

---

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

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГОРОДОВ**

**А. Л. Абрамов, Ю. Р. Горик**

*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*  
E-mail: abramov.al@dvfu.ru, gorik.iur@students.dvfu.ru

В работе рассматриваются первичные графовые модели городов (ПГМГ) и подходы нахождения их статистических данных, которые в дальнейшем могут быть использованы для их классификации. А именно, для решения проблемы организации планирования новых городов и процесса улучшения уже существующих, с помощью распределения ПГМГ по типам градостроительных планировок.

Результаты, выполненные в работе, базируются на теории случайных графов и реализованы на высокоуровневом языке программирования Python на базе библиотек *OSMnx* и *igraph*.

**STUDY OF THE GRAPH MODELS OF CITIES**

**A. L. Abramov, I. R. Gorik**

The paper considers primary graph models of cities (PGMG) and approaches to finding their statistical data, which can later be used for their classification. Namely, to solve the problem of organizing the planning of new cities and the process of improving existing ones, by distributing PGMG by types of urban planning.

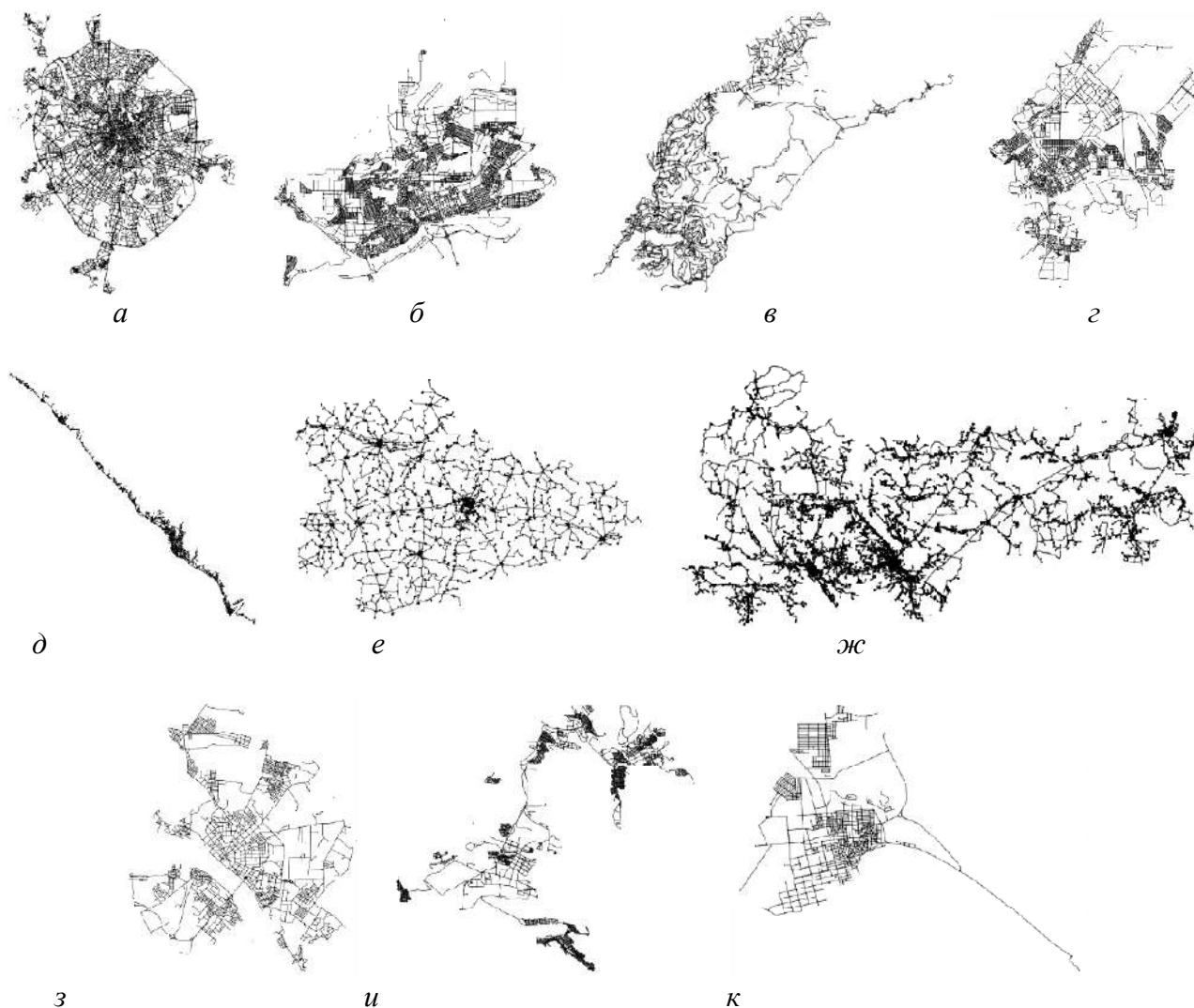
The results performed in the work are based on the theory of random graphs and implemented in the high-level Python programming language based on the *OSMnx* and *igraph* libraries.

В большинстве стран существует актуальная проблема организации планирования и строительства новых городов, а также развития уже существующих. Поэтому исследования множества их моделей и типов, а также систематизация городского жизненного цикла является неотъемлемой задачей социально-экономического развития городов. В работе рассматриваются первичные графовые модели городов (ПГМГ) и их статистические данные, которые в дальнейшем могут быть использованы для их классификации [1].

Для построения ПГМГ в качестве данных взяты города России с количеством населения превышающее 100 тысяч жителей на 1 января 2021 года, а именно – 172 города [2].

Формирование первичных графовых моделей городов производится с помощью алгоритма, созданного на базе библиотеки *OSMnx* [3], которая позволяет визуализировать и автоматически загружать пространственные данные, скачивать и моделировать уличные сети, сохранять локально полученные модели уличных сетей в формате SVG, GraphML или shape-файлов, проводить анализ

сетей: решая задачи маршрутизации и производя расчет сетевых статистик.



Визуализация графовых моделей городов: *а* – Москва, *б* – Ростов-на-Дону, *в* – Владивосток, *г* – Оренбург, *д* – Сочи, *е* – Курган, *ж* – Вологда, *з* – Кострома, *и* – Братск, *к* – Евпатория

Полученные ПГМГ содержат уличные сети, которые формируют город и организуют его физическое пространство. На их основе можно сформировать структуру экономических, информационных и других потоков, которые определяют перемещения людей, транспорта и товаров, лежащих в основе модели города как «сети сетей» [4]. Для этого проводится исследование каждой первичной графовой модели города на поиск её статистических данных.

```
import osmnx as ox
import igraph as ig
from igraph import Graph
```

```
cites = ['Москва', 'Ростов-на-Дону', 'Владивосток', 'Оренбург', 'Сочи',
        'Курган', 'Вологда', 'Кострома', 'Братск', 'Евпатория']
```

```

for i in range (len(cites)):
    G = ox.graph_from_place(cites[i], retain_all = True, simplify = True, network_type = 'drive')

    stats = ox.stats.basic_stats(G, area = None, clean_int_tol = None)
    print(cites[i], stats)

    g = ig.Graph.TupleList(G.edges(), directed = True)
    d = Graph.diameter(g)
    L = Graph.average_path_length(g)
    kk = Graph.components(g)
    print("Диаметр =", d, ", Средняя длина геодезической цепи =", L,
          ", Коэффициент кластеризации =", kk)

```

Данный фрагмент кода программы, написанный на языке программирования Python, выводит пакет основных описательных и топологических мер ПГМГ, а также более сложные статистические данные: диаметр, средняя длина геодезической цепи и коэффициент кластеризации.

Аналитические свойства библиотеки OSMnx включают в себя множество полезных функций для извлечения информации о сети. Поэтому для формирования первичного пакета данных о ПГМГ используется функция *stats.basic\_stats()*, параметры которой задают входной граф *G*, площадь (*area*) и количество консолидированных пересечений (*clean\_int\_tol*). Она вычисляет основные описательные геометрические и топологические меры графа.

Таблица 1

Первичные статистические данные ПГМГ

№	Название	Количество вершин	Количество ребер	Средняя степень вершины	Вероятность формирования ребра
1	Москва	17 201	35 869	4,1706	0,0003
9	Ростов-на-Дону	7 966	20 738	5,2066	0,0007
26	Владивосток	2 172	4 872	4,4862	0,0021
27	Оренбург	4 302	11 795	5,4835	0,0013
44	Сочи	3 680	7 877	4,2810	0,0012
63	Курган	30 288	80 716	5,3299	0,0002
65	Вологда	38 680	94 626	4,8928	0,0002
72	Кострома	2 037	5 356	5,2587	0,0026
88	Братск	3 968	10 490	5,2873	0,0013
154	Евпатория	1 002	2 940	5,8683	0,0059

Данный модуль определяет улицы как ребра в неориентированном представлении графа, что предотвращает двойной пересчёт двунаправленных рёбер (улиц с двусторонним движением). Но при этом может давать возможность двойного подсчета отдельных осевых линий разделенной дороги с разными конечными узлами.

Имеется ряд глобальных графических показателей, для которых требуется модуль *igraph*. Данный пакет имеет гораздо более широкие реализации методов обнаружения сообщества, чем остальные [5]. Для его использования про-

изводится генерацию графа из внешней библиотеки с помощью *Graph.TupleList(G.edges(), directed=True)*. Это интерфейс между *networkx* и *igraph*, который при передаче передает имена узлов. Так, *Graph.diameter()* выводит значение диаметра графа, *Graph.average\_path\_length()* – среднее значение геодезической цепи, а *Graph.count\_components()* – вычисляет количество компонент связности (число кластеров).

Таблица 2

Продвинутые статистические данные ПГМГ

№	Название	Диаметр	Средняя длина геодезической цепи	Число компонент связности
1	Москва	156	58,651	214
9	Ростов-на-Дону	144	54,414	19
26	Владивосток	106	33,786	16
27	Оренбург	104	40,970	6
44	Сочи	324	95,990	45
63	Курган	205	90,268	13
65	Вологда	467	182,925	54
72	Кострома	97	34,488	4
88	Братск	179	60,448	6
154	Евпатория	55	20,132	1

Исходя из полученных данных первичные графовые модели городов можно условно распределить по типам градостроительных планировок: радиальная, радиально-кольцевая (концентрическая), прямоугольная (шахматная), лучевая (звёздчатая), линейная (полосовидная), лепестковая (многоядерная), произвольная (иррегулярная), комбинированная. Что в дальнейшем позволит идентифицировать планировочные структуры, анализировать основные свойства и недостатки существующих городов и поможет при строительстве новых.

**Заключение.** В работе рассматриваются первичные графовые модели городов (ПГМГ) и подходы нахождения их статистических данных, которые в дальнейшем могут быть использованы для их классификации.

Экономическое пространство города, региона или страны может моделироваться как «сеть сетей». Математические модели подобных пространственных структур рассматриваются в теории сложных сетей. Только сети в реальном мире имеют определённые свойства, которыми не всегда обладают модели случайных графов.

Таким образом, в дальнейшем можно проводить анализ собранных данных об уличных сетях, чтобы использовать в различных исследованиях городского пространства, начиная с задачи классификации (типизации) городов и заканчивая прогнозированием этапов их жизненного цикла.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А. Л., Пугач П. А.* Графовые модели городов / М. : Управление по издательской деятельности Саратовского университета, 2021. 334 с.

2. Список крупнейших городов России. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.statdata.ru/largest\\_cities\\_russia](http://www.statdata.ru/largest_cities_russia) (дата обращения: 10.09.2022).
3. Библиотека OSMnx // [Электронный ресурс]. URL: <https://geoffboeing.com/2016/11/osmnx-python-street-networks/> (дата обращения: 10.09.2022).
4. *Xingjian L., 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. I. 4. P. 465-482.
5. По python-igraph. [Электронный ресурс]. URL: <https://igraph.org/python/versions/latest/> (дата обращения: 10.09.2022).