

Исследование графа дорожной сети города Москвы

И.А. Евин¹, А.Ю. Самсонова^{1,2}

¹Московский физико-технический институт (государственный университет)

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

Введение

За последнее время такие сложные системы как технологические (от системы подачи электроэнергии до интернета), биологические (метаболические сети клеток, сеть нейронов в мозге) или социальные (сети знакомств, сети научных публикаций) стали представлять в виде сетевых структур. Узлы в таких сетях представляют собой элементы этих сложных систем, а связи между узлами – взаимодействия между элементами.

В данной работе исследуется дорожная система Москвы на предмет классификации этой системы и выявления общих закономерностей. В качестве дорожной сети городов. Узлами выбранной дорожной сети (вершинами графа) являются перекрёстки, а связями этих узлов (рёбрами графа) – части улиц, соединяющие эти перекрёстки.

Для исследования были получены графы дорожных сетей города Москвы в пределах Садового кольца (далее «Старая Москва»), Ленинского района Москвы, характерного строгой структурой (далее «Послевоенная Москва»), и более крупной области присоединённой части Москвы на юге (далее «Новая Москва»).

По результатам исследования, Старая Москва оказалась сравнима по сложности с центрами Вены и Лондона, район Новой Москвы – с центрами Венеции и Бразилиа, а район Послевоенной Москвы – с центрами североамериканских Торонто и Нью-Йорком (районом Манхэттена). То есть, появилась возможность сравнивать «похожие» города с точки зрения инфраструктурных свойств, коррелирующих со сложностью дорожной сети (связность сети, количество транспортных остановок, светофоров, развязок).

Анализ зарубежных публикаций и наши предварительные исследования позволяют сделать вывод, что дорожные сети новых районов крупных мегаполисов имеют более древовидную структуру, чем старые районы, что означает уменьшение коэффициента сетчатости дорожных сетей новых районов. Данное наблюдение может лечь в основу моделирования эволюции дорожной сети города Москвы.

Помимо основных свойств сложной сети в работе описана также корреляция сложности дорожной сети с численностью населения в этих районах (по данным эмпирических наблюдений). Таким образом, исходя из сложности структуры, стала возможной оценка таких характеристик, как оптимальное количество больниц, школ, объёмов розничной торговли, объёмов услуг населению.

1. Постановка задачи

Основной целью данной работы является получение реального графа дорожной сети города Москвы трёх районов и расчет основных характеризующих коэффициентов.

Данные для дорожных сетей берутся из открытых источников ресурса OpenStreetMap (OSM) – некоммерческого веб-картографического проекта по созданию подробной географической карты мира силами Интернет-сообщества. Сайт ресурса – <http://www.openstreetmap.org/>. Выбор этого ресурса объясняется наличием уникальных идентификаторов перекрёстков и их связей друг с другом.

2. Методика решения задачи

Выбор ресурса OpenStreetMap в качестве данных дорожной сети объясняется наличием уникальных идентификаторов перекрёстков и их связей друг с другом. Данные, полученные с сервера OSM, реализованы в виде XML-документа и состоят из множества тегов <node> и <way> с набором атрибутов. Теги в качестве атрибутов содержат уникальный идентификатор (id) и GPS координаты каждой точки. Каждая такая точка, обозначенная тегом <node>, является элементом "пути", обозначенным тегом <way>. Каждый "путь" описывает ломаную линию, проведенную последовательно через точки, список уникальный идентификаторов которых содержится в его атрибутах. Данная ломаная линия описывает либо участок дорожной сети (в том числе пешеходные дороги), либо периметр здания. Наличие у "пути" тега с атрибутом k = 'highway', и v равным любому значению из второй колонки таблицы 3, является признаком, что данный тег <way> описывает

автомобильную дорогу. Разрешенное направление движения задается тегом с атрибутом `k='oneway'` и `v='yes'` или `v='no'`, в зависимости от наличия на данной дороге одностороннего движения. Также в значениях атрибутов каждого элемента, описывающего участок дороги, содержится информация о количестве полос для движения, типе дороги, названии улицы и др.

Для получения дорожного графа на языке программирования `java` была написана программа, принимающая на вход `xml` файл описывающего структуру дорожной сети. В результате выполнения, данная программа записывает в текстовый файл список отрезков дорог, фрагмент полученного текстового файла показан на рисунке 1.

```
55.7625583;37.6036252;977988884;55.7632042;37.6042373;813972422;977988884;813972422;1118;81.46292785758493;0
55.7455056;37.5817437;1642801590;55.7454239;37.5820015;1642801583;1642801590;1189036523;1119;81.49155572262747;0
55.7454239;37.5820015;1642801583;55.7453884;37.5822712;1642801582;1642801590;1189036523;1119;81.49155572262747;0
55.7453884;37.5822712;1642801582;55.7453443;37.5826115;1642801581;1642801590;1189036523;1119;81.49155572262747;0
55.7453443;37.5826115;1642801581;55.7452405;37.5829433;1189036523;1642801590;1189036523;1119;81.49155572262747;0
55.7745666;37.6036526;2125599916;55.774427;37.6036984;2563483862;2125599916;2226186574;1120;81.53475047902825;1
55.774427;37.6036984;2563483862;55.7738462;37.603889;2226186574;2125599916;2226186574;1120;81.53475047902825;1
```

Рисунок 1. Пример данных в текстовом файле

Каждая строчка полученного файла содержит `gps`-координаты и уникальные идентификаторы точек, являющихся началом и концом данного отрезка; уникальные идентификаторы точек, обозначающих перекрестки, дорога между которыми содержит данный отрезок; уникальный идентификатор дороги между перекрестками, то есть ребра дорожного графа; вес ребра, то есть расстояние в метрах между перекрестками по дороге; признак 0 или 1 в зависимости от того является движение на описываемой дороге односторонним (1 если дорога односторонняя).

Алгоритм решения поставленной задачи можно разбить на несколько логических частей:

1. Извлечение данных из ресурса OSM в файл формата `.osm`
2. Конвертация данных из формата `.osm` в формат `.txt` с помощью программы на `Java`
3. Построение дорожного графа в программе `Gephi` и вычисление основных характеристик
4. Вычисление дополнительных характеристик с помощью надстройки над `Gephi`, реализованной на `Python`
5. Анализ полученных результатов

Построение дорожных графов и расчёт показателей производится в программе `Gephi`. Здесь приведена сводная таблица рассчитанных показателей:

	Старая Москва	Новая Москва	Послевоенная Москва
Кол-во вершин (<i>N</i>)	23712	28334	7346
Кол-во рёбер (<i>K</i>)	31753	38195	10719
Средняя степень графа	2.678	2.696	2.918
Кол-во треугольников	431	1784	253
Классификация	0.019	0.07	0.032
Коэффициент сетчатости	0.170	0.174	0.230
Средняя длина пути	49.25		37.58
Диаметр	117		93

Таблица 1. Сводная таблица показателей трёх рассчитанных графов дорожной сети Москвы

Особенностью построения этих графов является большое количество вершин и рёбер, чего не было обнаружено среди публикаций зарубежных коллег. Только лишь район Послевоенной Москвы сравним по количеству вершин и рёбер с дорожной структурой центра Парижа.

Так же стоит подчеркнуть расхождение в результатах всех трёх графов, что наглядно показывает разнородность взятых на рассмотрение участков.

3. Анализ полученных результатов

Полученные результаты хорошо соотносятся с подобными характеристиками дорожных сетей городов мира, что позволяет классифицировать сеть Москвы и расписать особенности её структуры в разных районах Москвы, или что то же самое, на разных этапах её планирования: стихийная самоорганизация вокруг центра, этап активного планирования второй половины XX века, зарождающийся этап индустриализации окраины Москвы.

Классификация дорожной сети по этапам эволюции

Возвращаясь к таблице 1, необходимо обратить внимание на схожую среднюю степень графа не выше трёх для всех районов города, что говорит о развитом индустриальном этапе планирования города, но ещё не начавшемся постиндустриальном этапе.

Таблица 2. Классификация дорожной сети по этапам эволюции

	Новая Москва	Гроане, Италия	Старая Москва	Послевоенная Москва
Кол-во вершин (N)	28334	5100	23712	7346
Кол-во рёбер (K)	38195	7100	31753	10719
Средняя степень графа	2.696	2.75	2.678	2.918
Коэффициент аграрности	0.825	0.835	0.771	0.722
Коэффициент сетчатости	0.174	0.196	0.170	0.230

Вообще, понятие этапов эволюции дорожной сети вводится в совместной работе итальянских физиков – «Базовые процессы, регулирующие эволюцию дорожной сети». Их наблюдения привели к разграничению эволюции на четыре этапа:

1. Аграрный этап (Rural phase): базируется на аграрной экономике без наличия развитой транспортной инфраструктуры, преобладают просёлочные дороги
2. Ранняя урбанизация (Early-urban phase): строительство ж/д линий; строительство дорог вне исторического центра
3. Индустриальный этап (Urban-industrial phase): характерное индустриальное развитие (в особенности механика и текстиль), вследствие этого рост популяции, строительство автомагистралей
4. Постиндустриальный этап (Metropolitan post-industrial phase): развитие высокоскоростных поездов и крупной системы автомагистралей

Работа примечательна тем, что в качестве примера учёные рассматривают крупную аграрную область Гроане немного севернее постиндустриального Милана, которая переживает рост своей дорожной сети. Анализ структуры Гроаны прекрасно соотносится с характеристиками Новой Москвы, поэтому данная работа может быть взята за основу в моделировании эволюции Новой Москвы до индустриального этапа.

Схожесть структур Гроаны и Новой Москвы при статическом рассмотрении (без учёта эволюции) определяется близостью средних степеней сетей: рост от 2,57 до 2,8 у Гроаны при 2,696 у Новой Москвы. Помимо средней степени берётся другой коэффициент Γ_N , вычисляемый по формуле

$$\Gamma_N = \frac{N_1 + N_3}{\sum_{i \neq 2} N_i}$$

где N_i – есть количество узлов степени i (из рассмотрения убраны узлы степени 2, как не

рассматриваемые в корректном определении перекрёстков).

Коэффициент Γ_N показывает относительное количество тупиков (относящихся к N_1) и перекрёстков Т-типа (относящихся к N_3) так, что малое значение коэффициента свидетельствует о превосходстве перекрёстков степени $i = 4$, что, в свою очередь, ведёт к модели решётчатой структуры. Обратно, при коэффициенте Γ_N близком к 1, сеть по большей части состоит из перекрёстков Т-типа и тупиков. Для ясности, этот коэффициент можно назвать *коэффициентом аграрности* рассматриваемой сети.

Для Гроаны $\Gamma_N \cong 0,835$, тогда как для Новой Москвы $\Gamma_N \cong 0,825$. Это позволяет заметить обилие перекрёстков степени i до 3, а значит, пока ещё аграрный этап развития сети.

И, наконец, по графикам из работы итальянцев можно оценить коэффициент сетчатости дорожной сети Гроаны в 2007-м году, имея оценку количества вершин $N \cong 5100$, а количества рёбер $K \cong 7100$ имеем коэффициент сетчатости $M \cong 0,196$. По данному показателю Гроане опережает Новую Москву, что свидетельствует о более сложной структуре пригорода Милана, т.е. о наличии узлов с количеством связей, превышающих $i = 3$.

Результаты из таблицы 2 наглядно демонстрируют принадлежность района Москвы внутри Садового кольца к сети с ранним этапом индустриализации, поскольку сетчатость центра Москвы пока ещё невысокая, но наличие признаков индустриализации неоспоримо, согласно значению коэффициента аграрности: на 10% меньше аграрности Гроаны.

Сетчатость как показатель сложности структуры городов мира

На настоящий момент нет однозначной классификации дорожных сетей по их сложности, хотя бы в силу разнообразия трактовки понятия сложности. Что под этим имеется в виду? В идеале существует потребность понимания сложности структуры сети, которая позволит решать задачи:

- ✓ *Моделирования дорожной сети и эволюции сети по мере её роста*

Разные принципы, заложенные в основу моделирования сети, позволяют получить близкое соответствие реальным сетям по ряду параметров, но на данный момент не получается полностью и однозначно выразить чёткие правила моделирования сложных сетей, встречающихся в природе. В данном контексте под «сложностью» сети можно понимать совокупность факторов, отражающих соответствие модели реальным явлениям.

- ✓ *Корреляции сложности структуры с численностью населения*

Если верно данное эмпирическое наблюдение, то сложность сети имеет рост пропорционально увеличению численности населения, и наоборот. Исходя из численности населения можно оценивать интегральные характеристики городов как то: площадь города, количество больничных учреждений, супермаркетов, объём розничной торговли

В данной работе сложность структуры сети подразумевается соотношением коэффициентов аграрности, корреляции и сетчатости.

На предмет сложности структуры городов мира была собрана сводная таблица параметров дорожных сетей городов мира:

Город / Район	Количество вершин	Количество рёбер	Коэффициент кластеризации	Коэффициент сетчатости
Копенгаген	1 637	3 410	-	0,198
Лондон	3 010	6 287	-	0,249
Париж	4 501	11 408	-	0,241
Манхэттен	1 046	4 617	-	0,239
Торонто	2 599	5 904	-	0,223

<i>Вена</i>	467	692	0,007	0,242
<i>Бразилиа</i>	179	230	0,029	0,147
<i>Венеция</i>	1 840	2 407	0,016	0,152
<i>Старая Москва</i>	23712	31753	0,019	0,248
<i>Новая Москва</i>	28 334	38 195	0,07	0,174
<i>Послевоенная Москва</i>	7346	10719	0,032	0,230

Таблица 3. Сводная таблица основных параметров сложности городов мира

Как видно из подсвеченных значений, центр Старой Москвы сравним по сложности с центрами Вены и Лондона, район Новой Москвы – с центрами Венеции и Бразилиа, а Ленинский район наиболее близок к центрам Торонто и Нью-Йорка (район Манхэттен). Данный результат может позволить сравнивать «похожие» города с точки зрения инфраструктурных свойств, коррелирующих со сложностью дорожной сети.

Корреляция сложности сети с численностью населения

Согласно исследованиям д-ра Абундо из университета Нью-Мексико, сложность сети, в нашем случае определяемая коэффициентом сетчатости, имеет пропорциональную зависимость от численности населения. Такой же результат показала и группа итальянских учёных во главе с Э. Страно в упоминаемой ранее работе с областью Гроане. На взятом исследователями интервале с 1850го года по 2007-й год рост численности населения в Гроане коррелирует с ростом узлов дорожной сети. Полученное наблюдение позволяет связать численность населения в трёх исследуемых районах с количеством узлов соответствующих дорожных сетей:

Город	Количество узлов	Сетчатость	Численность
<i>Старая Москва</i>	23712	0,248	741 967
<i>Новая Москва</i>	28334	0,174	235 046
<i>Послевоенная Москва</i>	7346	0,230	186 923

Таблица 4. Соотношение структуры дорожной сети с численностью населения

Исходя из численности населения возможно также выявлять и различные инфраструктурные свойства городов. Недавняя работа в области масштабной инвариантности городов включает в себя исследование эмпирических зависимостей показателей инфраструктуры и развития городов России в зависимости от численности населения. Результаты этой работы выявляют степенную зависимость численности населения от ряда параметров: площади города, количества больничных учреждений, объёма розничной торговли, объёма услуг населению. Эта зависимость имеет следующий вид:

$$X = X_{*cp} \left(\frac{P}{P_{*cp}} \right)^n$$

где X – исследуемый параметр, P – численность населения, X_{*cp} , P_{*cp} – нормировочные коэффициенты, n – показатель степени.

коэффициенты, n – показатель степени.

Ниже приведена таблица значений n для каждого из перечисленных параметров.

	Площадь района	Кол-во больниц	Объём розничной торговли	Объём услуг населению
<i>показатель степени</i>	0,5	1,1	0,5	1,4

Таблица 5. Рассчитанные коэффициенты корреляции для ряда показателей масштабной инвариантности

Таким образом, зная численность населения, показатель степени и нормировочные коэффициенты, становится возможным расчёт различных инфраструктурных показателей города.

4. Вывод

Анализ построенных графов дорожных сетей классифицировал разнородные районы Москвы с позиции сложности сетевой структуры, позволяя тем самым выявлять общие закономерности при росте «похожих» сетей, как то было сделано на примере схожести миланского пригорода Гроане и района Новой Москвы. Возникающие связи между различными дорожными сетями могут служить применением оптимальных решений одной сети для другой.

Классификация сети по этапам эволюции позволяет прогнозировать поведение дорожной сети в ближайшем будущем: рост сети, усложнение структуры, индустриализация центра или окраин. Прогнозирование поведения сети влияет на планирование инфраструктурных объектов города.

Структура Новой Москвы имеет древовидную форму, поскольку находится на аграрном этапе эволюции, но в дальнейшем прогнозируется усложнение центра в районе города Троицка, развитие автомагистралей между городами Новой Москвы, согласно развитию дорожной сети Новой Москвы по сценарию Гроане.

Москва в пределах Садового кольца, напротив, имеет сформированную структуру с характерной самоорганизацией в начале своего роста, о чём свидетельствует низкий коэффициент кластеризации. Объединяя понятие кластеризации, сетчатость центра Москвы указывает на этап индустриального развития района. Так называемая послевоенная область Москвы, состоящая из Гагаринского и Академического районов, как и было предсказано, имеет все черты решётчатой структуры с высокой степенью планирования: это доказывают высокие показатели коэффициентов кластеризации и сетчатости, а так же низкое значение коэффициента аграрности.

Необходимо обязательно отметить исследованную корреляцию сложности структуры с численностью населения. На данный момент обнаружилось несколько инфраструктурных показателей, которые могут быть спрогнозированы благодаря таким наблюдениям.

Имеет смысл продолжать наработки в области прогнозирования и моделирования дорожных сетей, впоследствии придя к понятию эволюции дорожной сети Москвы.

Список использованной литературы

1. *Barabasi A.-L.*. Network Science. www.barabasi.com/networksciencebook (2015)
2. *Barabasi A.-L., R. Albert.* Emergence of scaling in random networks. Science 286 (1999) 509
3. *Watts D.J., Strogatz S.H.*. Collective dynamics of 'small-world' networks. Nature 393 (1998) 440.
4. *Stran, E., Nicosia V., Latora V., Porta S. & Barthelemy M.* Elementary processes governing the evolution of road networks. Sci. Rep. 2, 296; DOI:10.1038/srep00296 (2012).
5. *Buhl J., Gautrais J., Reeves N., Solé R.V., Valverde S., Kuntz P., Theraulaz G.* Topological patterns in street networks of self-organized urban settlements. European Physical Journal B 49 (2006) 513
6. *Jiang B, Duan Y, Lu F, Yang T, Zhao J.* Topological structure of urban street networks from the perspective of degree correlations. 2014. Environment and Planning B: Planning and Design 41(5) 813 – 828

7. *Barthelemy M., Flammini A.*. Modeling Urban Street Patterns. *Physics Reviews Letters* 100 (2008) 138702.
8. *Barthelemy M., Bordin P., Berestycki H., & Gribaudo M.* (2013). Self-organization versus top-down planning in the evolution of a city. *Scientific reports*, 3.
9. *Abundo C., Bodnar T., Driscoll J., Hatton I., & Wright J.* (2013). City population dynamics and fractal transport networks. *Proceedings of the Santa Fe Institute's CSSS2013*.
10. *Cardillo A., Scellato S., Latora V., Porta S.*. Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E* 73 (2006) 066107
11. *Crucitti P., Latora V., Porta S.* Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E* 73 (2006) 036125
12. *Yuan P., Juan Z.*. Urban road network evolution mechanism. *Physica A* 392 (2013) 5186–5193
13. *Евин И.А.*. Введение в теорию сложных сетей. Компьютерные исследования и моделирование. 2010 Т. 2 № 2 С. 121–141
14. *Марченко Д.К., Евин И.А.*. Теория дорожных сетей городов и ее приложения. МФТИ (2014)
15. *Станиславский И.А., Станиславская Е.Н., Евин И.А.*. Масштабная инвариантность городов. МФТИ (2015)