

Методика расчета загрузки линий метрополитена

Э. А. САФРОНОВ, докт. техн. наук, профессор,

К. Э. САФРОНОВ, канд. техн. наук, доцент, кафедра «Городское строительство и хозяйство»

Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, г. Омск



Новая методика позволяет с большой точностью рассчитать основные параметры загрузки строящейся линии метрополитена: определить объемы перевозок, пассажиропотоки, пассажирооборот станций, объем транспортной работы, среднюю дальность поездки по периодам эксплуатации. Результаты расчетов загрузки линии по времени и направлениям могут быть использованы для определения потребности в подвижном составе, интервала движения, для выбора объемно-планировочного решения станций.

Потребность в скоростных видах транспорта, обострившаяся в России в последние годы, вызвана рядом причин. Крупные города РФ построены по генпланам, основанным на устаревших нормативах развития транспортной инфраструктуры, рассчитанной на 100–150 автомобилей на тысячу жителей. Сейчас этот уровень превышен в 2–3 раза, а перевозки на общественном транспорте в отдельных городах снизились до 30 %. Как следствие, возникли транспортные проблемы: заторы, снижение скорости транспортных потоков, дополнительный ущерб для экономики за счет потерь времени, рост ДТП, травматизма, вредных выбросов, усиление шума, снижение доступности объектов.

В России в 2000–2009 гг. в год в среднем строилось по 3,2 км линий метро в двухпутном исчислении [1]. За последние 20 лет метрополитен появился лишь в седьмом городе России — Казани, на очереди — столица зимней Олимпиады Сочи. Из-за столь медленных темпов строительства метро выход из сложной экологической, транспортной и экономической ситуации видится в интеграции современных скоростных производственных видов транспорта.

За рубежом смело соединяют метро с пригородными железными дорогами и трамваем. Линии подземного трамвая существуют в Антверпене, Шарлеруа, Брюсселе, Гааге, Бостоне, Сан-Франциско, Вене, в некоторых городах Германии и других стран.

В нашей стране этот процесс тормозится, во-первых, из-за несовершенства законодательства: метрополитен был исключен из сферы правового регулирования городского пассажирского

транспорта, отсутствует законодательная база для развития перспективных видов внеуличного транспорта, в регионах нет норм регулирования, организации, правил движения и технической эксплуатации метрополитенов и т. д. На решение этих проблем, в частности, направлен проект Федерального закона «О метрополитенах и других видах внеуличного транспорта», подготовленный Министерством транспорта РФ 15 июня 2011 г.

Во-вторых, развитие внеуличного транспорта сдерживает устаревшая нормативно-методическая база. Актуализированный «СНиП 32-02-2003. Метрополитены» еще не утвержден, в нем отсутствует механизм развития инновационных видов транспорта, нет примеров расчета перспективной загрузки строящихся метрополитенов.

В настоящее время традиционное метро строится в Омске, Красноярске и Челябинске, во многих городах проектируются системы легкорельсового транспорта. В этой ситуации особую актуальность приобрела разработка новых методов расчета загрузки строящихся метрополитенов в условиях перераспределения пассажирских потоков между видами транспорта.

Расчет пассажиропотока: модели и методы

Основоположниками применения математических методов в расчетах пассажиропотоков в нашей стране были А. Х. Зильберталь, Г. В. Шелейховский и др. А. Х. Зильберталь впервые применил вероятностный метод для расчета распределения передвижений и поездок по длине для городов с различной конфигурацией транспортной сети. Для опи-

сания закономерностей формирования потоков использовались различные математические модели [2–7].

Чтобы определить направление и численность пассажиропотоков, город необходимо разбить на расчетные районы, число которых зависит от величины города. Составляется матрица корреспонденций, в которой учитывается количество проживающих в каждом районе, отправляющихся и прибывающих, развитие транспортной инфраструктуры и т. д. Подвижность населения зависит от специфики планировочных районов: наличия промышленных предприятий, объектов социального и культурного назначения, жилых зон. Показатели уточняются с помощью обследований. Алгоритмы и программы для ЭВМ для расчета пассажиропотоков открыли широкие возможности для исследований и вариантного проектирования. Известны модели с использованием коэффициентов роста, Детройтский метод, метод Фратара, энтропийные модели и т. д. [8].

Однако в новых градостроительных условиях нет надежных методов расчета загрузки строящихся метрополитенов в крупных городах. Основные параметры строящихся станций метрополитенов рассчитывают по нормативам исходя из максимальных перспективных пассажиропотоков [9]. Пропускную и провозную способность линии на периоды эксплуатации рекомендуется определять в зависимости от расчетного числа пассажиров в поезде на перегоне, наиболее загруженном в часы максимальных перевозок.

В настоящее время для обеспечения работы метрополитена используются детерминированные модели: в Москве, например, для расчета пассажиропотоков пересадочного узла существует сертифицированный программный комплекс ЕММЕ, поэтому прогнозирование пассажиропотоков производится по средним значениям предыдущих лет. Для прогнозирования входного пассажиропотока с заданной надежностью современные исследователи разработали стохастическую математическую модель [10]. Иными словами, для того, чтобы программный комплекс выдавал

адекватные показатели, надо учесть характеристики конкретного мегаполиса.

Сложнее обстоят дела в городах, где метро только проектируется. Чтобы рассчитать пассажиропоток для строящейся линии, хотя бы с некоторой допустимой точностью необходимо знать, сколько человек поедет в определенном направлении. Опросов о том, поедут ли люди в таком-то направлении при открытии новой линии или же выберут альтернативный маршрут, никто не проводит.

Эта проблема была решена при расчете загрузки 1-й линии Омского метрополитена, выполненном специалистами Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии (СибАДИ) по заданию НПО «Мостовик» в 2011 г.

В связи с изменением градостроительной ситуации в Омске, появлением большого количества личных автомобилей, индивидуальных перевозчиков и необходимостью расчета загрузки отдельных участков метрополитена старые методы расчета стали неэффективны и требовали совершенствования. Разрабатывая новый аналоговый метод, специалисты СибАДИ учли отечественный и мировой опыт.



Рис. 1. Схема Омского метрополитена

Таблица 1. Расчет показателей работы 1-й линии Омского метрополитена, 2016–2045 гг.

Год	Длина линии, км	Удельная среднесуточная загрузка линии, тыс. пасс./км	Среднесуточный объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./сут.	Среднечасовой объем перевозок в максимальном направлении от утреннего в двух направлениях, тыс. пасс./ч (КМ = 0,1–0,12)	Среднечасовой объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./ч (КП = 0,8–0,75)	Пиковый объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./ч (с учетом 15-минутного максимума K15 = 1,2)	Пиковый объем перевозок в максимальном направлении, тыс. пасс./ч (Kmax = 0,8; 0,75; 0,7; 0,65)	Пиковый объем перевозок в минимальном направлении, тыс. пасс./ч (Kmin = 0,2; 0,25; 0,3; 0,35)
	L _М	ΔQ	Q _с	Q _{чmax}	Q _{ч2}	Q _{п15}	Q _{пmax}	Q _{пmin}
Линия в черте города (Западная — Сибирский проспект)								
2016	7,3	12,6	92,0	11,0	13,7	18,0*	14,4	3,6
2025	18,0	16,4	295,6	29,6	39,4	47,3	35,5	11,8
2035	23,8	16,7	397,5	39,8	53,0	63,6	44,5	19,1
2045	25,6	17,8	455,0	45,5	60,7	72,8	47,3	25,5
Вся линия (Аэропорт — Сибирский проспект)								
2016	7,3	12,6	92,0	11,0	13,7	18,0*	14,4	3,6
2025	35,0	9,9	346,7	34,7	43,3	52,0	39,0	13,0
2035	40,8	11,4	466,7	46,7	58,3	70,0	49,0	21,0
2045	42,6	12,5	533,3	53,3	66,7	80,0	52,0	28,0

* Для ст. «Библиотека им. А. С. Пушкина» принят K_{кон15} = 1,4, как для пересадочных и временно конечных станций [9].

Порядок расчетов следующий. На основе анализа работы действующих метрополитенов в городах страны, аналогичных по численности и плотности населения, выявляются зависимости удельной загрузки линии от ее длины и расположения в плане города. В зоне тяготения станций уточняются градостроительные показатели: делается прогноз численности населения и параметров объектов тяготения, определяется объем пассажирских перевозок на существующей сети городского пассажирского транспорта. Затем на будущей линии метро определяются объемы перевозок, пассажиропотоки, пассажирооборот станций, транспортная работа, средняя дальность поездок по периоду эксплуатации. Рассмотрим применение этой методики на конкретном примере.

Определение удельной загрузки линии

Для расчетов загрузки 1-й линии Омского метрополитена использовали данные генплана города о численности населения, материалы обследований и нормативные коэффициенты [9]. Коэффициенты неравномерности распределения пассажиропотоков по времени и направлениям (K_М, K_П, K₁₅, K_{max}) были уточнены путем натурных обследований пассажирских потоков наземных видов транспорта, проведенных в ноябре 2011 г. в сечении будущих станций.

Темпы ввода в эксплуатацию 1-й линии и схема скорректированы в новой концепции инновационного развития Омского метрополитена

(рис. 1). Пуск первой очереди из пяти станций приурочен к 300-летию юбилею города в 2016 г.

К 2045 г. длина 1-й линии составит 42,6 км, при этом участок 25,6 км будет находиться в пределах городской застройки, остальные 17 км до ст. «Западная» пройдут за ее пределами — в направлении нового международного аэропорта Омск — Федоровка.

Удельную загрузку линии в городской черте определяли по отчетным данным других городов (табл. 1, рис. 2). На основе этой статистики приняты значения загрузки по городской линии: от 12,6 тыс. пасс./км сут. в 2016 г. до 17,4 тыс. пасс./км сут. в 2045 г.

По пригородному участку удельную загрузку определили с учетом развития прилегающих к линии территорий и аэропорта. В качестве примера приведем расчет основных параметров загрузки 1-й линии.

Среднесуточный объем перевозок в двух направлениях

$$Q_c = \Delta Q \times L_M = 12,6 \times 7,3 = 92,0 \text{ тыс. пасс./сут.},$$

где ΔQ — удельная среднесуточная загрузка линии, тыс. пасс./км;

L_М — длина линии, км.

Среднечасовой объем перевозок в максимальном направлении

$$Q_{чmax} = Q_c \times K_M = 92,0 \times 0,12 = 11,0 \text{ тыс. пасс./ч},$$

где Q_с — среднесуточный объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./сут.;

K_М — коэффициент приведения среднесуточного объема перевозок в двух направлениях к среднечасовому в максимальном направлении.

Среднечасовой объем перевозок в двух направлениях (по данным обследований)

$$Q_{\text{ч2}} = Q_{\text{чmax}} / K_{\text{п}} = 11,0 / 0,8 = 13,7 \text{ тыс. пасс./ч,}$$

где $Q_{\text{чmax}}$ — среднечасовой объем перевозок в максимальном направлении, тыс. пасс./ч;

$K_{\text{п}}$ — коэффициент приведения объема перевозок в максимальном направлении к объему в двух направлениях.

Пиковый объем перевозок в двух направлениях с учетом 15-минутного максимума

$$Q_{\text{п15}} = Q_{\text{пр.ст}} \times K_{\text{пр15}} + Q_{\text{к.ст}} \times K_{\text{кон15}} = 5,83 \times 1,2 + 7,86 \times 1,4 = 18,0 \text{ тыс. пасс./ч,}$$

где $Q_{\text{пр.ст}}$ — объем перевозок в двух направлениях кроме выхода на конечной ст. «Библиотека им. А. С. Пушкина», тыс. пасс./ч;

$Q_{\text{к.ст}}$ — выход в на конечную ст. «Библиотека им. А. С. Пушкина» в максимальном направлении, тыс. пасс./ч;

$K_{\text{пр15}}$ — коэффициент приведения часового пика к 15-минутному максимуму для промежуточных станций 1,2;

$K_{\text{кон15}}$ — коэффициент приведения часового пика к 15-минутному максимуму для конечных станций 1,4.

Пиковый объем перевозок в максимальном направлении

$$Q_{\text{пmax}} = Q_{\text{п15}} \times K_{\text{max}} = 18,0 \times 0,8 = 14,4 \text{ тыс. пасс./ч,}$$

где $Q_{\text{п15}}$ — пиковый объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./ч;

K_{max} — коэффициент приведения пикового объема перевозок в максимальном направлении к объему перевозок в двух направлениях (по мере удлинения линии меняется от 0,8 до 0,65).

Пиковый объем перевозок в минимальном направлении

$$Q_{\text{пmin}} = Q_{\text{п15}} \times K_{\text{min}} = 18,0 \times 0,2 = 3,6 \text{ тыс. пасс./ч,}$$

где $Q_{\text{п15}}$ — пиковый объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./ч;

K_{min} — коэффициент приведения пикового объема перевозок в минимальном направлении к объему перевозок в двух направлениях (по мере удлинения линии меняется от 0,2 до 0,35).

Тыс. пасс./км

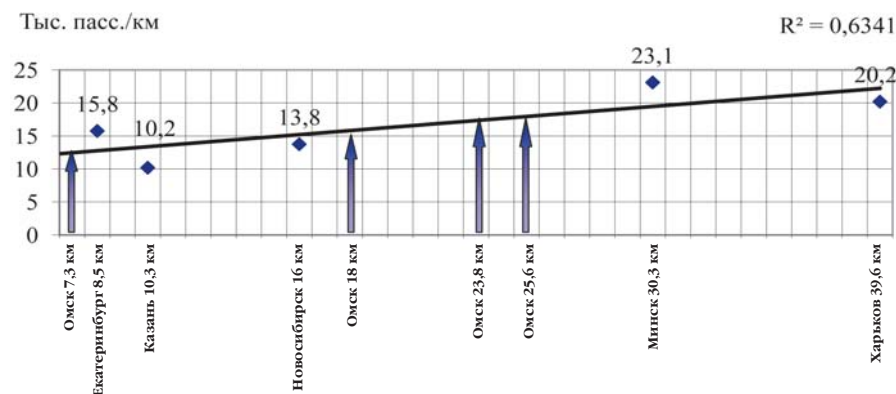


Рис. 2. Зависимость удельной загрузки метро от длины линий по городам СНГ, тыс. пасс./км (в среднем в сутки)

Таблица 2. Расчет загрузки 1-й линии Омского метрополитена в 2035 г. (количество пассажиров в час пик с учетом 15-минутного максимума)

Станция	Аэропорт → Сибирский проспект			Сибирский проспект → Аэропорт			Пассажирооборот станции
	Вошло	Поток на перегоне	Вышло	Вошло	Поток на перегоне	Вышло	
Аэропорт	1000	1000	—	—	820	820	1820
Камышловская	200	1100	100	50	820	50	400
Горячий ключ	250	1200	150	80	820	90	570
Дружино	300	1300	200	90	830	160	750
Тюкалинская	350	1350	300	100	900	180	930
Захламинская	400	1350	400	150	980	200	1150
Западная	2200	3050	500	300	1030	1300	4300
Солнечная	3000	5250	800	430	2030	1400	5630
Молодежная	4000	8350	900	500	3000	1500	6900
Рокоссовского	4500	10350	2500	700	4000	1700	9400
Соборная	5500	13250	2600	1300	5000	1800	11200
Кристалл	4000	14850	2400	1100	5500	1200	8700
Заречная	4800	16650	3000	1300	5600	1300	10400
Библиотека им. А. С. Пушкина	4400	15550	5500	1900	5600	2100	13900
Торговый центр	6500	15750	6300	2600	5800	2800	18200
Маршала Жукова	3400	15650	3500	1900	6000	1900	10700
Лермонтовская	2000	11650	6000	2000	6000	1100	11100
Парковая	1500	6950	6200	1600	5100	1000	10300
Туполевская	500	2950	4500	1500	4500	300	6800
Рабочая	200	2150	1000	1200	3300	100	2500
Московская	—	2150	2150	2200	2200	—	4350
Всего/мах	49000	16650	49000	21000	6000	21000	140000

Значительная величина пассажирского потока в направлении центра города на пусковом участке метро в час пик объясняется тем, что в районе ст. «Библиотека им. А. С. Пушкина» на небольшом расстоянии расположено много остановок наземного общественного транспорта, административных зданий, учебных заведений, жилых, торговых и культурных объектов. Учитывая высокую надежность и комфортность метро, можно ожидать педертока пассажиров с различных видов наземного транспорта. Следует особо отметить острую нехватку парковочных мест в центральной части города, что также позволит метрополитену стать альтернативой личному автотранспорту.

Распределение загрузки по длине линии

При распределении пассажиропотоков по длине 1-й линии метро использованы данные генерального плана города, прогноз численности населения в зоне станций, проекты планировки территорий и результаты обследований, представленные в виде коэффициентов неравномерности [4].

В табл. 2 показана загрузка участка 1-й линии (21 станция), предполагаемая в 2035 г. С северной стороны ветка пойдет до аэропорта Федоровка, с южной — до ст. «Московская». Данная линия примет на себя основную нагрузку наземного пассажирского транспорта с Левобережья до Московки, на нее частично переклучатся пассажирские потоки с мостов им. 60-летия ВЛКСМ и Ленинградского. В районе ст. «Заречная» на месте старого аэропорта появится жилой массив с большим количеством объектов тяготения. Станции «Парковая» и «Туполевская» обеспечат доступность промышленной зоны и района Чкаловский. Перераспределятся потоки наземного транспорта, появятся подвозящие маршруты к станциям метрополитена на промежуточных и конечных станциях. Станция «Торговый центр» станет пересадочной, что резко увеличит ее пассажирооборот. Временно конечная ст. «Московская» соберет потоки с Москов-

ки и Сибирского проспекта. Встречные пассажиропотоки распределятся в соотношении 70 к 30 % (рис. 3). Пассажирооборот станций (суммарный вход и выход) составит 140 тыс. пассажиров в час пик (рис. 4).

Итоговые показатели

Основные итоговые показатели — работа транспорта и средняя дальность поездки в час пик — рассчитываются следующим образом:

$$A_{п} = \sum_{i=1}^n Q_{пер}^i l_{пер}^i;$$

$$l_{ср} = \frac{A_{п}}{\sum_{n=1}^n Q_{п}^i},$$

где $A_{п}$ — работа транспорта в час пик, пасс./км;

$Q_{пер}^i$ — пассажиропоток в двух направлениях на i -м перегоне, пасс./ч;

$l_{пер}^i$ — длина i -го перегона, км;

$l_{ср}$ — средняя дальность поездки, км;

$Q_{п}^i$ — суммарный объем перевозок в двух направлениях, пасс./ч.

Основные показатели работы линии метрополитена представлены в табл. 3. Пиковые пассажиропотоки будут сконцентрированы на перегоне, разделяющем правый и левый берег Иртыша. При строительстве второй линии они сместятся в сторону пересадочной ст. «Торговый центр».

Результаты расчетов загрузки линии используются для определения потребности в инновационном подвижном составе. Объемно-планировочные решения станций должны соответствовать их расчетной загрузке и отвечать требованиям доступности [11]. Методике расчета загрузки строящегося метрополитена целесообразно использовать при уточнении нормативно-методических документов.

Совершенствование законодательной и нормативно-методической базы позволит на инновационной основе сдвинуть с мертвой точки решение вопросов об ускорении строительства

Таблица 3. Основные показатели работы 1-й линии Омского метрополитена до 2045 г.

Год	Длина линии, км	Удельная среднесуточная загрузка линии, тыс. пасс./км	Среднесуточный объем перевозок, тыс. пасс./сут.	Годовой объем перевозок, млн пасс./год	Пиковый объем перевозок в двух направлениях, тыс. пасс./ч	Работа транспорта, в час пик, тыс. пасс./км	Средняя дальность поездки, км
	L_m	ΔQ	Q_c	Q_f	$Q_{п}$	$A_{п}$	$l_{ср}$
2016	7,3	12,6	92,0	33,6	18,0	75,6	4,2
2025	35,0	9,90	346,7	126,5	52,0	249,6	4,8
2035	40,8	11,4	466,7	170,3	70,0	350,0	5,0
2045	42,6	12,5	533,3	194,6	80,0	408,0	5,1

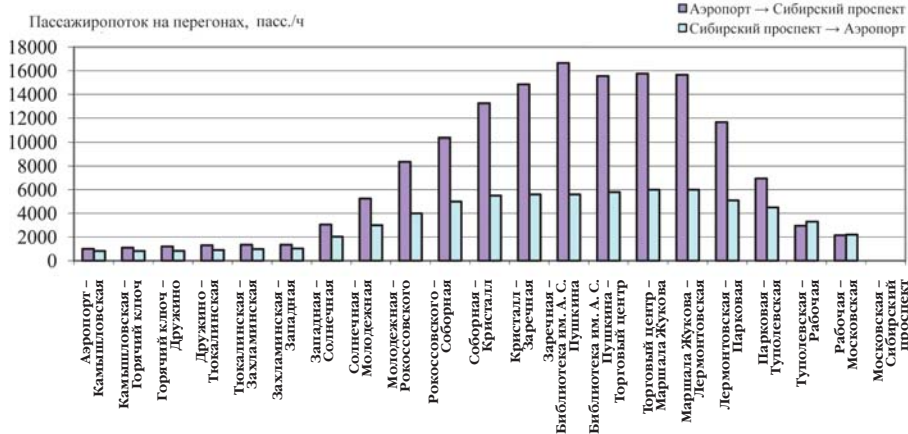


Рис. 3. Пассажиропотоки на перегонах Омского метрополитена в 2015 г. в час пик с учетом 15-минутного максимума

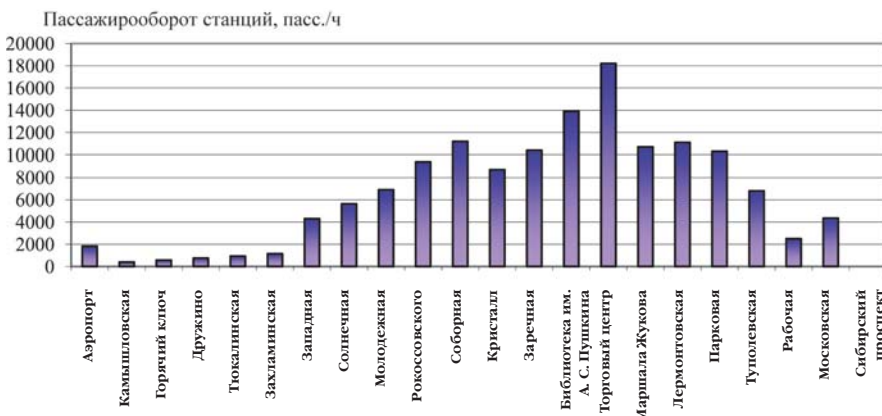


Рис. 4. Пассажирооборот станций Омского метрополитена в 2035 г. в час пик с учетом 15-минутного максимума (вход и выход)

метрополитенов в крупнейших городах [12]. Например, переход с традиционного метрополитена на современные виды скоростного рельсового транспорта с учетом мирового опыта позволит сократить стоимость и сроки строительства в 3–4 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Основные показатели транспортной деятельности в России. 2010: Стат. сб. / Росстат. М., 2010. URL: <http://www.gks.ru>.
2. Овечников Е. В., Фишельсон М. С. Городской транспорт: учеб. для вузов. М.: Высш. шк., 1976.
3. Сафронов Э. А. Определение закономерностей, используемых в расчетах пассажиро-

потоков // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1971. № 6.

4. Фролов Ю. С., Голицынский Д. М., Ледяев А. П. Метрополитены: учеб. для вузов / под ред. Ю. С. Фролова. М.: Желдориздат, 2001.

5. Шершевский Ю. З. Пассажиропотоки на сети общественного пассажирского транспорта: определение фактических значений // Социально-экономические проблемы развития транспортных систем городов и зон их влияния. Екатеринбург: УрГЭУ, 2004.

6. Якшин А. М., Говоренкова Т. М. и др. Графоаналитический метод в градостроительных исследованиях и проектировании. М., 1979.

7. Якушкин Н. М. Пассажирские перевозки на метрополитенах. М.: Транспорт, 1982.

8. Горев А. Э. Основы теории транспортных систем: учеб. пособие. СПбГАСУ. СПб., 2010.

9. СНиП 32-02-2003. Метрополитены. Актуализированная редакция. М., 2012.

10. Леванова Д. С. Прогнозирование пассажиропотока метрополитена на основе математических моделей: дисс. ... канд. техн. наук. СПб., 2005.

11. Сафронов Э. А. Транспортные системы городов и регионов: учеб. пособие. М.: АСВ, 2007.

12. Сафронов Э. А., Сафронов К. Э., Семенова Е. С. Инновационный путь развития метрополитенов в современных условиях // Известия Транссиба. 2010. № 3 (3).