cities? *ACE archit // City Environment*. 2010. Vol. 4. P. 7-26.
- [30]Kummitha R.K.R., Crutzen, N. How do we understand smart cities? An evolutionary perspective // *Cities*. 2017. Vol. 67. P. 43-52
- [31]YandexMaps: Abinsky District of the Krasnodar Territory, Russia. <https://yandex.ru/maps/?ll=38.192211> (in Russian)
- [32]Narbut, N., Matushkina, L.: Selection and justification of environmental criteria for assessing the state of the urban environment. In: *Vestnik TOGU*, 2009. № 3 (14). P. 71-76. (in Russian)
- [33]Woody Plants Area Estimation Using Ordinary Satellite Images and Deep Learning / A. Golubev, N. Sadovnikova, D. Parygin, I. Glinyaynova, A. Finogeev, M. Shcherbakov // *DTGS 2018 : Proceedings of the Third International Conference on Digital Transformation and Global Society*, St. Petersburg, Russia, 20 May–2 June 2018. – Springer IPS, 2018. – CCIS 858. – Part 1. – P. 302–313. – DOI : 10.1007/978-3-030-02843-5\_24