

СТРАТЕГИЯ РОСТА ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ ГОРОДОВ: ИСТОРИЧЕСКИЙ МЕТОД И МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ

А. Л. Абрамов¹, Ю. Р. Горик¹, П. А. Строганов²

¹*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия*

²*Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Россия*

E-mail: abramov.al@dvfu.ru, gorik.iur@dvfu.ru, pstroganov@emtc.ru

В работе рассматриваются последовательность графовых моделей (ГМ) города, охватывающая различные временные отрезки развития и отражающая основные этапы его роста. Для построения графовых моделей города использовались данные из библиотеки OSMnx и географические карты города различных исторических периодов (на примере Владивостока). В изучении роста ГМ использовались модели случайных графов: Барабаши-Альберта, Боллобаша-Риордана и методы машинного обучения. В частности, методами исследования были: полиномиальная регрессия и метод К-средних, которые применялись для обучения модели Барабаши-Альберта с целью нахождения новых вершин и ребер графа, а также их объединения в связные графы, отражающие рост ГМ в различные временные периоды. Результаты моделирования использовались в модели Владивостока для прогнозирования его развития до 2050 года, которое позволило оценить вероятные тенденции и направления развития города в будущем.

GROWTH STRATEGY FOR CITY GRAPH MODELS: HISTORICAL METHOD AND MACHINE LEARNING

A. L. Abramov, I. R. Gorik, P. A. Stroganov

The paper considers an increasingly complex sequence of graph models (GM) of a city, covering various time periods of its development and reflecting the main stages of its growth. To construct graph models of the city, data from the OSMnx library and geographical maps of the city from various historical periods (using Vladivostok as an example) were used. In studying the growth of GM, random graph models were used: Barabasi-Albert, Bollobash-Riordan and machine learning methods. In particular, the research methods were: polynomial regression and the K-means method, which were used to train the Barabasi-Albert model in order to find new vertices and edges of the graph, as well as their combination into connected graphs reflecting the growth of GM in different time periods. The modeling results were used in the Vladivostok model to predict its development until 2050, which made it possible to assess the probable trends and directions of the city's development in the future.

Ранее было определено, что города могут представляться как сети вершин, связанных между собой ребрами, которым соответствуют элементы различной инфраструктуры начиная с социальной и заканчивая транспортной и энергетической [1]. Таким образом, любой город может быть замоделирован в виде «сети сетей», или сложной сети существенных городских элементов, которая образует определенную иерархию [2,3]. Такие сложные сети, могут отображать как геометрические, так и топологические свойства реальной системы расселения, мест приложения сил, уличной сети и др. Одной из важнейших задач исследования городов является задача выявления закономерностей их роста во времени.

В данной работе была предпринята попытка проведения анализа применимости моделей роста графовых моделей для прогнозирования развития города.

Исторический метод. Для достижения этой цели изучалась динамика роста городской структуры на основе географических карт города, сделанных в различные временные периоды (на примере Владивостока). Далее планировалось разработать графовые модели, соответствующие картам, охватывающим различные временные этапы истории развития города, для чего использовались архивные данные [4,5].

Появившийся методологический вопрос о том, как построить графовые модели на основе низкокачественных исторических карт, осложняющий процесс трансформации ее в граф, оказался актуальным, несмотря на наличие современных цифровых технологий обработки и визуализации данных. Кроме того, сложности вызывали: изменчивостью названий улиц города со временем, отсутствие четких обозначений улиц на более старых картах, что осложняло автоматизированное формирование графовых моделей. Для преодоления этих сложностей было решено использовать графовую модель Владивостока 2024 года как отправную точку и последовательно удалять из нее вершины и инцидентные им ребра с целью поэтапного создания графовых моделей, отображающих различные исторические периоды развития города.

Построение графовой модели города. Для построения графовой модели Владивостока 2024 года использовалась библиотека OSMnx (Open Street Map Networks), которая позволяет проводить глубокий анализ сетей на основе соответствующих геоданных [6].

Для формирования модели применялся метод *graph_from_place* с целью конструирования графа города на основе данных о транспортной сети рассматриваемой территории. На втором шаге происходит визуализация полученного графа с помощью функции *plot_graph*.

Таким образом, данный алгоритм обеспечивает наглядное представление транспортной инфраструктуры города, где вершины представляют собой отдельные точки на карте (перекрестки), а рёбра – дорожные связи между ними.

Создание интерактивной карты города. Для решения проблемы, связанной с необходимостью точной идентификации вершин и ребер при удалении их из первичной графовой модели Владивостока была создана HTML-карта с уникальной идентификацией каждой вершины. Это позволило управлять процессом удаления элементов графа, основываясь на их уникальных ID, которые не указываются при визуализации первичной модели города, построенной на базе данных OSMnx.

```

graph_center = (sum(node[1]['y'] for node in G.nodes(data=True)) / len(G.nodes()),
               sum(node[1]['x'] for node in G.nodes(data=True)) / len(G.nodes()))

m = folium.Map(location=[graph_center[0], graph_center[1]], zoom_start=13)

for node_num in G.nodes():
    node_coordinates = G.nodes[node_num]['y'], G.nodes[node_num]['x']
    marker = folium.Marker(location=node_coordinates, icon=folium.DivIcon
                           (html=f"<div style='font-size: 12pt;'>{node_num}</div>"))
    marker.add_to(m)

```

Рис. 1. Фрагмент кода создания интерактивной карты города Владивосток с отображением ID вершин

Для реализации данной идеи была использована библиотека `folium`, а для создания интерактивной карты Владивостока на основе построенной графовой модели применялась методика определения центра модели, использующая координаты вершин, что обеспечивало задание центральных координат вершин на карте (рис. 1).

По завершении работы алгоритма интерактивная карта сохранялась в формате HTML, отображая транспортную сеть города с маркерами, показывающими ID вершин.

Построение последовательности графовых моделей города Владивосток 2024, 1995, 1960, 1936, 1909, 1887 годов. Во избежание ручного отбора сотен рёбер для удаления была использована процедура прунинга, применение которой в контексте построения графовых моделей, соответствующих более ранним годам, подразумевает удаление определенных вершин или рёбер с целью уменьшения размера и сложности графа города более ранних годов.

```

def prune_graph(G, nodes_to_keep):
    G_pruned = G.copy()
    for node in list(G.nodes):
        if node not in nodes_to_keep:
            G_pruned.remove_node(node)
    return G_pruned

nodes_to_keep_2024 = [n for n in G.nodes if G.nodes[n]['x'] < 132.01
                    and G.nodes[n]['y'] < 43.22 and G.nodes[n]['y'] > 43.06]

G_2024_interim = prune_graph(G, nodes_to_keep_2024)

```

Рис. 2. Фрагмент кода, выполняющий прунинг графовой модели Владивосток

Данный фрагмент кода представляет собой процесс прунинга графа, направленный на обрезку графов в соответствии с заданными критериями, такими как широта и долгота (рис. 2).

Приведенный алгоритм последовательного удаления ребер позволяет построить последовательность графовых моделей от более поздних моделей к более ранним (от сложного к простому): 2024→1995→1960→1936→1909→1887 (рис. 3).

Прогнозирование развития города на основе модели роста сети Барабаши-Альберт. Далее для прогнозирования развития графовых моделей города была выбрана модель роста сетей Барабаши-Альберт (МБА). Эта модель используется для построения новой последовательности графовых моделей от простого к сложному: 1887→1909→1936→1960→1995→2024. В рамках применения МБА строятся графовые модели городов и оценивается их близость к реальным моделям, построенным в порядке от сложного к простому.



Рис. 3. Графовые модели Владивосток в разные временные периоды 2024→1995→1960→1936→1909→1887 годы

Модель БА была выбрана для прогнозирования в связи с тем, что, во-первых, модель производит графы с безмасштабным распределением степеней вершин, что позволяет учитывать наличие вершин с высокой степенью связей, что характерно для многих реальных сетей; во-вторых, в МБА новые вершины присоединяются к существующим с вероятностью, пропорциональной их степени

вершин. Этот механизм учета предпочтительного присоединения отражает эмпирически наблюдаемое явление во многих реальных сетях; в-третьих, МБА позволяет моделировать динамику роста сети во времени, что важно для прогнозирования её эволюции; в-четвертых, модель является относительно простой и хорошо исследованной моделью в области роста сетей.

```
def barabasi_albert_growth(G, new_nodes, m):
    nodes_with_positions = [node for node in G.nodes(data=True)
                            if 'x' in node[1] and 'y' in node[1]]
    if not nodes_with_positions:
        raise ValueError("В графе нет узлов с позициями")

    for i in range(new_nodes):
        new_node_id = len(G.nodes) + 1
        reference_node = random.choice(nodes_with_positions)
        new_node_attrs = {'x': reference_node[1]['x'] + random.uniform(-0.01, 0.01),
                         'y': reference_node[1]['y'] + random.uniform(-0.01, 0.01)}
        G.add_node(new_node_id, **new_node_attrs)
        targets = random.choices(list(G.nodes), k=m,
                                weights=[G.degree(n) + 1 for n in G.nodes])
        for target in targets:
            G.add_edge(new_node_id, target, weight=1)
```

Рис. 4. Фрагмент кода, реализующий модель Барабаши-Альберта, которая обеспечивает добавление новых узлов и рёбер в граф с учётом предпочтительного присоединения

Обучение модели Барабаши-Альберта. Дальше модель БА необходимо обучить. Обучение проходит на основе полученных ранее графовых моделей Владивостока (от простого к сложному). Первоначально для создания исходного графа копируется граф 1887 г., начиная с которого добавляются новые узлы и ребра, имитирующий рост города.

Внутри функции происходит обход исторических графов. Для каждой графовой модели вычисляется количество новых узлов, которое необходимо добавить к начальному графу, чтобы сделать его похожим на текущий исторический граф. В результате функция возвращает обученный граф $G_{trained}$, который содержит информацию об изменениях, соответствующих изменениям, происходящими с МБА с течением времени.

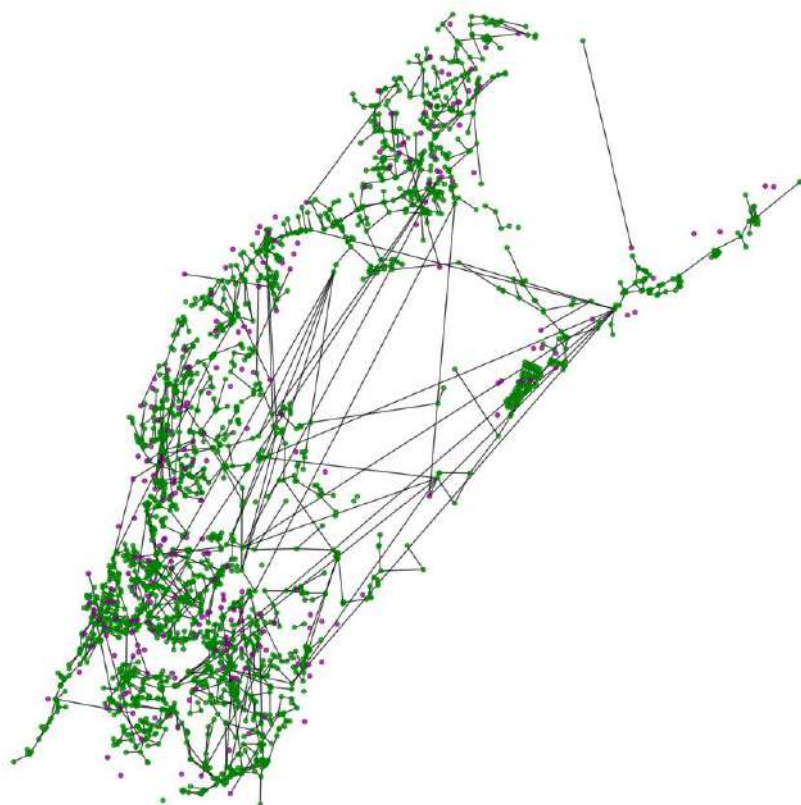


Рис. 5. Графовая модель Владивостока 2050 года

Обученная на исторических графах Владивостока модель роста сети Барабаши-Альберт позволила спрогнозировать и построить графовую модель Владивостока в 2050 году (рис. 5).

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. *Абрамов А. Л., Горик Ю. Р., Строганов П. Л.* Исследование графовых моделей городов с применением систем прикладного искусственного интеллекта // Математическое и компьютерное моделирование в экономике, страховании и управлении рисками : материалы XII Междун. науч.-практич. конф. 2023. Вып. 8. 360 с.
2. *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.
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. *Аникеев В. В.* Территориальное развитие города Владивосток и его агломерации // *Тихоокеанская география*. 2023. № 2. С. 23-36.
5. Старые карты Владивостока. [Электронный ресурс]. URL: http://www.etomesto.ru/map-vladivostok_1887/ (дата обращения: 10.09.2024).
6. Документация OSMnx. [Электронный ресурс]. URL: <https://osmnx.readthedocs.io/en/stable/osmnx.html>. (дата обращения: 10.09.2024).