

УДК 911.3:656

ЭВОЛЮЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ СЕТЕЙ КРУПНЕЙШИХ МЕТРОПОЛИТЕНОВ МИРА

© 2020 г. Р. Д. Панов*

Институт географии РАН, Москва, Россия

*e-mail: romanpanov1994@gmail.com

Поступила в редакцию 01.07.2019 г.

После доработки 30.07.2019 г.

Принята к публикации 03.10.2019 г.

В статье проводится сравнительный анализ изменения пространственных структур сетей метрополитенов Шанхая, Пекина, Сеула, Токио, Лондона и Нью-Йорка. Эти сети имеют самый высокий уровень пространственной сложности среди всех метрополитенов мира. Анализ трансформации сетей проведен по основным этапам развития их топологических структур с использованием методики, разработанной К. Канским и С.А. Тарховым. Сети метрополитенов сравнивались по нескольким ключевым топологическим показателям: количеству циклов; интенсивности циклообразования; числу топологических ярусов; количеству циклов в каждом из них; размерам площадей топологических ярусов и площади циклического остова; средней площади цикла в каждом топологическом ярусе; индексу связности Канского (альфа); индексу связности Канского (бетта). Это позволило обнаружить особенности изменения пространственных структур в процессе развития. Выявлены переломные временные точки (образование нового топологического яруса в циклическом остова) в структурной трансформации сетей метрополитенов, обнаружено отсутствие корреляции между значениями показателей связности и общей циклической развитости сетей, а также выделено несколько их типов.

Ключевые слова: сети линий метрополитенов, пространственная структура, теория графов

DOI: 10.31857/S2587556620010161

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основная цель проведенного исследования — выявление закономерностей эволюции пространственных структур сетей крупнейших метрополитенов мира. Для ее достижения были решены следующие задачи:

- выделены основные этапы эволюции пространственных структур для каждой из рассматриваемых сетей;
- проведено сравнение сетей по основным топологическим показателям;
- определена взаимосвязь между показателями связности и общей циклической развитости сети;
- выделено несколько первичных типов сетей, на основе которых возможно проведение типологии всех метрополитенов мира.

На первый взгляд кажется, что метрополитены, как и любые транспортные сети — просто инженерные системы, имеющие форму “ядро—периферия”. Это было бы верно, если бы такая пространственная конфигурация была запланирована с самого начала. Но на самом деле их структуры развиваются не так, как было задумано изначально. Подробный анализ процесса эволюции транспортных сетей в общем и сетей метрополитенов, в частности, показывает, что они — самоорганизующиеся

структуры, имеющие одинаковые закономерности формирования, а процесс их эволюции носит квазиестественный характер. Детальный разбор процесса эволюции сети метрополитена на примере метрополитенов Нью-Йорка и Мадрида приведен в работе С.А. Тархова [1, с. 191–200].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Чтобы понять и объяснить механизмы формирования и развития сетей метрополитенов, необходимо изучить эволюцию их пространственных структур. Для этого лучше всего использовать теорию графов¹, в соответствии с которой в исследовании станции преобразуются в вершины, а соединяющие их перегоны — в ребра.

Теория графов широко применялась и применяется для изучения структуры транспортных сетей. К. Канский в 1963 г. в своей работе впервые применил ее для анализа дорожной сети, разработав несколько индексов, которые позже стали называться индексами Канского (α , β , γ и др.) [5]. К теории графов обращались Э. Тааффе [9], Т. Лам и Х. Шулер [7], Д. Гаттузо и Э. Мириелло

¹ Граф — упрощенная схема-чертеж взаиморасположения точек и линий, совокупность непустого множества вершин (V) и наборов пар вершин (ребер) (E), $G = (V, E)$.

[3], С. Тархов [1], А. Массо и В. Вучик [8], С. Деррибл и К. Кеннеди [2], П. Хаггет и Р. Чорли [4].

В целом изучение и моделирование эволюции транспортных сетей давно привлекало внимание географов. И.Г. Коль в 1841 г. создал транспортно-иерархическую модель. Л. Лаллан, проанализировав развитие железнодорожных сетей Франции, Англии и США, выявил несколько закономерностей усложнения структуры сети. А.М. Якшин в 1938 г. разработал стадиальную модель роста городской транспортной сети. Э. Таафе, Моррил и П. Гулд в 1963 г. создали стадиальную модель роста транспортных сетей прибрежных территорий в процессе их колонизации. П. Хаггет и Р. Чорли в 1969 г. обобщили все предыдущие модели и выделили общие стадии развития транспортных сетей.

С.А. Тархов на базе методики К. Канского разработал методику анализа пространственной эволюции транспортных сетей. Эта методика позволила проводить детальный анализ внутреннего устройства транспортной сети. Она и легла в основу данного исследования.

Преобразование транспортной сети в граф значительно облегчает анализ ее топологической структуры. Сравнение сетей линий метрополитена осуществляется путем сопоставления рисунка их конфигураций, а также количественных значений следующих топоморфологических параметров: количества циклов², интенсивности циклообразования, числа топологических ярусов³, количества циклов в каждом из них, размеров площадей топологических ярусов и площади циклического остова⁴, средней площади цикла в каждом топологическом ярусе, значений индекса связности Канского (альфа), индекса связности Канского (бетта).

В данном исследовании класс сети определяется числом топологических ярусов: сеть с одним топологическим ярусом — это сеть 1-го класса, двумя ярусами — 2-го класса, тремя — 3-го. На рис. 1 показано преобразование сети метрополитена в граф с выделением топологических ярусов в циклическом остове.

Основными структурными параметрами графа служат число вершин и число ребер. Однако для сравнительного анализа они малопригодны, так как отражают только незначительную часть информации о пространственной структуре сетей линий метрополитена. Чаще всего эти параметры применяются для расчета более сложных топологических параметров, которые используются для

сравнения сетей. Для исследования упомянутых выше шести метрополитенов нами была изучена динамика следующих показателей за 160 лет: числа циклов, интенсивности циклообразования, соотношения площадей топологических ярусов циклического остова, средней площади цикла в различных топологических ярусах, уровня связности. Циклы — это базовые пространственные элементы сети. Они формируют топологические ярусы, которые образуют циклический остов — ядро сети. Поэтому анализ показателей проводился согласно данной последовательности: цикл—топологический ярус—сеть в целом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Базовым показателем, отражающим общую пространственную развитость сети, является *число циклов* в сети. Его можно рассчитать по формуле, но современные ГИС-программы позволяют подсчитать число циклов в сети напрямую с графа. В табл. 1 представлено число циклов для всех изучаемых сетей на момент достижения ими следующих уровней топологической сложности.

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

Наибольшее количество циклов характерно для сетей линий метрополитенов Нью-Йорка и Токио. Число циклов в остальных сетях метрополитена находится примерно на одном уровне, но через несколько лет их число в Пекине и Шанхае превысит 60. Разумеется, это произойдет при условии, что все существующие ныне планы по строительству новых линий будут реализованы. Также из табл. 1 очевидно, что число циклов в сетях Пекина и Шанхая в момент перехода сети во 2-й класс оказалось значительно больше, чем у всех остальных сетей. Это говорит о том, что, когда сети Пекина и Шанхая были циклическими сетями 1-го класса, они раскрыли свой потенциал топологической сложности в большей степени, чем все остальные сети.

Для оценки интенсивности роста сети используется показатель *интенсивности циклообразования*. Он рассчитывается как отношение числа циклов в сети к числу лет, прошедшему с момента образования в сети первого цикла до достижения сетью максимального уровня развития. Этот показатель отражает общую скорость роста и частоту изменения пространственной структуры сети, а также позволяет оценить потенциальную возможность дальнейшего роста сети. Расчеты выявили четкое разделение сетей по интенсивности образования циклов в сетях метрополитенов:

² Циклы — замкнутые контуры дорог в сети, т.е. фигуры, образуемые несколькими транспортными линиями в форме замкнутой ячейки.

³ 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. Данный термин был разработан С.А. Тарховым.

⁴ Циклический остов — компактное скопление циклов.

Шанхай – 4.3, Пекин – 3.5, Сеул – 2.7, Токио – 2.5, Нью-Йорк – 1.5, Лондон – 1.4. В наиболее старых сетях циклообразование шло наименее интенсивно. Сети метрополитена Токио и Сеула характеризуются средней интенсивностью циклообразования, а в наиболее молодых и быстро растущих сетях Пекина и Шанхая этот показатель максимален. Чем больше значение показателя, тем выше потенциальная возможность дальнейшего развития сети, т.е. вероятность образования новых циклов в Шанхае или Пекине значительно больше, чем в Лондоне.

Следующий количественный показатель – *соотношение площадей отдельных топологических ярусов* сети. Он отображает пространственные особенности внутреннего устройства циклического остова сети и позволяет сделать прогностическую оценку характера дальнейшего циклообразования.

Из табл. 2 видно, какую долю в общей площади циклического остова занимают разные топологические ярусы. 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 1-й, а в Сеуле – 2-й топологический ярус. Это свидетельствует о сокращении интенсивности циклообразования после образования в структуре сетей соответствующих ярусов.

Такое распределение позволяет сделать прогностическую оценку дальнейшего циклообразования и усложнения пространственной структуры сетей, если оно произойдет. В сети метрополитена Сеула оно будет происходить за счет дробления 2-го топологического яруса, а в сети метрополитена Лондона – дробления 1-го топологического яруса. При этом вероятность дальнейшего развития данных сетей в ближайшее время, исходя из табл. 2, невелика.

Чем больше в топологическом ярусе циклов и чем меньше их площадь, тем ярус более сложен с топологической точки зрения. Чем сложнее ярус, тем более он устойчив к различным нарушениям структурной целостности и тем меньше вероятность дальнейшего внутриярусного циклообразования за счет дробления уже существующих циклов. Увеличение числа циклов в таком ярусе возможно только в случае образования новых циклов в других ярусах: это может привести к переходу циклов из активно развивающегося яруса в более устойчивый ярус. Таким образом, наибольшим потенциалом к дальнейшему циклообразованию обладают наибольшие по площади ярусы с небольшим количеством циклов.

Из левой части табл. 3 видно, какова доля площади одного цикла в каждом из топологических ярусов рассматриваемых нами сетей. Однако перед тем, как делать какие-либо выводы, необхо-

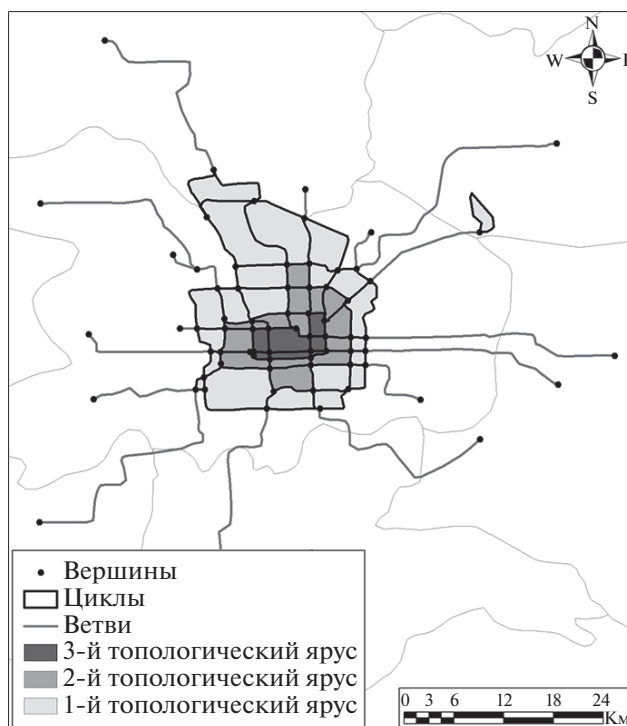


Рис. 1. Сеть метрополитена Пекина в 2016 г. Составлено автором по данным OSM.

димо взглянуть на распределение циклов по топологическим ярусам в изученных сетях.

При сравнении левой и правой частей табл. 3 четко видны наиболее и наименее развитые топологические ярусы. В Лондоне и Сеуле 3-й топологический ярус имеет наименьшее число циклов, и, хотя по площади они очень различны (в Лондоне их площадь наименьшая из всех, а в Сеуле – наибольшая), это говорит о степени их неразвитости. У 3-го топологического яруса в сети Сеула, в отличие от Лондона, 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 похожи по числу циклов. Это свидетельствует о том, что на этот момент 3-й топологический ярус в Шанхайской сети более устойчив, чем в сети Пекина.

Третий ярус в сетях метрополитена Токио и Нью-Йорка имеет схожие характеристики: они близки и по числу циклов, и по их средней площади. Большое число циклов в совокупности с их небольшим размером позволяет сделать следующий вывод: 3-й топологический ярус в сетях Нью-Йорка и Токио – наиболее сложный из рассматриваемых нами шести систем метрополитена.

При анализе циклов во 2-м топологическом ярусе мы видим схожую картину: по числу циклов

Таблица 1. Число циклов в сетях метрополитенов*

Город	Стадия			
	1-й класс	2-й класс	3-й класс	2016 г.
Нью-Йорк	2 (1881)	18 (1911)	70 (1920)	81
Лондон	2 (1871)	16 (1907)	53 (1999)	53
Сеул	3 (1984)	10 (1989)	36 (2001)	45
Пекин	2 (2000)	27 (2012)	51 (2016)	51
Шанхай	3 (2000)	28 (2011)	56 (2016)	56
Токио	6 (1964)	19 (1973)	36 (1989)	78

Составлено по расчетам автора.

* В скобках указан год, когда в циклическом остове сети появился новый топологический ярус.

сети Нью-Йорка и Токио превосходят остальные, а средняя площадь цикла в них превышает по размерам лишь сеть Лондона. Причина такой малой площади цикла в сети Лондона – 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 наблюдается та же особенность распределения циклов, что была обнаружена 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 первых 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 обоим этим сетям. Это говорит о слабых устойчивости и надежности 1-го топологического яруса сети Лондона. Первые топологические ярусы сетей Токио и Нью-Йорка имеют сходные характеристики: наибольшее число циклов с небольшой площадью. Сеульский метрополитен по числу циклов опережает метрополитены Пекина и Шанхая, но уступает им по площади. Таким образом, он занимает промежуточное положение.

На основе анализа количественных вариаций этих двух показателей (распределения циклов по

топологическим ярусам и средней площади цикла в ярусе) можно сделать некоторые промежуточные выводы относительно рассматриваемых сетей. Из изученных нами сетей Нью-Йорк и Токио имеют наиболее сложную пространственную структуру: в них наибольшее число циклов, и площадь этих циклов относительно невелика. Остальные сети развиты в недостаточной степени: число циклов в них, по нашему мнению, слишком мало для охватываемой ими площади – Сеула и Пекина это касается в большей, Шанхая – в меньшей степени. Ситуация с Лондоном неоднозначная: гипертрофированный 1-й топологический ярус сильно искажает общую картину – в 1-м ярусе циклов много, но они имеют большую площадь, 2-й топологический ярус в плане циклической развитости внутренней структуры слабо уступает Токио и Нью-Йорку, а 3-й топологический ярус имеет слишком мало циклов в сравнении с другими сетями, хотя их площадь и невелика.

Для получения полной и целостной характеристики пространственной структуры сети использованных нами параметров недостаточно. Необходимо проанализировать уровень связности рассматриваемых сетей, а для этого лучше всего подходят индексы Канского. Первым мы использовали модифицированный индекс альфа (α):

$$\alpha = \mu / (C_2^v - (v - 1)), \text{ где } C_2^v = (v! / (v - 2)! * 2!),$$

где μ – число циклов в сети, v – число вершин. Этот коэффициент отображает отношение между фактическим числом независимых замкнутых циклов в плоском графе и максимально возможным числом циклов при данном количестве вершин. Он показывает общую связность сети, исходя из максимально возможного количества циклов. Чем больше значение этого коэффициента, тем выше уровень раскрытия потенциала сети.

Из табл. 4 очевидна четкая дифференциация: наибольшего значения этот коэффициент достигает в сетях Пекина и Шанхая (у них произошел резкий рост после образования 3-го топологического яруса); в наиболее циклически развитых сетях – Токио и Нью-Йорка – значение коэффициента среднее, а наименьшее оно у сетей Сеула и Лондона. В целом во всех сетях наблюдалось по-

Таблица 2. Доля площади топологического яруса в 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.

Таблица 3. Распределение числа циклов и средней доли их площади по сетям шести метрополитенов в 2016 г.

Город	Средняя доля площади цикла в общей площади циклического остова, %, 2016 г.			Распределение числа циклов по топологическим ярусам, 2016 г.		
	1-й ярус	2-й ярус	3-й ярус	1-й ярус	2-й ярус	3-й ярус
Нью-Йорк	2.11	0.78	0.55	36	28	17
Лондон	2.60	0.32	0.06	30	21	2
Сеул	2.46	1.85	1.54	27	16	2
Пекин	3.17	1.56	0.92	22	16	8
Шанхай	2.78	0.93	0.46	26	20	10
Токио	2.07	0.67	0.57	35	27	16

Составлено по расчетам автора.

вышение уровня связности после образования третьего топологического яруса, но рост в сетях Пекина и Шанхая был наибольшим. Это позволяет выдвинуть предположение, что увеличение общего числа циклов в сети далеко не всегда ведет к пропорциональному росту связности, хотя недостаток циклов в ярусе после его образования (как это наблюдается в сетях Сеула и Лондона) также замедляет рост связности.

Второй индекс, использованный нами для анализа связности сетей, индекс бетта (β). Он рассчитывается по формуле:

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

где e — число ребер, v — число вершин. Индекс β показывает отношение числа ребер к числу вершин в графе. Очевидно, что, чем выше коэффициент бетта, тем выше средняя степень вершины в графе и тем лучше вершины сети (т.е. станции) связаны между собой.

Вариации значений этого коэффициента (табл. 5) аналогичны вариациям значений индекса альфа. 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.

В целом анализ топологической связности сетей позволил разделить все шесть систем метрополитена по уровню связности на три категории: 1) с наивысшим уровнем (Пекин и Шанхай); 2) со средним уровнем (Нью-Йорк и Токио); 3) с низким уровнем (Сеул и Лондон).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проанализировав все показатели и характеристики пространственных структур рассматриваемых сетей, мы выделили на основе доминирующих параметров три типа: 1) циклически развитые сети; 2) связные сети; 3) деформированные⁵ сети.

⁵ Термин “деформированные” в данном контексте означает лишь то, что некоторые ключевые показатели этих сетей сильно уступают остальным сетям.

Циклически развитые сети Токио и Нью-Йорка отличаются среди остальных наибольшими значениями топометрических характеристик. Эти сети превосходят все остальные по числу вершин, ребер, циклов. У них наиболее развитые топологические ярусы, что подтверждается распределением циклов и площадными характеристиками топологических ярусов и относящимся к ним циклов. Значения показателей связности у них средние. Интенсивность циклообразования низкая.

Связные сети Пекина и Шанхая отличаются средними значениями топометрических характеристик. Они имеют очень высокие значения показателей интенсивности циклообразования и высокие значения показателей связности.

Деформированные сети Лондона и Сеула отличаются 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 них низкие. Интенсивность циклообразования — средняя.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Представление сети метрополитена в виде графа позволяет абстрагироваться от внешних факторов (экстерналий) и решить необходимые для исследования задачи: изучить качественные и количественные свойства сети, процесс ее эволюции, оценить возможности дальнейшего роста.

Изученные сети метрополитенов росли и развивались в разное время, в разных географических и исторических условиях и совершенно разными путями с использованием различных технологий. Тем не менее при их анализе нами выявлен ряд общих пространственных закономерностей.

Наиболее развитые топологические ярусы характерны для сетей с большим количеством циклов. В сетях с малым количеством циклов внут-

Таблица 4. Динамика изменения значений коэффициента α при росте сетей

Город	Стадия		
	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.

Таблица 5. Динамика изменения индекса β при развитии сетей

Город	Стадия		
	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.

решения структура топологических ярусов часто гипертрофирована.

Анализ вариаций значений индексов связности Канского показал отсутствие зависимости между степенью связности сети и ее общей циклической развитостью. 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 три основных типа сетей метрополитенов: наиболее циклически развитые, наиболее связные и деформированные сети.

Эти типы выделены нами путем сопоставления числа циклов, развитости топологических ярусов, площадных характеристик топологических ярусов и циклов, показателей связности за 160 лет их существования. В дальнейшем планируется создать более полную типологию, охватывающую все метрополитены мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тархов С.А.* Эволюционная морфология транспортных сетей. Смоленск—М.: Универсум, 2005. 384 с.
2. *Derrible S., Kennedy C.* A network analysis of subway systems in the world using updated graph theory // *Transportation Res. Rec.* 2009. V. 2112. № 1. P. 17–25.
3. *Gattuso D., Miriello E.* Compared Analysis of Metro Networks Supported by Graph Theory // *Networks and Spatial Economics*. 2005. V. 5. № 4. P. 395–414.
4. *Haggett P., Chorley R.J.* Network Analysis in Geography. London: Edward Arnold, 1969. 348 p.
5. *Kansky K.J.* Structure of transportation networks: relationships between network geometry and regional characteristics. Chicago: Chicago Univ., Department of geography, Research paper, 1963. 155 p.
6. *Lam T.N., Schuler H.J.* Public Transit Connectivity. V.1. Report DMT-084. Irvine: Univ. of California. 1981. 51 p.
7. *Lam T.N., Schuler H.J.* Connectivity Index for System-wide Transit Route and Schedule Performance // *Transportation Res. Rec.* 854. TRB. National Res. Council. Washington, D.C., 1982. P. 17–23.
8. *Musso A., Vuchic V.R.* Characteristics of Metro Networks and Methodology for Their Evaluation // *Transportation Res. Rec.* V. 1162. TRB. National Res. Council. Washington, D.C., 1988. P. 22–33.
9. *Taaffe E.J.* Geography of Transportation. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 1996. 422 p.

Evolution of Spatial Structure of the World's Biggest Subway Networks

R. D. Panov*

Institute of Geography RAS, Moscow, Russia

*e-mail: romanpanov1994@gmail.com

Received July 1, 2019; revised June 30, 2019; accepted October 3, 2019

Subway systems play a very important role in development of modern cities. Their spatial structure changes and transforms as system grows. Subway networks are key components in evolution of cities' spatial structure. It must be mentioned that current design of the most world's subways doesn't match with their original plan. In this article we make a comparative analysis of spatial structures' evolution for world's biggest subway networks in: Shanghai, Beijing, Tokyo, Seoul, London, and New York. Analysis is based on comparing the quantitative and qualitative properties of networks. Methodology used in this research is based on the works of K. Kansky and S. Tarkhov. The key component of the research is transforming of network to graph using GIS-technologies. Networks were compared on several topological indicators. The results let us find the key moments of networks' spatial structures development and divide them into several groups.

Keywords: subway networks, spatial structure, graph theory

REFERENCES

1. Tarkhov S.A. *Evolutsionnaya morfologiya transportnykh setei* [Evolutional Morphology of Transport Networks]. Smolensk, Moscow: Universum Publ., 2005. 384 p.
2. Derrible S., Kennedy C. A network analysis of subway systems in the world using updated graph theory. *Transport. Res. Rec.*, 2009, vol. 2112, no. 1, pp. 17–25.
3. Gattuso D., Miriello E. Compared analysis of metro networks supported by graph theory. *Netw. Spat. Econ.*, 2005, vol. 5, no. 4, pp. 395–414.
4. Haggett P., Chorley J. *Network Analysis in Geography*. London: Edward Arnold Publ., 1969. 348 p.
5. Kansky K.J. *Structure of Transportation Networks: Relationships between Network Geometry and Regional Characteristics*. Chicago: Univ. of Chicago, 1963. 155 p.
6. Lam T.M., Schuler H.J. *Public Transit Connectivity*. Irvine: Univ. of California, 1981, vol. 1. 51 p.
7. Lam T.N., Schuler H.J. Connectivity index for systemwide transit route and schedule performance. *61st Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, D.C., 1982, pp. 17–23.
8. Musso A., Vuchic V.R. Characteristics of metro networks and methodology for their evaluation. *Transport. Res. Rec.*, 1988, vol. 1162, pp. 22–33.
9. Taaffe E.J., Gauthier H.L., O'Kelly M.E. *Geography of Transportation*. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 422 p.