

**Эволюция пространственной структуры сетей крупнейших метрополитенов мира**

**Р.Д. Панов**

*Сети метрополитенов являются ключевым компонентом эволюции пространственной структуры городов. В статье проводится сравнительный анализ эволюции пространственных структур сетей метрополитенов Шанхая, Пекина, Сеула, Токио, Лондона, Нью-Йорка. Он основан на сопоставлении качественных и количественных характеристик рассматриваемых сетей в ключевые моменты развития их топологических структур. Анализ топологических структур проводился на основе методики, разработанной К. Канским и усовершенствованной С.А. Тарховым*

*Mass transit transportation systems play a very important role in development of modern cities. Subway network are key components in evolution of cities' spatial structure. In this article we make a comparative analysis of spatial structures' evolutions for world biggest subway networks: Shanghai, Beijing, Tokyo, Seoul, London, New York. Analysis is based on comparing the quantitative and qualitative properties of networks. It was based on methodology, created by K. Kansky and improved by S. Tarkhov.*

Чтобы понять и объяснить механизмы формирования и развития сетей метрополитенов необходимо изучить эволюцию их пространственных структур. Для этого лучше всего использовать теорию графов. При этом сеть линий метрополитена преобразовывается в граф<sup>7</sup>, где станции – это вершины, а соединяющие их перегоны – ребра.

Преобразование транспортной сети в граф значительно облегчает анализ ее топологической структуры. Сравнение сетей линий метрополитена осуществляется путем сопоставления их конфигураций, а также следующих топоморфологических параметров: количество циклов<sup>8</sup>, топологические ярусы<sup>9</sup> и количество циклов в каждом из них, размеры площадей топологических ярусов и площади

---

<sup>7</sup> Граф – упрощенная схема-чертеж взаиморасположения точек и линий, совокупность непустого множества вершин ( $V$ ) и наборов пар вершин (ребер) ( $E$ ),  $G = (V, E)$ .

<sup>8</sup> Циклы – это замкнутые контуры дорог в сети, т.е. фигуры, образуемые несколькими транспортными линиями в форме замкнутой ячейки.

<sup>9</sup> Топологический ярус – замкнутая кольцеобразная полоса циклов (наподобие древесных колец на срезе срубленного ствола дерева) – такая, что в нее попадают циклы, имеющие хотя бы одну общую вершину или ребро с внешней его границей.

циклического остова<sup>10</sup>, средняя площадь цикла в каждом топологическом ярусе, индекс связности Канского (альфа), индекс связности Канского (бетта).

Основными структурными параметрами графа являются число вершин и число ребер. Однако для сравнительного анализа они малопригодны, так как отражают только малую часть существующей структуры сетей линий метрополитена. Чаще всего эти параметры используют для расчета более сложных характеристик, которые уже и используются для сравнения сетей. Нами изучена динамика следующих таких показателей сетей за весь период существования сетей линий метрополитенов: числа циклов, соотношения площадей топологических ярусов циклического остова, средней площади цикла, уровня связности.

Первый из таких показателей – *число циклов* в сети. Его можно рассчитать по формуле, но современные ГИС-программы позволяют подсчитать число циклов в сети напрямую с графа сети. В таблице 1 представлено число циклов для всех сетей на момент достижения сетями следующих уровней топологической сложности.

*Таблица 1 – Число циклов в сетях метрополитенов*

Город	1-й класс	2-й класс	3-й класс	2016 г.
Нью-Йорк	2	18	70	81
Лондон	2	16	53	53
Сеул	3	10	36	45
Пекин	2	27	51	51
Шанхай	3	28	56	56
Токио	6	19	36	78

*Составлено по расчетам автора.*

По количеству циклов в сети мы можем судить об уровне устойчивости и надежности сети, поскольку при изъятии любого ребра пункты остаются связанными между собой остальными ребрами. Соответственно увеличение числа циклов в сети свидетельствует о росте ее устойчивости и структурной надежности, и, отслеживая значения этого числа, мы можем наблюдать за ее эволюцией.

---

<sup>10</sup> Циклический остов – компактное скопление циклов.

Из таблицы 1 ясно, что наибольшее количество циклов характерно для сетей линий метрополитенов Нью-Йорка и Токио. Число циклов в остальных сетях метрополитена находится примерно на одном уровне, но необходимо отметить, что через несколько лет число циклов в метрополитенах Пекина и Шанхая превысит 60. Разумеется, это произойдет при условии, что все существующие ныне планы по строительству новых линий будут реализованы. Также из таблицы 1 можно увидеть еще одну закономерность: число циклов в сетях Пекина и Шанхая в момент перехода сети во 2-й класс оказалось значительно больше, чем у всех остальных сетей метрополитена. Это говорит о том, что сети Пекина и Шанхая, будучи циклическими сетями 1-го класса, раскрыли свой потенциал в большей степени, чем все остальные сети.

Следующий количественный показатель – **соотношение площадей отдельных топологических ярусов** сети. Он отображает пространственные особенности внутреннего устройства циклического остова сети.

Из таблицы 2 видно, какую долю площади от общей площади циклического остова занимают разные топологические ярусы. Из распределения площадей видно, что доля 3-го топологического яруса ни в одной из сетей не превышает 10 %. В сетях Лондона и Сеула доля 3-го топологического яруса значительно ниже, чем в других; при этом в сети Лондонского метрополитена выделяется гипертрофированный по пространственным размерам первый топологический ярус, а в Сеуле – второй топологический ярус. Это говорит о том, что в сетях этих метрополитенов после выделения в их структуре соответствующих топологических ярусов, интенсивность роста сетей резко сократилась.

*Таблица 2 – Доля площади топологического яруса от площади циклического остова, %, 2016 г.*

Город	1-й ярус	2-й ярус	3-й ярус
Нью-Йорк	70,1	23,5	6,4
Лондон	93,1	6,8	0,1
Сеул	67,5	29,4	3,1
Пекин	69,9	22,8	7,4
Шанхай	76,1	19,3	4,6
Токио	73,0	18,1	8,9

*Составлено по расчетам автора.*

Помимо этого, такое распределение позволяет сделать прогноз относительно того, за счет чего потенциально может происходить дальнейшее развитие пространственной структуры сетей, если оно произойдет. В сети метрополитена Сеула оно будет происходить по большей части за счет дробления 2-го топологического яруса, а в сети метрополитена Лондона – за счет дробления 1-го топологического яруса.

Чем больше в топологическом ярусе циклов и чем меньше их площадь, тем ярус более развит с топологической точки зрения. В таблице 3 мы видим, какова доля одного цикла в каждом из топологических ярусов рассматриваемых нами сетей.

*Таблица 3 – Средняя доля площади цикла от общей площади циклического остова, %, 2016 г.*

Город	1-й ярус	2-й ярус	3-й ярус
Нью-Йорк	2,11	0,78	0,55
Лондон	2,60	0,32	0,06
Сеул	2,46	1,85	1,54
Пекин	3,17	1,56	0,92
Шанхай	2,78	0,93	0,46
Токио	2,07	0,67	0,57

*Составлено по расчетам автора.*

Однако перед тем, как делать какие-либо выводы, необходимо взглянуть на распределение циклов по топологическим ярусам в изученных нами сетях.

При взгляде на таблицы 3 и 4 мы более четко видим наиболее и наименее развитые топологические ярусы. В Лондоне и Сеуле третий топологический ярус имеет наименьшее число циклов, и, хотя по площади эти циклы очень различны (в Лондоне их площадь наименьшая из всех, а в Сеуле – наибольшая) – это одинаково говорит об их неразвитости. Стоит отметить, что у 3-го топологического яруса в сети Сеула, в отличие от лондонского, больший потенциал развития, так как число циклов в нем может увеличиваться за счет дробления его самого, а в Лондоне – лишь за счет изменения структуры других топологических ярусов.

Площадь циклов в 3-м топологическом ярусе сети Шанхая почти в 2 раза меньше, чем в сети Пекина, хотя они очень близки по числу

циклов. Это свидетельствует о том, что на этот момент, 3-й топологический ярус в Шанхайской сети более устойчив, чем в сети Пекина.

*Таблица 4 – Распределение числа циклов по топологическим ярусам, 2016 г.*

Город	1-й ярус	2-й ярус	3-й ярус
Нью-Йорк	36	28	17
Лондон	30	21	2
Сеул	27	16	2
Пекин	22	16	8
Шанхай	26	20	10
Токио	35	27	16

*Составлено по расчетам автора.*

3-й ярус в сети метрополитена Токио и Нью-Йорка имеет схожие характеристики: они близки и по числу, и по их средней площади. Большое число циклов вкупе с их размером позволяет нам сделать вывод: 3-й топологический ярус в сетях Нью-Йорка и Токио наиболее развитый из рассматриваемых нами 6 метрополитенов.

При анализе циклов во 2-м топологическом ярусе мы видим схожую картину: по числу циклов сети Нью-Йорка и Токио превосходят остальные сети, а средняя площадь цикла в них превышает по размерам лишь сеть Лондона. Однако причина такой малой площади цикла в сети Лондона – это гипертрофированно развитый 1-й топологический ярус, следовательно, и 2-й топологический ярус наиболее развит в сетях Токио и Нью-Йорка.

В сетях линий остальных метрополитенов также наблюдается закономерность, схожая с той, что мы заметили при анализе 3-го топологического яруса. Лондон и Сеул характеризуются наименьшим числом циклов, при этом площадь цикла в Лондонской сети – наименьшая, а в Сеульской – наибольшая. Шанхай по числу циклов несколько превосходит Пекин, уступая ему при этом по средней площади цикла.

При анализе 1-х топологических ярусов бросаются в глаза некоторые отличия от предыдущих ярусов. Средняя площадь циклов в сети метрополитена Лондона резко увеличивается и превосходит Токио и Нью-Йорк, при этом по числу циклов она уступает обеим

этим сетям. Это говорит о слабой устойчивости и надежности 1-го топологического яруса сети Лондона.

1-е топологические ярусы сетей Токио и Нью-Йорка все также имеют схожие характеристики: наибольшее из всех число циклов с относительно небольшой площадью.

Сеульский метрополитен по числу циклов опережает метрополитены Пекина и Шанхая, но уступает им по площади. В целом он занимает промежуточное положение.

На основе анализа этих двух показателей можно сделать некоторые промежуточные выводы. Из рассматриваемых нами сетей, Нью-Йорк и Токио имеют наиболее развитую пространственную структуру: в них наибольшее число циклов, и площадь этих циклов относительно невелика. Остальные сети развиты недостаточно: число циклов в них слишком мало для охватываемой ими площади. Сеула и Пекина это касается в большей степени, Шанхая – в меньшей степени. Ситуация с Лондоном неоднозначная: «раздутый» 1-ый топологический ярус сильно искажает общую картину: в 1-м ярусе циклов много, но они имеют большую площадь; 2-й топологический ярус в целом мало уступает Токио и Нью-Йорку, а 3-й топологический ярус имеет слишком мало циклов, хотя их площадь и невелика.

Однако для получения полной и целостной характеристики пространственной структуры сети использованных нами параметров недостаточно. Нам необходимо проанализировать уровень связности рассматриваемых сетей, а для этого лучше всего подходят коэффициенты Канского. Первым коэффициентом, который мы использовали, является модифицированный коэффициент альфа:

$$\mu \frac{1}{(C_2^v - (v-1))}, C_2^v = (v! / (v-2)! * 2!).$$

В этой формуле  $\mu$  – число циклов в сети, а  $v$  – число вершин. Этот коэффициент представляет собой отношение между фактическим числом независимых замкнутых циклов в плоском графе и максимальным числом циклов при данном количестве вершин в графе.

Из таблицы 5 очевидна четкая дифференциация: Наибольшего значения этот коэффициент достигает в сетях Пекина и Шанхая (причем в этих сетях произошел резкий рост после образования 3-го топологического яруса); наиболее циклически развитых сетях – сетях

Токио и Нью-Йорка – значение коэффициента среднее, а наименьшее оно – у сетей Сеула и Лондона.

Таблица 5 – Динамика изменение коэффициента  $\alpha$  при развитии сетей

Город	2-й класс	3-й класс	2016 г.
Нью-Йорк	0,22	0,26	0,33
Лондон	0,19	0,25	0,25
Сеул	0,27	0,28	0,29
Пекин	0,29	0,37	0,37
Шанхай	0,27	0,36	0,36
Токио	0,23	0,27	0,32

*Составлено по расчетам автора.*

Второй коэффициент, использованный нами для анализа связности сетей, – коэффициент бетта  $\beta$ . Он рассчитывается по формуле

$$\beta = \frac{e}{v}$$

где  $e$  – число ребер, а  $v$  – число вершин. Индекс  $\beta$  показывает отношение числа ребер к числу вершин в графе. Очевидно, что, чем выше коэффициент бетта, тем выше средняя степень вершины в графе.

Этот коэффициент показывает в целом схожую с предыдущим коэффициентом картину. Сеть линий метрополитена Пекина также характеризуется наибольшей связностью, а сеть Лондона – наименьшей. Нью-Йорк и Токио имеют средние значения показателя связности. Выделяется сеть Сеула с показателем выше среднего.

Таблица 6 – Динамика изменение коэффициента  $\beta$  при развитии сетей

Город	2-й класс	3-й класс	2016 г.
Нью-Йорк	1,45	1,59	1,68
Лондон	1,31	1,47	1,47
Сеул	1,43	1,62	1,70
Пекин	1,53	1,80	1,80
Шанхай	1,49	1,62	1,62
Токио	1,47	1,60	1,69

*Составлено по расчетам автора.*

В целом анализ топологической связности сетей позволил разделить все шесть систем метрополитена по уровню связности на сети с наивысшей связностью (Пекин и Шанхай), сети со средней связностью (Нью-Йорк и Токио) и сети с низкой связностью (Сеул и Лондон).

Проанализировав все показатели и характеристики пространственных структур рассматриваемых сетей, мы выделили, на основе доминирующих параметров, три типа сетей: 1) циклически развитые сети; 2) связные сети; 3) деформированные сети. Необходимо отметить, что слово «деформированные» в данном контексте обозначает лишь то, что некоторые ключевые показатели этих сетей сильно уступают остальным.

**Циклически развитые сети** – это сети Токио и Нью-Йорка. Эти сети линий метрополитена характеризуются наибольшими значениями топометрических характеристик среди всех сетей. Они превосходят все сети по числу вершин, ребер, циклов. У них наиболее развитые топологические ярусы: это подтверждается распределением циклов и площадными характеристиками топологических ярусов и относящимся к ним циклов. Значения показателей связности у них средние. Интенсивность циклообразования низкая. В процессе роста наблюдалось чередование периодов циклообразования и дендритизации.

**Связные сети** – это сети Пекина и Шанхая. Они характеризуются средними значениями топометрических характеристик. Эти сети растут очень быстро. Они имеют очень высокие значения показателей интенсивности циклообразования и высокие значения показателей связности. В процессе роста наблюдалось чередование периодов стагнации и одновременного циклообразования и дендритизации.

**Деформированные сети** – это сети Лондона и Сеула. Они характеризуются наименьшими значениями топометрических характеристик из всех сетей; уступают всем сетям по числу вершин, ребер, циклов; имеют наименее развитые топологические ярусы. Структура этих сетей искажена: в Лондоне за счет гипертрофированно развитого 1-го топологического яруса, в Сеуле – за счет большой площади циклов. Значения показателей связности у сетей низкие. Интенсивность циклообразования – средняя. В процессе роста наблюдалось чередование периодов циклообразования и дендритизации.

**Выводы.** Представление сети метрополитена в виде графа позволяет абстрагироваться от отвлекающих внешних факторов (экстер-



нальностей) и решить необходимые для нас задачи: изучить качественные и количественные свойства сети, процесс ее эволюции, оценить возможности дальнейшего ее роста.

Наиболее развитые топологические ярусы характерны для сетей с большим количеством циклов. В сетях с малым количеством циклов часто наблюдается явление гипертрофированности внутренней структуры топологических ярусов.

Расчет индексов связности Канского показал отсутствие зависимости между степенью связности сети и ее общей циклической развитости. Наибольшими значениями индексов связности обладают не сети с наибольшим числом циклов (Токио, Нью-Йорк), а значительно уступающие им по топометрическим характеристикам сети Пекина и Шанхая.

Анализ основных топометрических показателей сети и расчет индексов Канского позволил выделить 3 основных типа сетей метрополитенов: наиболее циклически развитые, наиболее связные и деформированные сети.

Эти типы были выделены нами путем сопоставления числа циклов, развитости топологических ярусов, площадных характеристик топологических ярусов и циклов, показателей связности.

### **Литература**

1. Тархов, С.А. Эволюционная морфология транспортных сетей / С.А. Тархов. – Смоленск-М.: Универсум, 2005. – С. 47–50.

2. Kansky, K.J. Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics / K.J. Kansky. – Chicago University, Department of geography, Research paper, 1963.

*Поступила 29 октября 2017 г.*

**УДК 711.7**

### **К вопросу о трассировке Кольцевой линии метрополитена Петербурга**

**Л.Ю. Истомина, М.А. Жеблиенок**

*В статье проведён ретроспективный анализ проектных решений трассировки Кольцевой линии метрополитена Ленинграда – Петербурга, рассматривается опыт создания системы кольцевых линий внеуличного*