

Моделирование городов становится все более актуальной задачей. Преобладающим направлением сегодня является построение многофакторных моделей, использующих возможности машинной обработки больших данных. Наиболее перспективным выглядит моделирование с помощью эвристических алгоритмов, которые опираются на диалог человек – машина. В статье изложены результаты эксперимента по применению эвристики «Строительство Великой китайской стены» (СВКС) для одновременного учета предельно разнородных параметров – энергоэффективности зданий и их культурно-исторической ценности. Показано, что использование эвристики СВКС значительно повышает качество модели.

**Ключевые слова:** моделирование городов; эвристики; алгоритм СВКС; энергоэффективность; культурное наследие. /

Modeling cities is becoming an increasingly urgent task. The prevailing trend today is the construction of multifactor models using the capabilities of machine processing of big data. Modeling using heuristic algorithms that rely on a human-machine dialogue looks the most promising. The article presents the results of an experiment on the application of the "Great Wall Construction Algorithm" (GWCA) heuristic to simultaneously take into account extremely heterogeneous parameters – energy efficiency of buildings and their cultural and historical value. It is shown that the use of the GWCA heuristic significantly improves the quality of the model.

**Keywords:** modeling of cities; heuristic; Great Wall Construction Algorithm; energy efficiency; cultural heritage.

## Культурное наследие в проектировании устойчивых городов / Cultural heritage in the design of sustainable cities

текст

**Мвфек Аль-Хаддад**

Университет прикладных наук Аль-Балка  
(Аль-Салт, Иордания)

text

**Mwfeq Al Haddad**

AL-Balqa Applied University (Al-Salt,  
Jordan)

58

### Введение

Одним из главных (а возможно, и самым главным) приемом познания окружающего нас мира является моделирование. Модель, то есть упрощенное подобие реального объекта или процесса, мы строим, когда реальный объект (процесс) слишком сложен для восприятия. А такое случается почти всегда. Обычный кирпич, если мы попытаемся описать все его характеристики без исключения, предстанет необыкненным, как Вселенная. Внешняя форма, включая микрорельеф в разных масштабах, химический состав всех компонентов, их кристаллическая структура, физические свойства, включая механические, теплофизические, электрические, оптические... Существуют также история кирпича, его экономика, социология, эстетика, психология и даже семантика, в которой кирпич выглядит как символ, меняющий свое значение в зависимости от контекста.

Нет такого объекта в реальном мире, который мы могли бы описать исчерпывающим образом. Именно поэтому мы создаем модели, выбирай из неисчислимого множества параметров реальности те характеристики, которые нам кажутся наиболее значимыми и необходимыми относительно наших текущих наущных потребностей.

### 1. Моделирование городов

Город является объектом несравненно более сложным, чем кирпич. Поэтому моделирование городов

привлекает внимание урбанистов как предельно актуальная и важная задача. На протяжении тысячелетий философы пытались выделить те характеристики города, которые способны отразить самые наущные потребности горожан: форму города, его размеры и внутреннюю структуру, количество жителей и так далее. Как и во многих других областях науки, особенно быстрый рост числа и сложности моделей городов наблюдается с начала XX века.

Первые модели городов были статичными. Ранняя чикагская школа урбанистики, финансируемая Рокфеллером-старшим, собрала огромный социологический материал и построила концентрическую модель Чикаго. В центре этой модели располагался район, заселенный «цветной» беднотой, там же располагались самые грязные и трудоемкие промышленные объекты. По мере удаления от центра размещались «пояса», населенные все более состоятельными «белыми воротничками» и бизнесменами, а внешний пояс образовывали пригородные особняки белой протестантской элиты. Таким образом, в основу модели были положены социальные параметры горожан.

Как обычно принято в американской науке, модель Р. Парка и Э. Берджеса анонсирована как универсальная, и устройство Чикаго двадцатых годов двадцатого века была объявлена идеальной структурой любого города в мире [1].

Тем не менее уже в 1930-е годы появилась альтернативная модель, включающая параметры основных транспортных артерий города. Секторальная модель Говарда Хойта также учитывала сегрегацию американских городов по имущественному и этническому признакам, но в качестве базового элемента использовалась также группа параметров, связанных с процессами снабжения города всем необходимым [2]. Таким образом, в основе секторальной модели лежат экономические параметры, в основном траектории товарно-денежных потоков.

Перед миром в середине XX века, включая стремительный рост урбанизации, стимулировал появление все более сложных моделей города. Модель «центральных мест» Ч. Харриса и Э. Ульмана включает не только экономико-социологические характеристики и транспортную структуру, но также некоторые элементы культуры. Роль города в качестве центра общения (например, религиозного) также была включена в модель.

Во второй половине XX века можно наблюдать параллельные процессы развития моделей города. Каждый из ранее возникших подходов развивается самостоятельно. Например, модель рынка городских земель А. Алонсо следует экономическому подходу в исследовании городов [3], а ее дальнейшим продолжением можно считать теорию нобелевского лауреата по экономике за 2008 год Пола Кругмана и соавторов [4].

## Introduction

One of the main (and perhaps the most important) methods of cognition of the world around us is modeling. We build a model, that is, a simplified likeness of a real object or process, when the real object (process) is too complex to perceive. And this happens almost always. An ordinary brick, if we try to describe all its characteristics without exception, will appear as vast as the universe. The external shape, including microrelief at different scales, the chemical composition of all components, their crystal structure, and physical properties, including mechanical, thermophysical, electrical, and optical... There is also the history of brick, its economics, sociology, aesthetics, psychology, and even semantics, in which brick looks like a symbol that changes its meaning depending on the context.

There is no such object in the real world that we can describe exhaustively. That is why we create models, choosing from an innumerable set of reality parameters those

characteristics that seem to us the most significant and necessary relative to our current urgent needs.

### 1. Modeling of cities

The city is an object incomparably more complex than a brick. Therefore, urban modeling attracts the attention of urbanists as an extremely relevant and important task. For thousands of years, philosophers have tried to identify those characteristics of a city that can reflect the most pressing needs of citizens – the shape of the city, its size and internal structure, the number of inhabitants, and so on. As in many other fields of science, a particularly rapid increase in the number and complexity of city models has been observed since the beginning of the twentieth century.

The first models of cities were static. The early Chicago School of Urban Studies funded by Rockefeller Sr. gathered a huge amount of sociological material and built a concentric model of Chicago. In the center of this model was an area populated by the "colored" poor,

and the dirtiest and most labor-intensive industrial facilities were located there.

Further from the center, "belts" populated by wealthier "white collars" and businessmen were located, and the outer belt was formed by suburban mansions of the white Protestant elite. Thus, the model was based on the social parameters of the townspeople.

As is usually accepted in American science, the model of R. Park and E. Burgess was announced as universal, and the structure of Chicago in the twenties of the twentieth century was declared the ideal structure of any city in the world (Burgess, 1924).

Nevertheless, already in the 1930s, an alternative model appeared, including the parameters of the main transport arteries of the city. Howard Hoyt's sectoral model also took into account the segregation of American cities by property and ethnicity, but also used a group of parameters related to the processes of supplying the city with everything necessary as a basic element (Hoyt, 1939). Thus, the sectoral model is based on

economic parameters, mainly on the trajectories of commodity and cash flows.

The revision of the world in the middle of the twentieth century, including the rapid growth of urbanization, stimulated the emergence of increasingly complex city models. The model of "central places" by Charles Harris and E. Ullman includes not only economic and sociological characteristics and transport structure, but also some elements of culture. The role of the city as a center of communication (for example, religious) was also included in the model.

In the second half of the twentieth century, parallel processes of development of city models can be observed. Each of the previously developed approaches develops independently – for example, the urban land market model by A. Alonso follows an economic approach in urban research (Alonso, 1965), and its further continuation can be considered the theory of the 2008 Nobel Laureate in Economics Paul Krugman and co-authors (Fujita et al., 1999).

В теоретических работах Г. Блюменфельда и А. Гутнова город рассматривается с точки зрения коммуникаций между жителями. Город в коммуникативной модели – это структура, обеспечивающая «минимум необходимых и максимум возможных передвижений» [5, 6]. Дальнейшее развитие коммуникативной модели можно проследить уже в нашем столетии в теории «пятнадцатиминутных городов» Карлоса Морено [7]. Каждый из подходов позволяет рассматривать город с какой-либо выбранной точки зрения и в этом смысле приносит практическую пользу для тех или иных аспектов жизни города. Одновременно каждый из таких «парциальных» подходов подвергается ожесточенной критике за то, что пренебрегает множеством других параметров, которые приобретают первостепенное значение в других вопросах.

Альтернативным направлением в моделировании городов является создание все более сложных и многофакторных моделей. Этот подход получил мощный импульс в связи с быстрым развитием компьютерных методов математического моделирования. Компьютер, а тем более компьютерная сеть в принципе способны работать с моделями, включающими неограниченное количество параметров. Современный вычислительный комплекс способен учитывать миллионы независимых характеристик моделируемого объекта (например, города), и мощность таких комплексов быстро растет.

Неудивительно, что компьютерные методы проектирования и управления развитием городов зачастую воспринимаются сегодня как некая панацея, способная переложить все проблемы города на могучие плечи машинного интеллекта [8].

Обширный библиометрический обзор за вторую половину XX – начало XXI века, проведенный исследователями из университета Нагоя, обнаружил более 100 тысяч публикаций на темы, связанные с управлением развития городов. Одним из результатов исследования стал вывод о том, что направления, сосредоточенные на социальной и экономической сторонах жизни городов, продолжали преобладать во второй половине прошлого века. Однако в последние десятилетия приоритет перешел ко все более сложным комплексным моделям, учитывающим экологические факторы, а также политические и управленческие аспекты, психологию восприятия городского пространства, вопросы культурного наследия и так далее [9].

По мере усложнения моделей города и вовлечения в моделирование компьютерных методов становилась все более заметной основная проблема взаимодействия человека с машиной – проблема четкой формулировки задачи и соблюдения необходимого качества исходной информации. Проблема следует из принципиального отличия человеческого мышления от работы компьютера. Если человек легко оперирует метафорическими, размытыми и многозначными поня-

тиями и образами, то компьютерные алгоритмы изначально содержат требование однозначности и неизменности информации, с которой работает машина. У компьютера нет интуиции, нет эмоциональной сферы и нет собственных целей. Компьютер может найти оптимальный режим проектирования и управления развитием города только в том случае, если понятие оптимума будет задано в четких, измеримых и неизменных наборах параметров. И это может сделать только человек.

К сожалению, аспекты жизни города, необходимые для адекватного моделирования, сильно различаются по качеству исходной информации. Если экономика или социология оперируют достаточно формализованными данными, то экология, а тем более политика и культура используют крайне размытые понятия. Даже самые основные, базовые дефиниции в этих сферах носят метафорический и многозначный характер, а большинство параметров либо вовсе не поддаются измерению, либо эти измерения субъективны, зависят от личных взглядов разных исследователей и в результате не могут быть сопоставлены друг с другом. Как объяснить компьютеру, что такое «зеленая повестка», «справедливое распределение права на город» или «культурное наследие», если даже сами исследователи в этих сферах не могут договориться между собой?

## 2. Эвристические алгоритмы и Великая китайская стена

Выходом из создавшегося противоречия стало использование эвристических алгоритмов (эвристик). Эвристики в данном случае можно обозначить как элементы человеческого мышления, внедренные в процесс компьютерного моделирования. Иначе говоря, часть задач внутри процесса моделирования решается строгими математическими методами на основе формализованных данных, а часть подзадач – при помощи интуитивных и волевых решений человека, сотрудничающего с компьютером.

Первым и наиболее известным из таких способов стало «Дерево целей» (ДЦ). Эта эвристика заключается в поэтапном декомпозировании первоначальной цели на частные задачи. На каждом этапе число задач увеличивается, зато каждая задача становится все более простой и узкой. Процесс останавливается, когда задачи становятся достаточно простыми для автоматического поиска их решений. Очевидно, процесс декомпозирования цели несет существенный творческий и интуитивный элемент, то есть доступен только человеку.

Широкую известность приобрел метод Искусственных нейронных сетей (ИНС). Его суть заключается в том, что некоторый объем данных загружается в память компьютера, после чего алгоритм вычисляет сеть статистически достоверных связей между параметрами. Эвристический элемент в данном случае появ-

The theoretical works of G. Blumenfeld and A. Gutnov consider the city from the point of view of communications between residents. In the communicative model, a city is a structure that provides "the minimum necessary and maximum possible movement" (Blumenfeld, 1949; Gutnov, 1985). The further development of the communicative model can be traced back to our century in the theory of "fifteen-minute cities" by Carlos Moreno (Moreno, 2024). Each of the approaches allows you to view the city from any chosen point of view, and in this sense brings practical benefits in various aspects of city life. At the same time, each of these "partial" approaches is fiercely criticized for neglecting many other parameters that are of paramount importance in other issues.

An alternative direction in urban modeling is the creation of increasingly complex

and multifactorial models. This approach has received a powerful impetus due to the rapid development of computer methods of mathematical modeling. A computer (and even more so, a computer network) is, in principle, capable of operating with models that include an unlimited number of parameters. A modern computing complex is capable of taking into account millions of independent characteristics of a simulated object (for example, a city), and the capacity of such complexes is growing rapidly. It is not surprising that computer methods of designing and managing urban development are often perceived today as a kind of panacea capable of shifting all the problems of the city onto the powerful shoulders of machine intelligence (Batty, 2024).

An extensive bibliometric review for the second half of the twentieth and the begin-

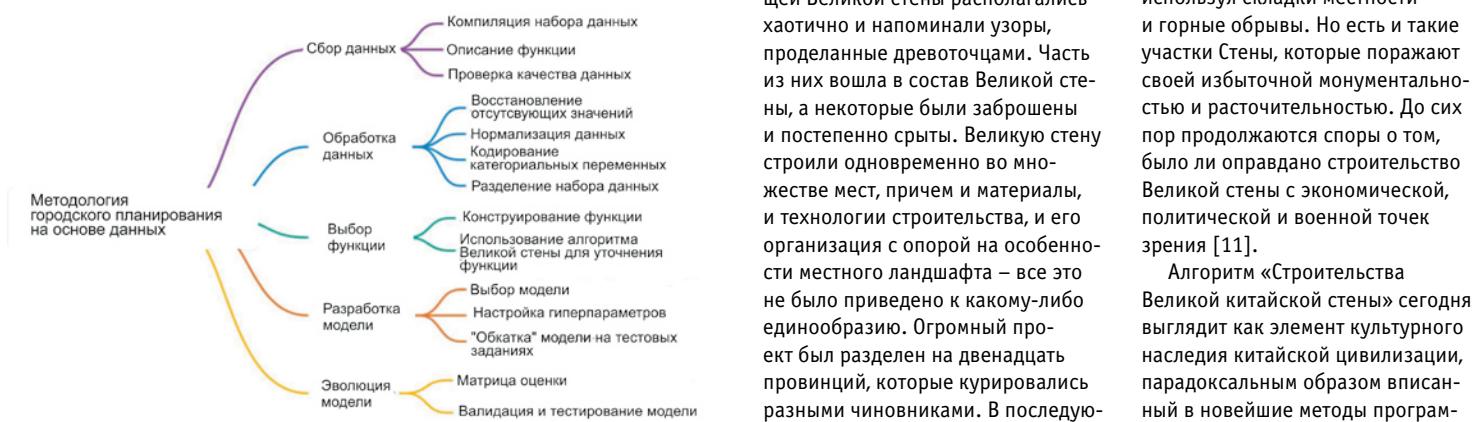
ning of the twenty-first century, conducted by researchers from Nagoya University, found more than 100,000 publications on topics related to urban development management. One of the results of the study was the conclusion that trends focused on the social and economic aspects of urban life continued to prevail in the second half of the last century. However, in recent decades, priority has shifted to increasingly complex integrated models that take into account environmental factors, as well as political and managerial aspects, the psychology of perception of urban space, cultural heritage issues, and so on (Sharifi et al., 2023).

As the city models became more complex and computer methods were involved in modeling, the main problem of human-machine interaction became more and more noticeable – the problem of clearly formulating

the task and maintaining the necessary quality of the source information. The problem follows from the fundamental difference between human thinking and computer operation. Whereas a person easily operates with metaphorical, vague and ambiguous concepts and images, computer algorithms initially contain the requirement of unambiguity and immutability of the information with which the machine works. The computer has no intuition, no emotional sphere, and no goals of its own. A computer can find the optimal mode of designing and managing the development of a city only if the concept of optimum is defined in clear, measurable and unchangeable sets of parameters – and this can only be done by humans.

Unfortunately, the aspects of city life necessary for adequate modeling vary greatly in the quality of the initial information.

Рис. 1. Общая методология создания и проверки модели /  
Fig. 1. Methodology Flowchart



Великой стены (GWCA) представляет собой сложную метаэвристическую оптимизационную структуру, представленную Цзый Гуанем и др. [10].

Великая стена, самое длинное сооружение в истории человечества, строилась долго. Самые древние фрагменты стены относятся ко второму тысячелетию до н. э.; они служили разделительными рубежами между многочисленными китайскими царствами. Например, государство Чу (1115–223 до н. э.) построило разделительную линию вдоль пограничной линии с государством Ци (1122–221 до н. э.) с целью защиты от вторжений со стороны соседа.

«Желтый император» Цинь Шихуан (221–207 до н. э.) объединил разрозненные государства в единую империю и приказал построить стену вдоль пограничной линии между Центральной равниной и землями кочевников. К этому моменту фрагменты будущей Великой стены располагались хаотично и напоминали узоры, проделанные древоточцами. Часть из них вошла в состав Великой стены, а некоторые были заброшены и постепенно срыты. Великую стену строили одновременно во множестве мест, причем и материалы, и технологии строительства, и его организация с опорой на особенности местного ландшафта – все это не было приведено к какому-либо единобразию. Огромный проект был разделен на двенадцать провинций, которые курировались разными чиновниками. В последую-

щие столетия администрации также продолжали использовать подобный подход для завершения всего предприятия. Выбор способов строительства (включая организацию работ) оставался за местными чиновниками, хотя иногда строительством Стены занимались государственные деятели высшего ранга. Так, известный генерал Ци Цзигуан из династии Мин (1368–1644) когда-то отвечал за работы по строительству фрагмента стены вблизи Пекина.

Результатом этой многовековой стройки стал объект общей протяженностью то ли 8, то ли 21 тыс. километров. Разнобой в оценках вызван как раз тем, что стена не представляет собой единый объект, а, скорее, выглядит как собрание разнородных фрагментов. Некоторые фрагменты выглядят вполне экономно и оправданно, особенно те, где стена только усиливает природные препятствия для движения войск противника, используя складки местности и горные обрывы. Но есть и такие участки Стены, которые поражают своей избыточной монументальностью и расточительностью. До сих пор продолжаются споры о том, было ли оправдано строительство Великой стены с экономической, политической и военной точек зрения [11].

Алгоритм «Строительства Великой китайской стены» сегодня выглядит как элемент культурного наследия китайской цивилизации, парадоксальным образом вписанный в новейшие методы програм-

Whereas economics or sociology use fairly formalized data, ecology, and even more so politics and culture, use extremely vague concepts. Even the most basic definitions in these fields are metaphorical and ambiguous, and most of the parameters either cannot be measured at all, or these measurements are subjective, depend on the personal views of different researchers, and as a result cannot be compared with each other. How can you explain to a computer what a "green agenda", "fair distribution of the right to a city" or "cultural heritage" is, if even researchers in these fields cannot agree among themselves?

## 2. Heuristic algorithms and the Great Wall of China

The way out of this contradiction was the use of heuristic algorithms (heuristics). In this case, heuristics can be described as elements of human thinking embedded in the process of computer modeling. In other words, some of the tasks within the modeling process are solved using rigorous mathematical methods

based on formalized data, and some of the subtasks are solved using intuitive and volitional decisions of a person working with a computer.

The first and most famous of these methods was the "Goal Tree" (DC). This heuristic consists in step-by-step decomposition of the initial goal into particular tasks. At each stage, the number of tasks increases, but each task becomes simpler and narrower. The process stops when the tasks become simple enough to automatically find their solutions. Obviously, the process of goal decomposition has a significant creative and intuitive element, that is, it is accessible only to humans.

The method of Artificial Neural Networks (ANN) has become widely known. Its essence lies in the fact that a certain amount of data is loaded into the computer's memory, after which the algorithm calculates a network of statistically reliable relationships between the parameters. In this case, the heuristic element appears at the stage of selecting data for training a neural network.

мирования на основе диалога человека и машины.

## 3. Моделирование с принципиально разнородными параметрами: случай Аммана

В нашем эксперименте мы разработали модель, включающую предельно разнородные параметры города, а именно – энергоэффективность (удельное потребление энергии для регулирования температуры внутри зданий) и ценность этих зданий в качестве объектов культурно-исторического наследия. Если измерение энергоэффективности носит аппаратный (объективный) и точный характер, то параметр культурно-исторической ценности полностью опирается на мнение экспертов и не имеет общепринятой шкалы измерения.

На рис. 1 показана общая схема создания и проверки адекватности модели.

Первым шагом является сбор необходимых данных в максимально обширном количестве. В качестве источника первичных данных мы использовали официальные документы администрации города, а также результаты опроса группы экспертов в сфере культурно-исторического наследия. Затем собранные данные были скомпилированы, то есть объединены в группы по смыслу; их качество было проверено при помощи перекрестного сопоставления (данные, противоречие друг другу, были исключены). Также на первом этапе была намечена общая форма

The next step after the appearance of several heuristic algorithms was the use of metaheuristics – that is, a set of heuristics formed also according to the heuristic principle. For example, the method of "Random Forests" (BOS) consists in the formation of not one goal tree, but many such trees (a whole "forest"). Each "tree" of this "forest" differs in a different formulation of the goal and a different way of decomposition. After "growing the forest", the algorithm looks for patterns in the distribution of the model's qualities – in which area of the "forest" the model gives the most accurate and complete forecasts.

One of the most promising heuristic algorithms today is considered to be the "Great Wall Construction Algorithm". The Great Wall Construction Algorithm (GWCA) is a complex metaheuristic optimization structure presented by Ziyu Guan et al. (2023).

The Great Wall, the longest structure in the history of mankind, took a long time to build. The oldest fragments of the wall date

back to the second millennium BC and served as dividing lines between numerous Chinese kingdoms. For example, the state of Chu (1115–223 BC) built a dividing line along the border line with the state of Qi (1122–221 BC) in order to protect against invasions from its neighbor.

The "Yellow Emperor" Qin Shihuang (221–207 BC) united the disparate states into a single empire and ordered the construction of a wall along the border line between the Central Plain and the lands of the nomads. By this point, the fragments of the future Great Wall were arranged randomly and resembled patterns made by woodworms. Some of them became part of the Great Wall, and some were abandoned and gradually demolished. The Great Wall was built simultaneously in many places, and the materials, construction technologies, and organization based on the features of the local landscape were not brought to any uniformity. The huge project was divided into twelve provinces, which were supervised by different officials.

будущей функциональной основы модели.

Вторым шагом стала обработка данных. Недостающие данные были вычислены методом импутации. Затем все данные приведены к единому виду путем перевода их измерения в условные баллы. Для этого максимальному значению каждого параметра присваивается значение 100 условных баллов, а минимальному – 0 условных баллов, после чего все параметры пересчитываются в нормированный вид. Переход к бинарному кодированию данных помогает их обработке компьютерными методами. Кодирование One-hot выполняется для того, чтобы категориальные переменные можно было легко использовать в моделях машинного обучения, где можно достичь истинного и справедливого представления. Наличие хорошо структурированного и обработанного набора данных имеет ключевое значение в построении надежных прогностических моделей для устойчивого городского планирования.

Рамки данной статьи не позволяют нам подробно изложить каждый шаг в построении модели. Упомянем только, что в ходе эксперимента мы апробировали три распространенных алгоритма моделирования. Выбор модели подчеркивал интерпретируемость и точность прогнозирования, фокусируясь на алгоритмах Дерева решений (ДР), Случайных лесах (ЛС) и Искусственных нейронных сетях (ИНС):

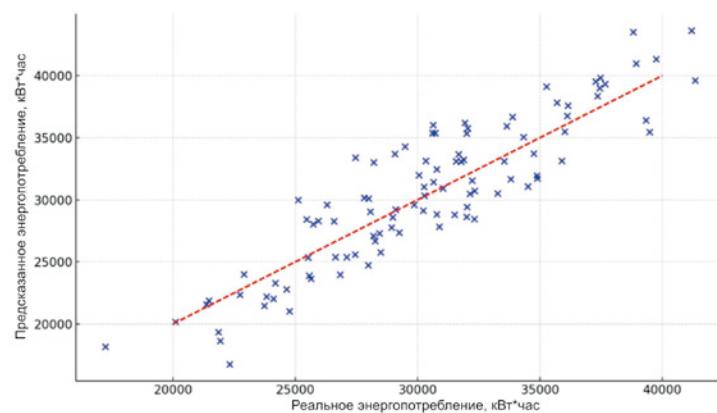
1. Деревья решений (ДР) обеспечивают интерпретируемость посредством рекурсивных бинарных разделений, используя такие метрики, как индекс Джини или прирост информации для достижения однородных группировок.

2. Случайные леса (СЛ) используют ансамблевый подход для обработки многомерных данных, объединяя несколько деревьев для повышения точности и смягчения переобучения.

3. Искусственные нейронные сети (ИНС) преуспевают в моделировании сложных нелинейных отношений с помощью многослойных архитектур с нелинейными функциями активации (например, ReLU, сигмоида).

Для повышения качества прогностического модели в каждом из вариантов мы использовали алгоритм Строительства Великой китайской стены (СВКС). Качество моделей определялись по двум параметрам:

в Рис. 2. Сопоставление параметров, предсказанных моделью, с реальными / Fig. 2. Comparison of the parameters predicted by the model with the real ones



In the following centuries, administrations also continued to use a similar approach to complete the entire enterprise. The choice of construction methods (including the organization of work) remained with local officials, although sometimes government officials of the highest rank were involved in the construction of the Wall. For example, the famous general Qi Jiguang from the Ming Dynasty (1368-1644 AD) was once responsible for the construction of a wall fragment near Beijing.

The result of this centuries-old construction was an object with a total length of either 8 or 21 thousand kilometers. The discrepancy in estimates is caused precisely by the fact that the wall does not represent a single object, but rather looks like a collection of heterogeneous fragments. Some fragments look quite economical and

justified, especially those where the wall only reinforces natural obstacles to the movement of enemy troops, using terrain folds and mountain cliffs. But there are also sections of the Wall that are striking in their excessive monumentality and wastefulness. There is still debate about whether the construction of the Great Wall was justified from an economic, political and military point of view (Man, 2008).

The algorithm of the "Construction of the Great Wall of China" today looks like an element of the cultural heritage of Chinese civilization paradoxically inscribed in the latest programming methods based on the dialogue between man and machine.

### 3. Modeling with fundamentally heterogeneous parameters – the Amman case

In our experiment, we developed a model that includes extremely heterogeneous

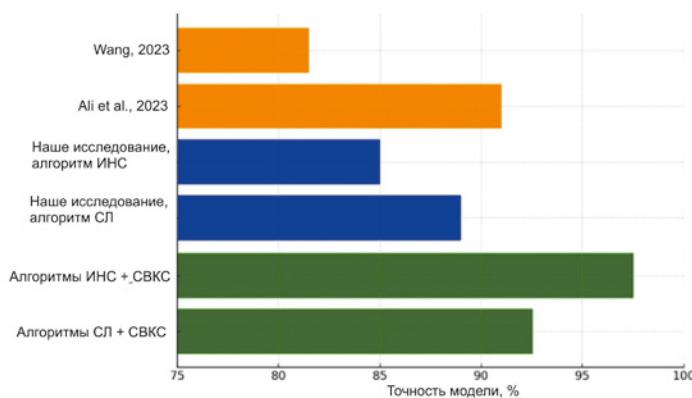
parameters of the city, namely energy efficiency (specific energy consumption for regulating the temperature inside buildings) and the value of these buildings as objects of cultural and historical heritage. Whereas the energy efficiency measurement is hardware (objective) and accurate, the cultural and historical value parameter is fully based on expert opinion and does not have a generally accepted measurement scale.

Fig. 1 shows a general scheme for creating and verifying the adequacy of the model.

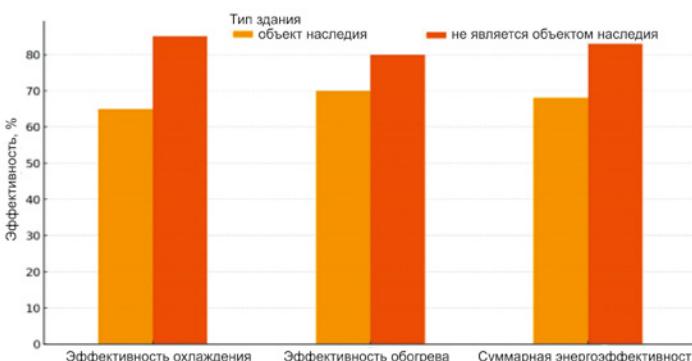
The first step is to collect the necessary data as much as possible. As a source of primary data, we used official documents of the city administration, as well as the results of a survey conducted by a group of experts in the field of cultural and historical heritage. Then the collected data was compiled, that is, grouped into groups according

to meaning, their quality was checked by cross-matching (data that contradict each other were excluded). Also, at the first stage, the general form of the future functional basis of the model was outlined.

The second step was data processing. The missing data was calculated by the imputation method. Then all the data was brought into a single form by converting their measurements into conditional scores. To do this, the maximum value of each parameter is assigned a value of 100 conditional points, and the minimum value is 0 conditional points, after which all parameters are recalculated to a normalized form. The transition to binary encoding of data helps to process them using computer methods. One-hot encoding is performed so that categorical variables can be easily used in machine learning models where a true and



<sup>^</sup> Рис. 3. Сравнение качества модели в нескольких вариантах как из литературных данных [12, 13], так и авторской модели с использованием алгоритма СВКС и без него / Fig. 3. Comparison of the quality of the model in several variants, both from the literature data (Wang, 2023; Ali et al., 2023), and the author's model using the GWCA algorithm and without it



<sup>^</sup> Рис. 4. Сравнение параметров энергоэффективности для двух типов зданий / Fig. 4. Comparison of energy efficiency parameters for two types of buildings

точность и полнота. Точность и полнота – это то, что определяет производительность модели по отношению к определенным классам, особенно для несбалансированных наборов данных. Точность – это отношение истинно положительных результатов ко всем предсказанным положительным результатам; полнота – это отношение истинно положительных результатов ко всем положительным результатам в реальности.

Результаты сопоставления свойств полученных моделей показаны на рис. 2, 3. Как видно из рис. 3, использование алгоритма СВКС значительно повышает качества метаэвристической модели.

Один из наиболее неожиданных результатов нашего эксперимента был получен сопоставлением энергоэффективности зданий с их культурно-исторической ценностью (рис. 4). Общим местом стало утверждение, что традиционные методы домостроения в Иордании включают весьма эффективные приемы пассивного регулирования внутренней температуры. Такие устройства, как перфорированный фасад «машрабия» или ветровая башня «бадгир» широко известны и исследованы [14]. Тем не менее наша модель однозначно показала пониженную энергоэффективность зданий, относящихся к наследию.

Возможно, данный эффект вызван плохим состоянием культурно-исторического наследия. Возможно также, что в списках наследия в Аммане оказалось слишком большое количество объектов,

относящихся к колониальным периодам истории страны (османскому и британскому), когда архитектура испытывала сильное внешнее влияние. Во всяком случае, полученный результат стимулирует дальнейшие исследования в данной области.

### Заключение

Использование эвристических и метаэвристических алгоритмов для моделирования городов – это новая и бурно развивающаяся область прикладной математики. Она позволит объединить огромные массивы данных – от космических снимков поверхности Земли в разных спектральных диапазонах до результатов исторических, социологических и психологических исследований. Именно на этом направлении мы видим реальную перспективу построения таких моделей, которые смогут стать мощным инструментом планирования и управления развитием городов. Предсказательные способности таких моделей позволят «с открытыми глазами» искать оптимальные решения в поисках равновесия между требованиями комфорта городской среды, экономного отношения к ресурсам и бережного сохранения культурного наследия.

Впрочем, как показывает пример алгоритма Строительства Великой стены, историко-культурное наследие само по себе может принять неожиданное и весьма результативное участие в процессах создания и совершенствования моделей умных, устойчивых и успешных городов будущего.

fair representation can be achieved. Having a well-structured and processed dataset is key to building reliable predictive models for sustainable urban planning.

The scope of this article does not allow us to describe in detail every step in building a model. Let's just mention that during the experiment we tested three common modeling algorithms. The choice of model emphasized interpretability and accuracy of forecasting, focusing on Decision Tree algorithms (DT), Random Forests (RF), and Artificial Neural Networks (ANN):

1. Decision trees (DT) provide interpretability through recursive binary separations, using metrics such as the Gini index or information gain to achieve homogeneous groupings.

2. Random Forests (RF): Use an ensemble approach to process multidimensional data, combining multiple trees to increase accuracy and mitigate overfitting.

3. Artificial Neural Networks (ANN) excel at modeling complex nonlinear relationships

using multilayer architectures with nonlinear activation functions (for example, ReLU, sigmoid).

To improve the quality of the predictive model in each of the variants, we used the Great Wall of China Construction Algorithm (GWCA). The quality of the models was determined by two parameters - accuracy and completeness. Accuracy and completeness are what determine the performance of the model in relation to certain classes, especially for unbalanced datasets. Accuracy is the ratio of truly positive results to all predicted positive results; completeness is the ratio of truly positive results to all positive results in reality.

The results of comparing the properties of the obtained models are shown in Figures 2 and 3. As can be seen from Fig. 3, the use of the GWCA algorithm significantly improves the quality of the metaheuristic model.

One of the most unexpected results of our experiment was a comparison of the energy efficiency of buildings with their cultural

and historical value (Fig. 4). A common statement has become that the traditional methods of housebuilding in Jordan include very effective methods of passive regulation of internal temperature. Devices such as the perforated Mashrabiya facade or the Badgir wind tower are widely known and researched (Al-Ruwaishedi et al., 2024). Nevertheless, our model clearly showed the reduced energy efficiency of heritage buildings. Perhaps this effect is caused by the poor state of cultural and historical heritage. It is also possible that the heritage lists in Amman contain too many objects dating back to the colonial periods of the country's history (Ottoman and British), when architecture was strongly influenced by outside influences. In any case, the obtained result stimulates further research in this field.

#### Conclusion

The use of heuristic and metaheuristic algorithms for modeling cities is a new and rapidly developing field of applied mathematics. It will allow combining huge amounts of

data, from satellite images of the Earth's surface in different spectral ranges to the results of historical, sociological and psychological research. It is in this area that we see a real prospect of building such models that can become a powerful tool for planning and managing urban development. The predictive abilities of such models will allow us to look for optimal solutions "with our eyes open" in search of a balance between the requirements of a comfortable urban environment, economical use of resources and careful preservation of cultural heritage.

However, as the example of the Great Wall Construction algorithm shows, the historical and cultural heritage itself can take an unexpected and very effective part in the processes of creating and improving models of smart, sustainable and successful cities of the future.

## Литература

1. Burgess, E. W. The Growth of the City: An Introduction to a Research Project // Publications of the American Sociologist Society. – 1924. – Vol. 18. – P. 142–155.
  2. Hoyt, H. The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities. – Chicago, IL : Chicago University Press, 1939. – 189 pp.
  3. Alonso, W. Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent. – Cambridge, MA : Harvard University Press, 1965. – 204 p.
  4. Fujita, M., Krugman, P.R., Venables, A. The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade. – Cambridge, MA : Mit Press, 1999. – 366 p.
  5. Blumenfeld, H. A Theory of City Form. // Society of Architectural Historians Journal. – July. – 1949. – Vol. 80, № 3–4. – P. 7–16.
  6. Гутнов, А. Эволюция градостроительства. – Москва : Стройиздат, 1984. – 256 с.
  7. Moreno C. The 15-Minute City: A Solution to Saving Our Time and Our Planet. Hoboken, NJ: Wiley, 2024. – 304 pp.
  8. Batty, M. The Computable City. Histories, Technologies, Stories, Predictions. – Cambridge, MA : Mit Press, 2024. – 544 pp.
  9. Sharifi, A., Khavarian-Garmsir, A. R., Allam, Z., Asadzade, A. Progress and prospects in planning: A bibliometric review of literature in Urban Studies and Regional and Urban Planning, 1956–2022. // Progress in Planning. – 2023. – Volume 173. – P. 100740.
  10. Guan, Z., Ren, C., Niu, J., Wang, P. & Shang, Y. Great Wall Construction Algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for engineer problems // Expert Systems with Applications. – 2023. – 233. – P. 120905.
  11. Man, J. The Great Wall. The extraordinary history of China's wonder of the world. – London : Bantam Press, 2008. – 352 p.
  12. Wang, P. System for Urban Construction and Model Optimization Based on Machine Learning Algorithms. 2023 International Conference on Evolutionary Algorithms and Soft Computing Techniques (EASCT). – Bengaluru, India. 2023. – P. 1–6.
  13. Ali, U., Bano, S., Shamsi, M. H., Sood, D., Hoare, C., Zuo, W., Hewitt, N., & O'Donnell, J. Urban building energy performance prediction and retrofit analysis using data-driven machine learning approach // Energy and Buildings – 2023. – P. 113768.
  14. Mais Radhi Al-Ruwaishedi et al. Metamorphosis of the traditional dwelling // Project Baikal. – 2024. – № 2 (80). – P. 114–119. – DOI:10.51461/issn.2309-3072/80.2341
- References**
- Ali, U., Bano, S., Shamsi, M. H., Sood, D., Hoare, C., Zuo, W., Hewitt, N., & O'Donnell, J. (2023). Urban building energy performance prediction and retrofit analysis using data-driven machine learning approach. *Energy and Buildings*, 113768.
  - Alonso, W. (1965). *Location and Land Use: Towards a General Theory of Land Rent*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
  - Al-Ruwaishedi, M. R. et al. (2024). Metamorphosis of the traditional dwelling. *Project Baikal*, 21(80), 114-119.
  - Batty, M. (2024). *The Computable City. Histories, Technologies, Stories, Predictions*. Cambridge, MA: Mit Press.
  - Blumenfeld, H. (1949, July). A Theory of City Form. *Society of Architectural Historians Journal*, 80(3-4), 7-16.
  - Burgess, E.W. (1924). The Growth of the City: An Introduction to a Research Project *Publications of the American Sociologist Society*, 18, 142–155.
  - Fujita, M., Krugman, P.R., & Venables, A. (1999). *The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade*. Cambridge, MA: Mit Press.
  - Guan, Z., Ren, C., Niu, J., Wang, P., & Shang, Y. (2023). Great Wall Construction Algorithm: A novel meta-heuristic algorithm for engineer problems. *Expert Systems with Applications*, 233, 120905.
  - Gutnov, A.E. (1984). *Evolutsiya gradostroitel'stva [Evolution of urban development]*. Moscow: Stroyizdat.
  - Hoyt, H. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities*. Chicago, IL: Chicago University Press.
  - Man, J. (2008). *The Great Wall. The extraordinary history of China's wonder of the world*. London: Bantam Press.
  - Moreno, C. (2024) *The 15-Minute City: A Solution to Saving Our Time and Our Planet*. Hoboken, NJ: Wiley.
  - Sharifi, A., Khavarian-Garmsir, A. R., Allam, Z., & Asadzade, A. (2023). Progress and prospects in planning: A bibliometric review of literature in Urban Studies and Regional and Urban Planning, 1956–2022. *Progress in Planning*, 173, 100740.
  - Wang, P. (2023). System for Urban Construction and Model Optimization Based on Machine Learning Algorithms. 2023 International Conference on Evolutionary Algorithms and Soft Computing Techniques (EASCT) (pp. 1-6). Bengaluru, India.