

---

**Раздел 1**  
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

---

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**  
**ДЛЯ ПОИСКА КРАТЧАЙШИХ ОСТОВНЫХ ДЕРЕВЬЕВ**  
**В УМНОМ ГОРОДЕ**

**А. Л. Абрамов<sup>1</sup>, П. А. Пугач<sup>2</sup>, В. С. Тынченко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

<sup>2</sup>*Российская таможенная академия, Владивостокский филиал, Россия*

<sup>3</sup>*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия*

E-mail: abramov.al@dvfu.ru, 679097@mail.ru, vadimond@mail.ru

В работе рассмотрена программная реализация модуля в программно-техническом комплексе прикладного искусственного интеллекта RAZUM AI, позволяющего построить первичную графовую модель города с помощью библиотеки языка python с открытым исходным кодом OSMnx, и решить задачу поиска кратчайших остовных деревьев.

**USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO SEARCH**  
**SHORTEST SPANNING TREES IN A SMART CITY**

**A. L. Abramov, P. A. Pugach, V. S. Tynchenko**

The paper discusses the software implementation of the module in the software and hardware complex of applied artificial intelligence RAZUM AI, which allows you to build a primary graph model of the city using the python language library with open source code OSMnx, and solve the problem of finding shortest spanning trees.

Термин «умный город» появился в конце прошлого – начале текущего века, когда многие города стали работать над использованием теории графов и сетей с целью повышения связности, чтобы повысить производительность в городах и придать им цели устойчивого развития [1].

Любой город можно представить в виде сети, в которой решаются различные вопросы: размещение социальной, экономической, транспортной, производственной и энергетической инфраструктуры; расположение служб первой и другой необходимости; оценки стоимости земли и недвижимости [1].

Следовательно, пространство регионов и страны также можно смоделировать как «сеть сетей», в которой каждый отдельный город моделируется собственной сетью. Математические модели подобных пространственных структур рассматриваются в теории сложных сетей. В отношении городов модель сложной сети образует определенную иерархию, на нижнем уровне которой располагается первичный граф, отображающий уличные сети [2].

Разработка архитектуры и элементов искусственного интеллекта (ИИ) является актуальной научной и практической задачей, находящейся на стыке нескольких отраслей экономики, среди которых исследование динамики эпидемий, являющейся одной из важнейших и актуальнейших областей эпидемиологии и общественного здравоохранения. Оно направлено на моделирование процессов в умных городах. Такие исследования позволяют органам исполнительной власти, ученым и общественным организациям более эффективно реагировать на возникающие угрозы и разрабатывать меры по развитию городов.

Для реализации данного подхода используется программно-технический комплекс RAZUM AI, предназначенный для обработки данных любого типа, как структурированных, так и неструктурированных, который позволяет строить модели для решения задач предиктивной аналитики в различных сферах деятельности, платформа позволяет выполнять полный цикл data science [4].

**Постановка задачи.** К настоящему моменту в рамках RAZUM AI реализованы элементы технологии построения умного города, как сети сетей, в связи с тем, что Умные города будущего будут использовать технологии для более эффективного предоставления следующих видов: умной социальной инфраструктуры, инфраструктуры в на транспорте, водоснабжении, утилизации отходов, обеспечения коммунальными услугами, обеспечения безопасности, в энергетике, информатике и др. Помимо повышения эффективности, умные города стремятся улучшить равенство и качество жизни для жителей.

Обмен данными в умном городе представляет собой циклическую модель, включающую ввод и анализ данных, автоматизированное принятие решений, обмен данными, корректировки действий машин и людей, дальнейший сбор данных, стремление к автоматизированному управлению жизнедеятельностью.

Ввод данных осуществляется из нескольких источников: автоматизированные системы и человеческие источники, включая датчики, камеры и интеллектуальные устройства; интерфейсы прикладных программ, приложения, интернет и терминалы. После получения данных цикл обмена данными в умном городе переходит к интеграции данных, моделированию, анализу (часто с использованием искусственного интеллекта и машинного обучения), принятию и обмену решениями.

ИИ-технологии умного города, используют датчики, интеллектуальные устройства и другие методы ввода, генерируют гораздо больше данных, чем когда-либо, лица, принимающие решения, уже не могут эффективно анализировать только людьми. Способность ИИ очень быстро обрабатывать и интегрировать огромные объемы данных делает его ключевым компонентом систем умных городов.

ИИ может быть особенно полезен в следующих системах: интеллектуальные транспортные системы, использующие подключенные и автономные транспортные средства и системы управления дорожным движением; энергетические системы зданий с аналитикой и автоматизацией всего здания, умные дома, взаимодействующие с интернет; электросетями, использующие управление спросом,

прогнозирование и оптимизацию генерации; а также управление отходами и ценообразование по требованию для коммунальных услуг и др., т.е. как сеть сетей.

Разработка модуля ИИ на базе RAZUM AI и на его основе приложения по загрузке графовых данных на платформу, автоматизации обработки и преобразования данных, а затем обучение прикладного ИИ алгоритмам решения задач поиска покрывающих деревьев, в том числе минимального веса, обусловлена высокой эффективностью систем ИИ для решения задач в умном городе (рис.).



Модуль решения экстремальных задач на графах в умном городе на базе RAZUM AI

В последствии эти результаты могут быть применены в системах непрерывного планирования в умном городе, как сети сетей.

Продемонстрируем работу модуля решения экстремальных задач на графах. Для этого рассмотрим графовую модель города, которая представляет собой граф транспортной сети, в которой перекресткам поставлены в соответствие вершины графа, а дорожное полотно между ними – это ребра, инцидентные соответствующим вершинам, причем и вершинам, и ребрам могут соответствовать определенные веса, представляющие собой стоимости выполнения определенных обязательств или препятствий [3-6].

Такой содержательной постановке соответствует следующая задача построения минимального покрывающего дерева (кратчайшего остовного дерева).

Рассмотрим алгоритм прикладного искусственного интеллекта, который строит кратчайшее остовное дерево. Математическая постановка задачи поиска минимального покрывающего остовного дерева имеет следующий вид. Пусть

дан связный взвешенный без петель граф, необходимо найти его отображение в подграф, являющийся кратчайшим остовным деревом  $G_p$ , сумма весов ребер которого минимальна ( $A_p$  – множество ребер в кратчайшем остовном дереве,  $C_k^p$  – веса ребер, входящих в кратчайший остов):

$$\psi: G = (V, A) \rightarrow \left\{ G_p = (V, A_p) \mid A_p \subseteq A, \min_A \sum_{k=0}^p C_k^p \right\}$$

Такая задача может быть решена с использованием алгоритмов ИИ, реализующих различные стратегии роста наикратчайшего остовного дерева.

Первый из этих алгоритмов – алгоритм ИИ, который строит кратчайшее остовное дерево так, что на каждом шаге оно не обязательно является связным – SDCSTA. Вычислительная сложность алгоритма SDCSTA равняется  $O(m \log_2 m)$ , где  $m$  число ребер в графе [3].

Второй алгоритм ИИ строит кратчайшее остовное дерево так, что на каждом шаге оно обязательно является связным – SCSTA. Вычислительная сложность этого алгоритма равна  $O(m)$ , где по-прежнему  $m$  число ребер в графе [3].

Для реализации алгоритмов SDCSTA, SCSTA в 2022-2024 гг. была проведена работа по обучению прикладного ИИ «BAUM AI» [4; 5], а с 2023 г. и далее – на платформе ИИ «RAZUM AI» алгоритмам построения кратчайшего остовного дерева на примере графовых моделей городов [4;5;7]. Таким образом, на платформе, в рамках модуля решения экстремальных задач на графах, для пользователей появилась возможность строить пайплайны, взаимодействующие с графовыми моделями и позволяющими на одних тех же наборах данных решать задачи планирования с применением различных алгоритмов.

Пайплайны позволяют пользователю, не владеющему языками программирования, решать задачи непрерывного планирования, основанные на задачах размещения, включая задачи целеполагания, прогнозирования и программирования социально-экономического развития в различных предметных областях, в частности, для умных регионах и городах.

В целом, в рамках модуля пайплайны создаются на платформе ИИ для автоматизации обработки и преобразования графовых данных для решения задач непрерывного планирования в умных городах, включая:

1. Извлечение данных из различных источников (баз данных, текстовых файлов, социальных сетей и др.).
2. Предобработка данных (очистка, преобразование, нормализация и т.п.).
3. Создание графовых моделей с использованием библиотек обработки графов (NetworkX, OSMNx).
4. Преобразование графов для решения различных задач, таких как анализ сети, оптимизация, машинное обучение [6, с. 112; 7, с. 140].

### **Заключение**

Отечественный прикладной искусственный интеллект в результате работы, проведенной в рамках создания модуля решения экстремальных задач на графах на базе RAZUM AI и приложения на его основе по загрузке графовых

данных на платформу, автоматизации обработки, преобразования данных и вывода результата на дашборд, обучен алгоритмам нахождения кратчайшего остовного дерева (алгоритмы SDCSTA, SCSTA) для решения задач на графовых моделях различных объектов.

К подобным объектам относятся умные регионы и города, которые могут быть представлены как вершины, связанные экономическими, финансовыми, транспортными, информационными и другими потоками, соответствующими ребрам сети, т.е. в виде «сети сетей» или сложной сети.

С помощью модуля пользователи без навыков кодирования, применяя обученную систему искусственного интеллекта, могут решать задачи планирования.

Применение модуля подготавливает взаимодействие сложной сети и системы управления, которое осуществляют не напрямую, а через органы управления, детализирующие правила поведения внутри сети в отношении вершин сетей и подсетей разного уровня иерархии. Работа модуля помогает формализовать протоколы сетевого взаимодействия, устанавливающие требования к формату коммуникаций в сложных сетях.

Использование модуля кроме подготовки к передаче «управляющих сигналов» в сложной сети может помочь реализовывать множество других взаимодействий. В этом качестве сложная сеть выступает в роли многоканального ретранслятора, обеспечивающего связь «всех со всеми».

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации и достижения результатов федерального проекта «Передовые инженерные школы» (№ 075-15-2022-1143 от 07.07.2022 г.) в рамках соглашения, заключенного ПИШ ИББиПС ДВФУ и МГТУ им. Н.Э. Баумана.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Batty M., Axhausen K., Fosca G., Pozdnoukhov A., Bazzani A., Wachowicz M., Ouzounis G., Portugali Y. Smart cities of the future [Electronic resource]. URL: <http://www.complex-city.info/files/2013/08/BATTY-EPJST-2012.pdf> // Eur. Phys. J. Special Topics. 2012. Vol. 214. p. 481-518. (access date: 25.09.2024).

2. *Абрамов А. Л., Пугач П. А., Тынченко В. С.*, Использование прикладного искусственного интеллекта для поиска кратчайших путей в городе // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. 2023. № 8. С. 8-13.

3. *Абрамов А. Л., Пугач П. А.*, Графовые модели городов // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками. 2021. № 6. С. 3-7.

4. Liu X., Derudder B., Witlox F., Hoyler M. Cities As Networks within Networks of Cities: The Evolution of the City. Firm-Duality in the World City Network, 2000–2010 // Journal of Economic and Human Geography. 2014. Vol.105. Is. 4. P. 465-482.

5. Проект Цифровизации городского хозяйства «Умный город». [Электронный ресурс]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyu-gorod/> (дата обращения: 10.09.2023).

6. BAUM AI. [Электронный ресурс]. URL: <https://bauminform.ru/ai/platform> (дата обращения: 10.09.2023).