

Квалиметрия цифровой трансформации городской среды в концепции устойчивого развития

В.П. Евстигнеев, П.Н. Кузнецов, Д.Ю. Воронин

Севастопольский государственный университет

Аннотация. Использование сквозных цифровых технологий повышения эффективности организации функционирования городских процессов и предоставления инновационных услуг составляет основу концепции умного устойчивого города. Однако, цифровую трансформацию городской среды обществом ошибочно принято ассоциировать с бессистемным, избыточным внедрением технических новшеств в жизнь горожан. Это происходит в силу того, что изменения, вносимые в привычные процессы жизнедеятельности граждан, зачастую не проходят обязательную проверку на их сбалансированность с точки зрения соответствия противоречивым принципам устойчивого развития. В статье предложен новый концептуальный подход для оценки эффективности внедряемых решений, связанных с реализацией парадигмы, обеспечивающей переход от технологии-ориентированной к человек-ориентированной концепции «устойчивых умных городов». Основная идея заключается в том, чтобы рассмотреть трансформацию городской среды сквозь призму изменения функционального состояния ее объектов. Также в статье приведен пример реализации процедур квалиметрии цифровой трансформации городской среды с использованием рекуррентной нейронной сети с долгой краткосрочной памятью. При анализе общественного мнения, выражаемого посредством формирования комментариев в электронных сервисах о внедрении инновационных решений в городскую среду, удалось с довольно высокой точностью выявлять тональность отзывов. Точность классификации, полученная на тестовой выборке, составила более 95%.

Ключевые слова: умный город, цифровая трансформация, устойчивое развитие, машинное обучение, человек-ориентированная концепция, RNN, LSTM, нейронные сети

Qualimetry of Digital Transformation of Urban Environment in the Concept of Sustainable Development

V.P. Evstigneev, P.N. Kuznetsov, D.Yu. Voronin

Sevastopol State University

Abstract. The basis of the the concept of a smart sustainable city lies in application of the end-to-end digital technologies to improve organization of urban processes and innovative services' provision. However, society mistakenly identifies digital transformation of an urban environment as unsystematic, excessive introduction of technical innovations in the life of citizens. This is due to the fact that changes introduced into citizens' life activities often do not pass a mandatory check for their balance in terms of compliance with the conflicting principles of sustainable development. A new conceptual approach for assessing an effectiveness of solutions in light of transition from a technology-oriented to a human-oriented paradigm of "sustainable smart cities" is suggested in this study. The main idea is to consider the transformation of the urban environment through the prism of changes in the functionality of objects for the smart city infrastructure. The article also contains an example of qualimetry assessment of digital transformation of the urban environment by means of a recurrent neural network with long short-term memory. Application of this method allows accurate accounting of public feedback tone for comments in social networks dealing with urban environment improvement. The classification accuracy obtained on the test sample is more than 95%.

Keywords: smart city, digital transformation, sustainable development, machine learning, human-oriented concept, RNN, LSTM, neural networks

Введение

В настоящее время одним из распространенных подходов к развитию городской инфраструктуры является концепция «Умного города», охватывающая подавляющее большинство сфер человеческой жизнедеятельности: здравоохранение, безопасность, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, образование и туризм.

Несмотря на то, что в 2012 году Европейской экономической комиссией ООН было сформулировано понятие «умный устойчивый город» [1], а в 2015 году были утверждены показатели эффективности его функционирования, многие авторы [2-5] до сих пор считают, что детализация предлагаемых решений не является достаточной при рассмотрении конкретных практических задач в данной предметной области. Более того, в настоящее время устойчивое развитие умной городской среды обществом принято отождествлять с бессистемным,

избыточным внедрением технических новшеств в жизнь горожан, нарушающим привычные процессы их жизнедеятельности. Любые изменения, вносимые в городскую среду, следует верифицировать на целесообразность с точки зрения различных факторов:

- учет интересов различных социальных групп при использовании развитых информационных технологий анализа больших данных и имитационного моделирования агентных систем;
- минимизация конфликтных ситуаций в обществе на основе гибридного имитационного моделирования и методов решения задач многокритериальной оптимизации;
- соответствие предлагаемых технических и организационных решений принятой стратегии развития города;
- обеспечение безопасности жизнедеятельности городской среды в соответствии с принятыми нормативными документами;
- учет базовых составляющих стратегии устойчивого развития города при принятии тактических решений по цифровой трансформации городской среды [6-8].

Таким образом, комфортная городская среда должна характеризоваться совокупностью противоречивых критериев, оценивающих прирост качества жизни человека для различных социальных групп, а не ограничиваться только лишь аспектами внедрения информационных технологий [9-12]. Указанные особенности обуславливают необходимость выработки новой концепции методологического подхода, включающего процедуры квалиметрии цифровой трансформации городской среды, описанные в данной работе.

На решение этой задачи направлено настоящее исследование, итогом которого стало введение упрощенного критерия эффективности трансформации городской среды, а также предварительные результаты реализации процедур квалиметрии цифровой трансформации городской среды с использованием технологии машинного обучения.

В разделе 1 описан критерий эффективности трансформации городской среды, позволяющий осуществить переход к человек-ориентированной концепции «умных городов». В разделе 2 приведены результаты использования технологии нейронных сетей глубокого обучения для оценки общественного мнения. В заключении проводится анализ полученных результатов и формулируются перспективные направления дальнейших исследований.

1. Критерий эффективности трансформации городской среды

В соответствии с принципами системного подхода городскую среду можно описать как совокупность различных акторов, связей между ними и перечнем правил, которым подчиняются процессы их жизнедеятельности. Таким образом, 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 [13, 14]. Несмотря на некоторый субъективизм этого понятия, следует отметить, что представители различных категорий горожан имеют разные ожидания от функциональности объектов городской среды (далее – ОГС), тем самым формируя различные, в большинстве случаев, противоречивые требования. Таким образом, эффективность внедрения и социальная устойчивость тех или иных «умных» решений может существенно варьироваться в зависимости от складывающейся обстановки. В этом смысле сама стратегия формирования умной городской среды должна быть гибкой и адаптивной как при ее масштабировании к различным реальным условиям городов, так и учитывать нестационарность условий каждой отдельной городской среды. Такая стратегия должна основываться на некотором объективно сформулированном критерии эффективности трансформации среды.

Основная идея разработки такого критерия заключается в том, чтобы рассмотреть трансформацию городской среды сквозь призму изменения функционального состояния ее объектов при использовании человек-ориентированной парадигмы. То есть выбор функциональных качеств ОГС определяются требованиями горожан в соответствии с параметрами сценариев такого рода взаимодействий. Эти качества должны быть критичными и достаточными с точки зрения оценки социальной устойчивости городской среды в целом и данного ОГС в частности.

Необходимо отметить, что наличие некоторого количественного признака, оценивающего качество функционирования объектов ОГС, является принципиальным моментом. Например, внедрение цифровых платформ в сфере услуг приводит, прежде всего, к сокращению среднего времени обслуживания запроса в ОГС. Таким образом, время обслуживания запросов горожан может быть одним из признаков эффективности реализации мероприятий по цифровой трансформации. Вторым примером может служить, например, доля граждан, выражающих положительное отношение к деятельности ОГС.

В узком смысле задача трансформации всей городской среды связана с изменением функциональных состояний ОГС, что выражается в изменениях величин их количественных показателей качества функционирования.

Текущее «состояние» ОГС может быть представлено в виде вектора функциональных признаков. Ассоциированное с такими векторами векторное пространство по сути является пространством признаков. Такое пространство задается базисом $e^T = (e_1, \dots, e_p)$, определяющим направления числовых осей, вдоль которых измеряются количественные функциональные признаки ОГС.

Каждый из объектов ОГС в таком пространстве представляется в виде точки, как это показано на рис.1. Чем больше количество ОГС, тем больше точек в пространстве. В процессе внедрения «умных» решений и трансформации ОГС меняются их состояния, выражаемые через систему функциональных признаков. Вследствие этого меняются и положение точек в пространстве. На рис.1 новое положение точек указано красным цветом.

При трансформации ОГС возможны следующие изменения:

- 1) каждая точка пространства и/или центр масс системы всех точек практически не меняют своего положения;
- 2) часть точек существенно смещается по отношению к предыдущему

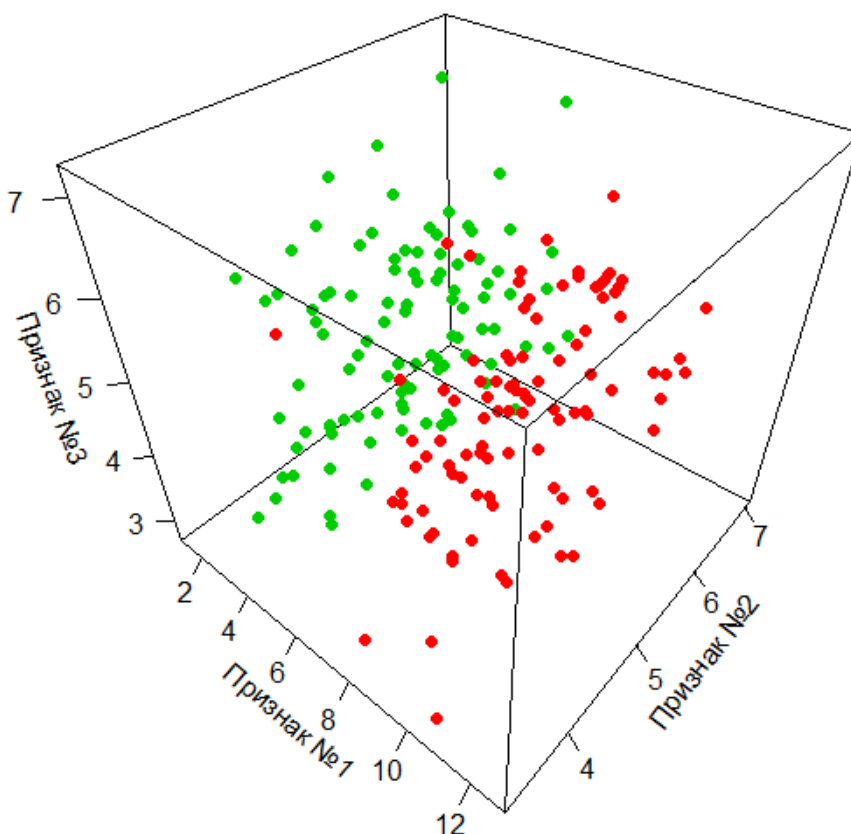


Рис. 1. Пример пространства количественных признаков функциональности ОГС. Зеленые точки – признаки ОГС до трансформации городской среды, красные – после.

своему состоянию, часть точек – не изменяют своего положения. Центр масс смещается незначительно.

3) несколько сопоставимых частей смещаются в разных направлениях, сохраняя при этом положение центра масс;

4) почти все точки смещаются в примерно в одном направлении. Заметно смещается «центр масс».

Из общих соображений следует, что вариант №4 и отчасти №2 могут отражать случай эффективной трансформации городской среды.

Соответственно возникает задача определения количественного критерия эффективности трансформации. Идея здесь в том, что, если ввести метрику такого пространства, можно задать критерии эффективности внедряемых решений путем оценки средних смещений точек в пространстве. Одним из первичных показателей эффективности в данном случае может являться смещение «центра масс» системы. Однако следует учесть также и относительное изменение каждого объекта ОГС друг относительно друга. То есть если одна часть ОГС существенно меняет свое состояние, а другая ухудшает, – это показатель скорее неэффективности решения. Таким образом, при изменении положения точек ОГС в признаковом пространстве, помимо самого смещения, нужно учитывать еще и размер всей группы точек.

Наиболее трудным и наименее формализованным в задаче построения критерия является определение меры расстояния между объектами или метрики признакового пространства. Вполне вероятно, что при отборе признаков функциональности ОГС некоторые из них могут быть зависимыми. Кроме того, признаки могут быть разного типа – непрерывные числовые (например, время ожидания или обработки запроса), порядковые категориальные (шкалы). В этом случае требуется некоторое масштабирование проекции на оси таких признаков.

В случае зависимых компонент e_1, e_2, \dots, e_3 вектора признаков и их различной значимости в характеристике эффективности следует, вероятно, использовать обобщенное (взвешенное) расстояние Махаланобиса [15]:

$$d(x, y) = \|X - Y\| = \sqrt{(X - Y)^T \Lambda^T \Sigma^{-1} \Lambda (X - Y)},$$

где X, Y – прошлое и трансформированное состояние городской среды (см.рис.1); Σ – ковариационная матрица генеральной совокупности, из которой извлекаются значения признаков ОГС; Λ – некоторая симметрическая неотрицательно-определенная матрица «весовых» коэффициентов, которая чаще всего выбирается диагональной.

Согласно этой метрике можно определить среднее смещение d_i «центров» группы точек ОГС до и после трансформации.

Следует также учесть «размеры» каждой из групп признаков ОГС до и после трансформации. Для этого предлагается рассмотреть внутригрупповую дисперсию группы точек до трансформации $d^2(x, c_x)$, где c_x – центр группы точек ОГС.

Введем безразмерную величину $\mu(x, y) = d_i^2 / d^2(x, c_x)$, которая и будет играть роль искомого критерия, который, с одной стороны, зависит от величины смещения в признаковом пространстве при трансформации городской среды, а с другой – содержит информацию о состоянии городской среды на предыдущем этапе своего развития. С его помощью появляется возможность сравнивать эффективность внедрения умных решений и изменения функциональности ОГС по отношению к предыдущему состоянию.

Данный критерий может использоваться не только для оценки эффективности внедряемых умных решений или социальной устойчивости выбранного вектора трансформации, но и при поиске путей развития городской среды в условиях меняющегося климата и реализации парадигмы «устойчивых умных городов» (Smart Sustainable City, SSC) [6]. Например, под совокупностью ОГС можно рассматривать объекты генерации и потребления энергии. Одним из признаков, формирующих признаковое пространство e^T , могут выступать денежные средства оплаты потребленной энергии и т.п. С глобальным изменением климата могут меняться локальные мезомасштабные климатические условия местности городской среды, приводящие к повышению или снижению привлекательности использования локальных возобновляемых источников энергии. В современных представлениях синтез «умных городов» с системой городского планирования может обеспечить реализацию концепции SSC. Фундаментальное значение для осуществления такого синтеза имеет принципиальный переход от технологии-ориентированной к человек-ориентированной концепции «умных городов» [16], предполагающей 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.

2. Пример реализации процедур квалиметрии цифровой трансформации городской среды с использованием нейронных сетей

Нейронные сети зарекомендовали себя эффективным инструментом для решения задач анализа и кластеризации текстовой информации. В частности, для получения достоверных оценок общественного мнения, выражаемого посредством формирования комментариев в электронных сервисах о внедрении инновационных решений в городскую среду, предлагается использовать рекуррентную нейронную сеть (Recurrent neural network – RNN) с долгой краткосрочной памятью (Long short-term memory – LSTM) [17]. Использование нейронной сети такого вида обусловлено повышенным качеством ее характеристик, связанных с распознаванием текстов и речи по сравнению с рядом других альтернатив, в частности, с многослойными перцептронами [18].

Обучение нейронной сети проводилось на основе комментариев, опубликованных на популярных интернет площадках размещения отзывов пользователей о товарах, продуктах и сервисах. Размер обучающей выборки составил около двух миллионов записей. Непосредственно перед обучением нейронной сети была осуществлена бинарная классификация исходных данных, выполненная по следующему принципу: при оценивании

пользователем в одну, две и три звезды отзыв считался «негативным», а в случае четырех и пяти звезд – «положительным».

Для обучения нейронной сети использовалась открытая программная библиотека машинного обучения – TensorFlow. Данный инструмент является разработкой компании Google и имеет открытый код, что позволяет гибко встраивать его для решения различных задач. По своему функционалу TensorFlow является довольно мощным инструментом с широкими функциональными возможностями, однако эффективное взаимодействие с системой требует высокой квалификации программиста. Ввиду этого, для работы с данным инструментальным средством была применена библиотека Keras, являющейся надстройкой над библиотекой TensorFlow и позволяющей существенно упростить работу, связанную с формированием нейронной сети [19].

Для загрузки данных из файла и удобного их представления в виде табличной структуры, была использована библиотека Pandas, являющаяся надстройкой над библиотекой NumPy [20]. При этом, столбцами DataFrame выступают именованные объекты, указывающие на отзыв и соответствующую ему оценку (класс).

```
train = pd.read_csv('comments_train.csv', header=None,
                  names=['Rating', 'Feedback'])
```

Преобразование текстов отзывов к виду, адаптированному для работы с нейронной сетью, было выполнено используя встроенный в Keras класс – Tokenizer, заменяющий слова цифровыми кодами в соответствии с частотой их употребления. С целью увеличения производительности нейронной сети без снижения её эффективности, максимальное значение анализируемых слов было ограничено 10 тысячами (наиболее часто встречающимися в обучающей выборке словами), а размер отзыва был ограничен 140 словами.

```
num_words = 10000
max_Feedback_len = 140
tokenizer = Tokenizer(num_words=num_words)
```

При создании нейронной сети была использована архитектура, состоящая из трёх последовательно соединенных (Sequential) слоев:

1-й слой: Embedding с размером векторного пространства – 64;

2-й слой: LSTM, образованный 160 блоками;

3-й слой: Dense, состоящий из одного нейрона, ввиду бинарной классификации, с функцией активации Сигмоида (sigmoid), дающий на выходе вещественное число в интервале от 0 до 1.

```
model = Sequential()
model.add(Embedding(num_words, 64,
```



```
        input_length=max_Feedback_len))
model.add(LSTM(160))
model.add(Dense(1, activation='sigmoid'))
```

Для компиляции нейронной сети, был использован алгоритм оптимизации «Adam» (adaptive moment estimation). Для вывода потерь использовалась функция «Binary crossentropy», а для вычисления доли правильных ответов – метрика «Accuracy».

```
model.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy',
              metrics=['accuracy'])
```

Для недопущения «переобучения» нейронной сети была задействована функция «Коллбек» (Callback), позволяющая сохранять результаты обучения нейронной сети после прохождения каждой эпохи (Epoch). Причем данная функция была настроена таким образом, что после окончания очередной эпохи обучения параметры модели, полученные при текущей итерации, сохраняются лишь в том случае, если число верных ответов при анализе тестовой выборки возросло.

```
model_save_path = 'nice_model.h'
checkpoint_callback = ModelCheckpoint(model_save_path,
monitor='val_accuracy', save_best_only=True, verbose=1)
```

На рис. 2 представлен график, отражающий эффективность обучения нейронной сети. Отображаются функциональные зависимости доли правильных ответов от числа пройденных эпох обучения сети (для тестовой и обучающей выборки).

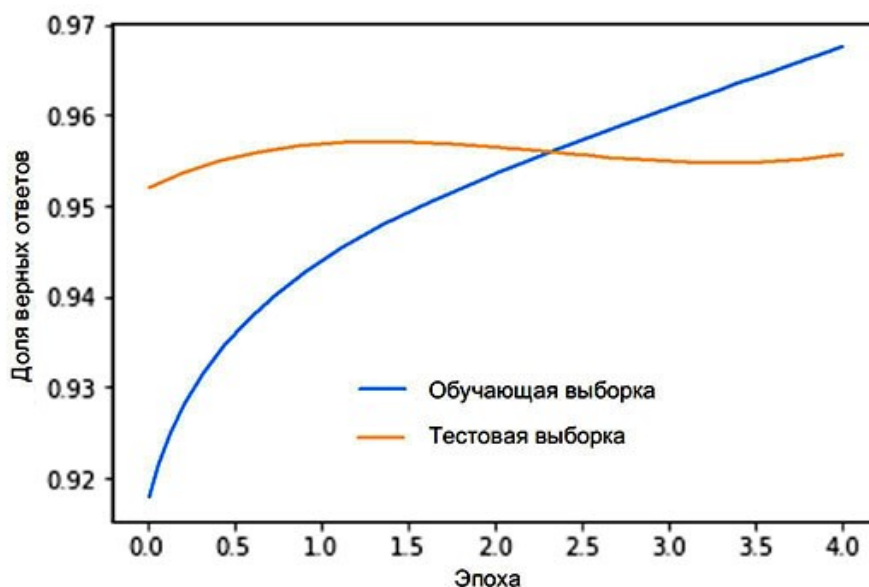


Рис. 2. График зависимости доли правильных ответов нейронной сети в зависимости от количества эпох обучения

Результаты, полученные при использовании описанной выше методики, показывают, что применение нейронных сетей глубокого обучения позволяет с довольно высокой точностью выявлять тональность отзывов. Точность классификации, полученная на тестовой выборке объемом более 6 тысяч отзывов, составила не менее 95 %. При этом необходимо отметить, что после второй эпохи обучения, доля верных ответов при анализе тестовой выборки снизилась. Это говорит о том, что нейронная сеть «переобучилась». Из чего следует вывод, что использование более трех эпох не является целесообразным, так как дальнейшее повышение временных затрат не приводит к увеличению точности классификации.

Заключение

Предлагаемый в работе критерий эффективности трансформации городской среды может использоваться не только для оценки эффективности внедряемых умных решений, но и при поиске путей развития городской среды в условиях меняющегося климата и реализация парадигмы «устойчивых умных городов», что может быть важно для осуществления перехода к человек-ориентированной концепции «умных городов», предполагающей разработку комплекса мер и соответствующего инструментария для поддержания, улучшения и обеспечения устойчивого развития комфортной городской среды. Приведен пример формирования информационного обеспечения для реализации предлагаемой концепции при использовании технологии нейронных сетей глубокого обучения для оценки общественного мнения.

Таким образом, основным направлением развития предлагаемого подхода является синтез методологии оценки уровня комфортности городской среды. Это сложное междисциплинарное научное исследование, которое потребует совместной работы экспертов из различных предметных областей: урбанистов, социологов, специалистов по имитационному моделированию, ГИС-технологиям и сквозным цифровым технологиям. Данная методология позволит проанализировать риски, связанными с бессистемным, избыточным внедрением технических новшеств в жизнь горожан, нарушающим привычные процессы их жизнедеятельности, а также реализовать адекватную цифровую модель города, учитывающую принципы устойчивого развития городского пространства, которая станет опорным инструментальным средством для формирования 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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Севастополя в рамках научного проекта № 20-47-920006.

Литература

1. The UNECE–ITU Smart Sustainable Cities Indicators // Economic and Social Council United Nations. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2015/ECE_HBP_2015_4.en.pdf.
2. Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives // J. Urban Technol. 2015. Vol. 22 (1). P. 3-21. DOI: 10.1080/10630732.2014.942092.
3. Hara M. et al. New key performance indicators for a smart sustainable city // Sustainability. 2016. V. 8, No. 3. P. 206.
4. Bibri S. E. A foundational framework for smart sustainable city development: Theoretical, disciplinary, and discursive dimensions and their synergies // Sustainable Cities Soc. 2018. V. 38. P. 758-794.
5. Chamoso P. et al. Tendencies of technologies and platforms in smart cities: a state-of-the-art review // Wireless Commun. Mobile Comput. 2018. V. 2018. DOI: 10.1155/2018/3086854.

6. Höjer M., Wangel J. Smart Sustainable Cities: Definition and Challenges. In: Lorenz M., Hilty L., Aebischer B.: ICT Innovations for Sustainability. – Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 333-349.
7. Martin C. J., Evans J., Karvonen A. Smart and sustainable? Five tensions in the visions and practices of the smart-sustainable city in Europe and North America // *Technol. Forecasting Social Change*. 2018. V. 133. P. 269-278.
8. Al-Nasrawi S., Adams C., El-Zaart A. A conceptual multidimensional model for assessing smart sustainable cities // *J. Inf. Syst. Technol. Manage.* 2015. V. 12, No. 3. P. 541-558.
9. Park E., del Pobil A.P., Kwon S.J. The Role of Internet of Things (IoT) in Smart Cities: Technology Roadmap-oriented Approaches // *Sustainability*. 2018. V.10. P. 1388. DOI: 10.3390/su10051388.
10. Freudendal-Pedersen M., Kesselring S., Servou E. What is smart for the future city? Mobilities and automation // *Sustainability*. 2019. V. 11, No. 1. P. 1-21.
11. Ilyas N., Shahzad A., Kim K. Convolutional-neural network-based image crowd counting: Review, categorization, analysis, and performance evaluation // *Sensors*. 2020. V. 20, No. 43. P. 1-33.
12. Graham M., Dutton W. Society and the internet: How networks of information and communication are changing our lives. – Oxford University Press, 2019. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199661992.001.0001.
13. Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: definitions, dimensions, performance, and initiatives // *J. Urban Technol.* 2015. Vol. 22, No. 1. P. 3-21.
14. Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y. Smart cities of the future // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2012. Vol. 214, No. 1. P. 481-518.
15. Wilks D.S. Matrix Algebra and Random Matrices. In: Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. 4th Ed. Elsevier, 2019. pp.553-585. DOI: 10.1016/B978-0-12-815823-4.00011-0.
16. Kummitha R.K.R., Crutzen, N. How do we understand smart cities? An evolutionary perspective // *Cities*. 2017. Vol. 67. P. 43-52.
17. Sak H., Senior A., Beaufays F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling // *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association*, 2014. P. 338-342.
18. Xiangang Li, Xihong Wu. Constructing Long Short-Term Memory based Deep Recurrent Neural Networks for Large Vocabulary Speech Recognition // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2015. P. 4520-4524, DOI: 10.1109/ICASSP.2015.7178826.

19. Eyre H.J., Lange D.P. Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems. 2nd ed. O'Reilly, 2019. 817 p.
20. Betancourt R., Chen S. Pandas Library. In: Python for SAS Users. Apress, Berkeley, CA, 2019. 452 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-001-3_3.

References

1. The UNECE–ITU Smart Sustainable Cities Indicators // Economic and Social Council United Nations. URL: http://www.unece.org/fileadmin/DAM/hlm/documents/2015/ECE_HBP_2015_4.en.pdf.
2. Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: Definitions, dimensions, performance, and initiatives // J. Urban Technol. 2015. Vol. 22 (1). P. 3-21. DOI: 10.1080/10630732.2014.942092.
3. Hara M. et al. New key performance indicators for a smart sustainable city // Sustainability. 2016. V. 8, No. 3. P. 206.
4. Bibri S. E. A foundational framework for smart sustainable city development: Theoretical, disciplinary, and discursive dimensions and their synergies // Sustainable Cities Soc. 2018. V. 38. P. 758-794.
5. Chamoso P. et al. Tendencies of technologies and platforms in smart cities: a state-of-the-art review // Wireless Commun. Mobile Comput. 2018. V. 2018. DOI: 10.1155/2018/3086854.
6. Höjer M., Wangel J. Smart Sustainable Cities: Definition and Challenges. In: Lorenz M., Hilty L., Aebischer B.: ICT Innovations for Sustainability. – Cham: Springer International Publishing, 2015. P. 333-349.
7. Martin C. J., Evans J., Karvonen A. Smart and sustainable? Five tensions in the visions and practices of the smart-sustainable city in Europe and North America // Technol. Forecasting Social Change. 2018. V. 133. P. 269-278.
8. Al-Nasrawi S., Adams C., El-Zaar A. A conceptual multidimensional model for assessing smart sustainable cities // J. Inf. Syst. Technol. Manage. 2015. V. 12, No. 3. P. 541-558.
9. Park E., del Pobil A.P., Kwon S.J. The Role of Internet of Things (IoT) in Smart Cities: Technology Roadmap-oriented Approaches // Sustainability. 2018. V.10. P. 1388. DOI: 10.3390/su10051388.
10. Freudendal-Pedersen M., Kesselring S., Servou E. What is smart for the future city? Mobilities and automation // Sustainability. 2019. V. 11, No. 1. P. 1-21.
11. Ilyas N., Shahzad A., Kim K. Convolutional-neural network-based image crowd counting: Review, categorization, analysis, and performance evaluation // Sensors. 2020. V. 20, No. 43. P. 1-33.
12. Graham M., Dutton W. Society and the internet: How networks of information and communication are changing our lives. – Oxford

- University Press, 2019. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199661992.001.0001.
13. Albino V., Berardi U., Dangelico R.M. Smart cities: definitions, dimensions, performance, and initiatives // *J. Urban Technol.* 2015. Vol. 22, No. 1. P. 3-21.
 14. Batty M., Axhausen K.W., Giannotti F., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y. Smart cities of the future // *Eur. Phys. J. Spec. Top.* 2012. Vol. 214, No. 1. P. 481-518.
 15. Wilks D.S. *Matrix Algebra and Random Matrices*. In: Wilks D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Science*. 4th Ed. Elsevier, 2019. pp.553-585. DOI: 10.1016/B978-0-12-815823-4.00011-0.
 16. Kummitha R.K.R., Crutzen, N. How do we understand smart cities? An evolutionary perspective // *Cities*. 2017. Vol. 67. P. 43-52.
 17. Sak H., Senior A., Beaufays F. Long short-term memory recurrent neural network architectures for large scale acoustic modeling // *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association*, 2014. P. 338-342.
 18. Xiangang Li, Xihong Wu. Constructing Long Short-Term Memory based Deep Recurrent Neural Networks for Large Vocabulary Speech Recognition // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. 2015. P. 4520-4524. DOI: 10.1109/ICASSP.2015.7178826.
 19. Eyre H.J., Lange D.P. *Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, Tools, and Techniques to Build Intelligent Systems*. 2nd ed. O'Reilly, 2019. 817 p.
 20. Betancourt R., Chen S. *Pandas Library*. In: *Python for SAS Users*. Apress, Berkeley, CA, 2019. 452 p. DOI: 10.1007/978-1-4842-001-3_3.