
Раздел 1
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ ГОРОДОВ

А. Л. Абрамов¹, П. А. Пугач²

¹*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

²*Российская таможенная академия, Владивостокский филиал, Россия*

E-mail: abramov.al@dvvfu.ru, 679097@mail.ru

В работе рассмотрены подходы к построению первичных графовых моделей городов (ПГМГ). Экономическое пространство региона или страны может моделироваться как «сеть сетей» городов, где каждый из них также представляется в виде «сети сетей» существенных городских элементов. Адекватные математические модели подобных пространственных структур рассматриваются в теории сложных сетей.

Для формирования ПГМГ в работе используется алгоритм, созданный на базе библиотеки OSMnx, которая позволяет загружать и визуализировать пространственные данные, анализировать реальные уличные сети и строить с их использованием первичные графовые модели.

GRAPH MODELS OF THE CITIES

A. L. Abramov, P. A. Pugach

The paper considers approaches to the construction of primary graph models of cities (PGMC). The economic space of a region or country can be modeled as a “network of networks” of cities, where each of them is also represented as a “network of networks” of essential urban elements. Adequate mathematical models of such spatial structures are considered in the theory of complex networks.

To form the PGMC, algorithm is used in the work, created on the basis of the OSMnx library, which allows you to load and visualize spatial data, analyze real street networks and build primary graph models using them.

Развитие существующих городов и строительство новых является актуальной проблемой для Дальнего Востока России. Для ее решения требуются исследования моделей целеполагания, прогнозирования, планирования и программирования возможностей их социально-экономического роста.

Экономическая теория и практика демонстрирует разнообразие типов и моделей городов. При этом исследования их множества и систематизация городского жизненного цикла является важной задачей в связи с тем, что процесс роста декомпозируется на этапы, на каждом из которых осуществляется поиск лучших решений. Эти практики затем могут быть перенесены на другие города, вступающие в соответствующие этапы развития [1].

В данный момент существуют разнообразные классификации моделей го-

родов: креативные, культурные, адаптивные, спортивные, «зеленые», здоровые, умные, устойчивого развития, города будущего и другие [2].

Множество городов может быть представлено узлами (вершинами) в некотором взаимодействии экономических отношений. Вершины и циркулирующие между ними экономические, финансовые, транспортные, информационные и другие потоки, отображаемые связями между вершинами-городами являются структурным (пространственным) видением региона или страны в целом, которое можно рассматривать, как сеть городов.

С другой стороны, сам город может быть представлен как сеть, на которой решаются задачи размещение социальной, экономической, производственной, транспортной, инженерной, энергетической инфраструктуры, оценки стоимости земли, недвижимости, задачи размещение служб первой и не первой необходимости и т.д.

Следовательно, пространство региона или страны может моделироваться как «сеть сетей» городов, в которой любой город представляется как сеть расселения жителей, различных инфраструктур, также взаимодействующих между собой, т.е. тоже в виде «сети сетей» существенных городских элементов [3].

Таким образом, в реальных ситуациях экономического анализа пространство региона и пространство города в существенной степени выступает как дискретное пространство. Адекватные математические модели подобных пространственных структур рассматриваются в теории сложных сетей [4].

В отношении городов модель сложной сети образует определенную иерархию сетей, на нижнем уровне которой располагается первичный граф, в котором вершины и ребра являются элементами, расположенными в пространстве, снабжённом определенной метрикой [5]. Такие графы, могут отображать как геометрические, так и топологические свойства реальной системы расселения жителей, уличной сети и др.

Под первичной графовой моделью города G будем понимать пару множеств (V, E) , где V это множество вершин, в нашем случае перекрестков, которые связаны друг с другом набором ребер E , в нашем случае это - отрезки улиц, соединяющих перекрестки.

Важными аспектами при построении первичной графовой модели города (ПГМГ) является наличие качественных данных и пакетов прикладных программ с открытым исходным кодом, формирующих их. Часто для построения графов и решения на них аналитических задач используются модели машинного обучения и алгоритмы, в частности, программные продукты TensorFlow, Scikit Learn и инструмент анализа, структур сложных сетей NetworkX. Однако эти и подобные программные системы не позволяют обеспечить точность и необходимый охват связанных данных.

В данной работе исходные данные для генерации ПГМГ были получены из OpenStreetMap (OSM) – совместного картографического проекта, базы данных с открытым исходным кодом, который предоставляет данные об улицах, перекрестках, и других пространственных объектах. Он обеспечивает глобальный охват и качество геометрических и топологических данных [6]. По состоя-

нию на 2021 год OSM имеет более 7 млн участников, которые добавили более 6,6 млрд. узлов (вершин), 730 млн линий (границ) и сопутствующих атрибутов в базу данных.

Первичные графовые модели городов строились с помощью OSMnx – библиотеки языка python с открытым исходным кодом [7]. Она позволяет: визуализировать и автоматически загружать границы муниципального образования; скачивать и моделировать уличные сети, при необходимости упрощая топологию; сохранять локально полученные модели уличных сетей в формате SVG, GraphML или shape-файлов; проводить анализ сетей: решая задачи маршрутизации, и производя расчет сетевых статистик [8, 9]:

```
import osmnx as ox
import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt
%matplotlib inline
import os
cities = ['Moscow', 'Vladivostok', 'Beijing', 'Harbin', '', 'Pusan', 'Sapporo']
for i in range(len(cities)):
    G = ox.graph_from_place(cities[i], network_type='drive')
    print("Город:", cities[i], ", Число вершин = ", len(G.nodes), ", Число ребер = ", len(G.edges))
    fig, ax = ox.plot_graph(G, node_color="w", node_size=9, edge_color="g", edge_linewidth=1)
    path = '/content/drive/MyDrive/Графы Прим кр/' + cities[i]
    !mkdir(path)
    ox.save_graphml(G, filepath = cities[i] + '_street_network.graphml')
    ox.save_graph_xml(G, filepath = cities[i] + '_street_network.osm')
    ox.save_graph_shapefile(G, filepath = path)
```

Листинг 1. Алгоритм построения первичных графовых моделей городов

Фрагмент кода из листинга 1 на языке Python демонстрирует алгоритм построения первичных графовых моделей городов: Москвы, Владивостока, Пекина, Харбина, Пусана и Саппоро (рис.1). Для построения первичной графовой модели необходимо передать в функцию `graph_from_place()` библиотеки OSMnx название места, для которого OSM имеет данные о границах, и алгоритм автоматически загрузит и построит уличную сеть в пределах этой границы.

Полученная ПГМГ формирует структуру экономических, информационных и других потоков, определяет перемещения людей, транспорта и товаров, лежащих в основе модели города как «сети сетей», в том числе содержит уличные сети, которые формируют город и организуют его физическое пространство [10].

Далее проводятся исследования первичной графовой модели города на планарность (свойство является основополагающим при моделировании транспортных сетей), вычисление показателей центральности (степень, близость, промежуточность, которые дают меру каждой вершине в графе и являются индикаторами их относительной важности [11, 12]), средней длины пути, распределения степеней, кластеризация, явления маленького мира, распределения степеней вершин, не является ли ПММГ случайным графом.

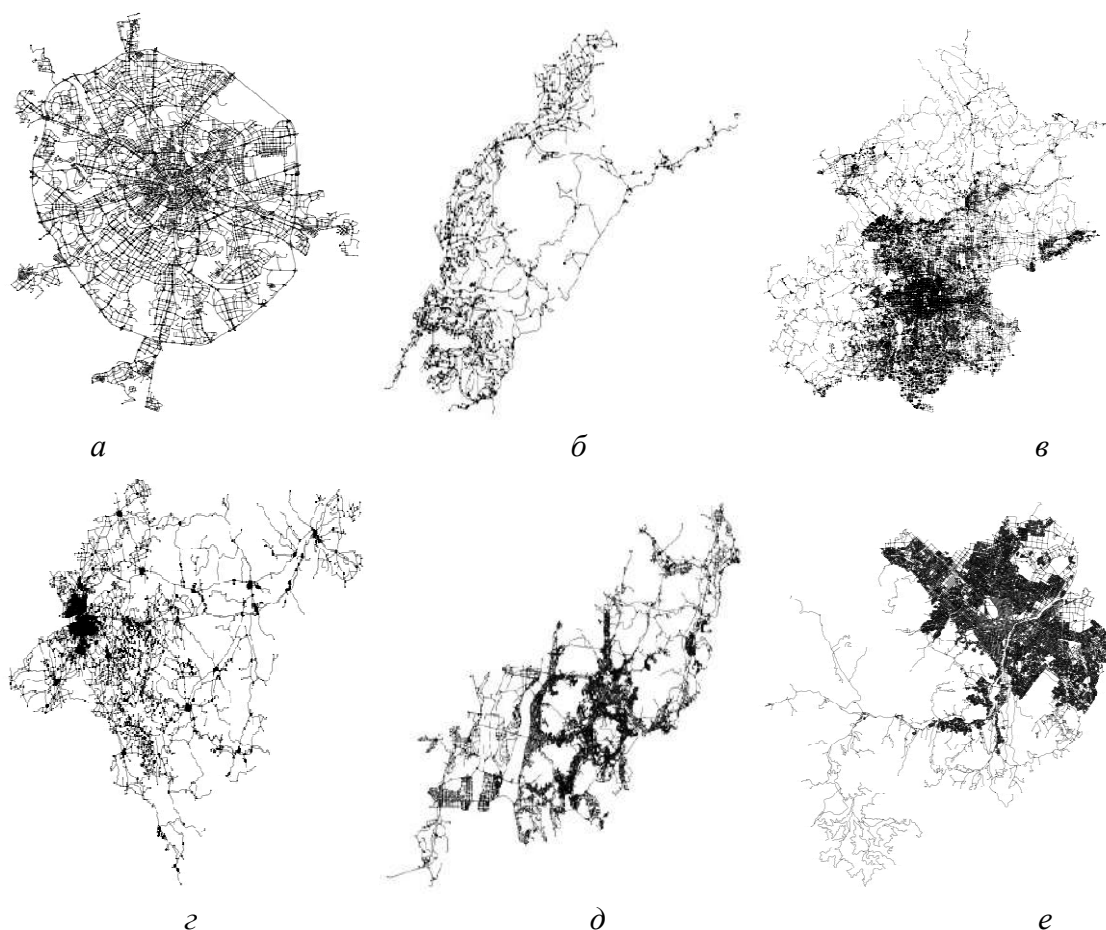


Рис. 2. Визуализация графовых моделей городов,
a – Москва, *б* – Владивосток, *в* – Пекин, *г* – Харбин, *д* – Пусан, *е* – Саппоро

После завершения исследования первичных графовых моделей городов строятся графовые модели второго и следующих уровней, обеспечивающих исследования городского жизненного цикла и его этапов, ориентированных на понимание различных явлений, влияющие на рост экономики города, жизнь и поведение человека в нем [13].

Заключение. В работе рассмотрены подходы к построению графовых моделей городов. Показано, что исследования множества моделей является важной задачей классификации и анализа этапов жизненного цикла городов.

Экономическое пространство города, региона или страны может моделироваться как «сеть сетей». Адекватные 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, в котором вершины и ребра являются элементами, расположенными в экономическом пространстве с определенной метрикой.

Для формирования первичной графовой модели города в работе используется алгоритм, созданный на базе библиотеки OSMnx, которая позволяет загружать и визуализировать пространственные данные, анализировать реальные

уличные сети и строить с их использованием первичные графовые модели.

Алгоритм автоматизирует сбор и анализ данных об уличных сетях, которые можно использовать в различных исследованиях городского пространства, начиная с планирования размещения экономики, всех видов инфраструктуры и заканчивая прогнозированием стоимости недвижимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Urban America: US Cities in the Global Economy // McKinsey Global Institute. 2012. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/urbanization/us-cities-in-the-global-economy> (дата обращения: 01.10.2021).
2. Longworth N. Learning Cities Dimensions. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.thersa.org/globalassets/pdfs/city-growth-commission/evidence/learning-city-dimensions.pdf> (дата обращения: 01.10.2021).
3. 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, Issue 4. P. 465-482.
4. Abramov A. L., Velichko A. S., Kozlovkaya A. K., Drekko E. V., Anoshkina M. A., Molochkova M. A. Graph models of complex networks // The 32nd International Conference of the Jangjeon Mathematical Society, 2019. Vol. 76 P. 5-8. [Электронный ресурс]. URL: DOI [dx.doi.org/10.24866/7444-4647-5](https://doi.org/10.24866/7444-4647-5) (дата обращения: 01.10.2021).
5. Barthelemy M. Spatial Networks // Physics Reports. 2011. Vol. 499 (1–3). P. 1–101.
6. Girres J.-F., Touya G. Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset // Transactions in GIS. 2010. Vol. 14 (4). P. 435–459.
7. OSMnx. [Электронный ресурс]. URL: <https://osmnx.readthedocs.io/en/stable/> (дата обращения: 01.10.2021).
8. Boeing G., OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks // Computers, Environment and Urban Systems. 2017. Vol. 65. P. 126–139. [Электронный ресурс]. URL: [doi:10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004](https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004) (дата обращения: 01.10.2021).
9. Boeing G., OSMnx: A Python package to work with graph-theoretic OpenStreetMap street networks // Journal of Open Source Software. 2017. Vol. 2 (12). [Электронный ресурс]. URL: [doi:10.21105/joss.00215](https://doi.org/10.21105/joss.00215) (дата обращения: 01.10.2021).
10. Boeing G. Street Network Models and Indicators for Every Urban Area in the World // Geographical Analysis. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://geoffboeing.com/publications/street-network-models-indicators-world> (дата обращения: 01.10.2021).
11. Newman MEJ The structure and function of complex networks // SIAM Rev. 2003. Vol. 45 (2). P. 167–256.
12. Crucitti P., Latora V., Porta S. Centrality measures in spatial networks of urban streets // Phys Rev. 2006. Vol. 73 (3). [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.036125> (дата обращения: 01.10.2021).
13. Scellato S., Cardillo A., Latora V., et al. The backbone of a city // Eur. Phys. J. Vol. 50. 2006. P. 221–225. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1140/epjb/e2006-00066-4> (дата обращения: 01.10.2021).