

Математические модели в формировании эффективных транспортных систем



О. В. Евсеев,
д. т. н., директор
ФГБУ «НЦКТП
Минтранса России»



М. Р. Якимов,
д. т. н., профессор
кафедры «Организация
и безопасность движения»
Московского автомобильно-
дорожного государственного
технического университета

Разработка документов транспортного планирования регламентируется рядом нормативных документов и требований заказчиков, которые по-разному формулируют требования к использованию инструментов моделирования при обосновании принимаемых решений.

При формировании эффективных транспортных систем городских агломераций многообразие требований к использованию транспортного моделирования, изложенных в технических заданиях на разработку документов транспортного планирования, часто затрудняет проведение исследований, увеличивает стоимость работ и осложняет их приемку [1]. Использование математических моделей целесообразно систематизировать и упорядочить так, чтобы каждая модель отражала определенный набор параметров и критериев транспортного планирования и отвечала за какой-то этап в процессе формирования управленческих решений, направленных на повышение эффективности функционирования транспортной системы.

Основное внимание в статье уделяется использованию математических моделей, их классификации по типу и назначению, взаимосвязи друг с другом и последовательности применения при решении задач транспортного планирования.

Основные классы транспортных моделей

В последнее время широкое применение в исследованиях получили прогнозные и имитационные транспортные модели. Классические четырехстадийные прогнозные

модели наиболее распространены для решения задач транспортного планирования и оценки эффективности проектов модернизации различных систем транспорта [2]. Как правило, такие модели основаны на гравитационном или энтропийном алгоритме формирования модели транспортного спроса, при этом последние получили наибольшее распространение [3–5]. Расширение гравитационных моделей представляют собой модели конкурирующих центров, в которых учитывается влияние агломераций районов на объем корреспонденции между парой районов, например путем ввода дополнительных индексов посещаемости агломерации районов [6, 7]. В моделях, основанных на поездках (trip-based models), используются отдельные матрицы корреспонденций, а модели, базирующиеся на маршрутах (tour-based models), явно описывают цепочки передвижений. Примерами последних служат модели Стокгольма [8] и Нью-Гемпшира [9]. Модели, выстраиваемые по принципу рассмотрения полных схем дневной активности человека, носят название моделей активности (activity-based), где под активностью понимается любая разновидность деятельности, требующая передвижения, например поход в магазин или путь на работу.

Для решения задач в области организации дорожного движения используют

Таблица 1. Классификация транспортных моделей по: назначению, объектам и целям моделирования, входным и выходным данным [12]

Виды моделей	Назначение	Объект моделирования	Цель моделирования	Вход (исходные данные)	Выход (результат моделирования)
Оптимизационные	Поиск оптимального распределения транспортного спроса	Транспортная система городской агломерации	Формирование сценариев развития	Цели и ограничения развития	Сценарии развития
Прогнозные	Прогноз загрузки объектов транспортной инфраструктуры	Транспортный поток на объектах транспортной инфраструктуры	Отбор оптимальных сценариев развития	Сформированные сценарии развития	Эффективные сценарии развития. Параметры транспортного потока
Имитационные	Оценка параметров и визуализация процессов функционирования транспорта	Транспортное средство, участник дорожного движения	Оценка проектов организации дорожного движения	Параметры транспортного потока	Эффективный проект организации дорожного движения

ся микродинамические модели, из них отметим модель оптимальной скорости Ньюэлла, модель следования за лидером Джеренал Моторс, модель «разумного водителя» Трайбера, модель Вайдеманна. Этот класс моделей предназначен для наиболее точной имитации движения отдельных транспортных средств в потоке. В результате вычислительных экспериментов получают параметры транспортных потоков: скорость, плотность, задержки, время прохождения выбранных участков сети, длину очереди при возникновении затора.

Оптимизационные транспортные модели используют для поиска вариантов (сценариев) развития транспортной системы городской агломерации, оптимальных по определенному критерию при заданных ограничениях. В постановке задачи математического программирования критерии и ограничения отражают те или иные функциональные характеристики транспортной системы и параметры потребностей людей, состояния окружающей среды, рисков ДТП и другие показатели качества жизни населения. Один из вариантов построения оптимизационных транспортных моделей заключается в анализе затрат и эффектов с целью эффективного распределения транспортного спроса по территории городской агломерации [10, 11].

Большое многообразие форм и методов построения транспортных моделей, а также задач моделирования, решаемых для городов и городских агломераций, требует типизации моделей и упорядочивания их использования при транспортном планировании.

Модели, используемые при изучении функционирования транспортных систем, можно разделить по объектам исследования, целям моделирования, входным и выходным данным, а также по видам решаемых задач на оптимизационные, прогнозные и имитационные (табл. 1).

Все модели имеют единую логическую структуру, состоящую из блока исходных данных и набора определяющих соотношений. Однако согласно своему назначению они поддерживают разные этапы принятия управленческих решений. Соответственно результатом моделирования может быть поиск некоего равновесного состояния транспортной системы либо прогноз этого состояния, в том числе с учетом изменения транспортной инфраструктуры.

Последовательное использование оптимизационных, прогнозных и имитационных моделей подходит для решения всех типовых задач, стоящих сегодня перед транспортными инженерами: транспортно-

го планирования, организации дорожного движения, совершенствования системы пассажирского транспорта общего пользования.

Структура и взаимосвязь транспортных моделей

При использовании инструментов моделирования нужно прежде всего определить показатели функционирования транспортной системы городской агломерации: целевой индикатор и расчетные показатели, однозначно на него влияющие. Целевым индикатором может выступать, например, время реализации транспортных корреспонденций всех пользователей инфраструктуры всех видов транспорта на всей территории городской агломерации. Расчетными показателями могут быть параметры транспортной и/или маршрутной сети, виды транспорта и другие ресурсы транспортной системы, оценки влияния транспорта на состояние окружающей среды. При оптимизации целевого индикатора какие-то показатели могут выступать в качестве ограничений, например предельный уровень негативного влияния транспорта на состояние окружающей среды и использование ресурсного обеспечения развития транспортной системы.

Выбор управленческих решений означает поиск решений, обеспечивающих максимальное значение целевого индикатора при сохранении действующих ограничений. В результате такой процедуры формируются предложения по направлениям (сценариям) развития объектов транспортной инфраструктуры. Выбор приоритетных сценариев и формирование программы развития транспортной инфраструктуры происходит на основании сопоставления влияния сценариев на целевой индикатор (например, на время реализации транспортных корреспонденций). Каждый сценарий, вошедший в программу развития транспортной инфраструктуры, рассматривается в нескольких вариантах его реализации (в частности, организации дорожного движения). Сравнение вариантов и выбор наиболее эффективного из них происходит на основании сопоставления показателей эффективности вариантов (расчетных показателей второго уровня).

Для реализации процедуры формирования и выбора управленческих решений может быть рекомендована схема последовательного применения моделей (рис. 1).

В общем случае для решения задач транспортного планирования требуется четыре класса моделей, представленных на рис. 1. Цель последовательного применения этих моделей — переход от оценки укрупненных вариантов (сценариев) дости-

жения максимального значения целевого индикатора транспортного планирования (например, качества жизни населения и качества функционирования транспортной системы) на территории городской агломерации к выработке конкретных управленческих решений по развитию транспортной системы.

Рассмотрим детальнее логическую структуру и принципы работы транспортных моделей основных классов (см. рис. 1). Основная цель модели текущего состояния — воспроизвести текущее состояние функционирования транспортной системы в терминах интенсивности транспортных и пассажирских потоков. Первая задача этой модели состоит в формировании и калибровке существующего на территории городской агломерации транспортного спроса. Вторая задача модели текущего состояния заключается в оценке эффективности функционирования транспортной системы городской агломерации по глобальным показателям. Модель текущего состояния, как и любая другая модель, состоит из базы данных и определяющих соотношений. База данных включает данные о транспортном предложении и данные о транспортном спросе. Транспортное предложение включает инфраструктуру транспорта общего пользования и инфраструктуру индивидуального транспорта (рис. 2).

Сформированная и откалиброванная модель транспортного спроса дает исходные данные о текущем и прогнозном транспортном спросе для остальных транспортных моделей городской агломерации. Создав такую модель, можно поставить и решить задачу поиска оптимального распределения транспортного спроса по различным видам транспорта и по территории городской агломерации. Для этого используют оптимизационную модель, предназначенную для оптимального распределения имеющихся в распоряжении сообщества (жителей городской агломерации) ресурсов, в частности транспортной инфраструктуры, подвижного состава, для наиболее эффективного удовлетворения транспортных потребностей, т. е. определения, какими способами и какими видами транспорта целесообразно осуществлять транспортные корреспонденции в пределах городской агломерации. Отметим, что способы и виды осуществления транспортных корреспонденций определяют сценарии развития объектов транспортной инфраструктуры.

Технология использования оптимизационных моделей дает транспортному инженеру не только возможность выбора определенных готовых проектов, но и ин-

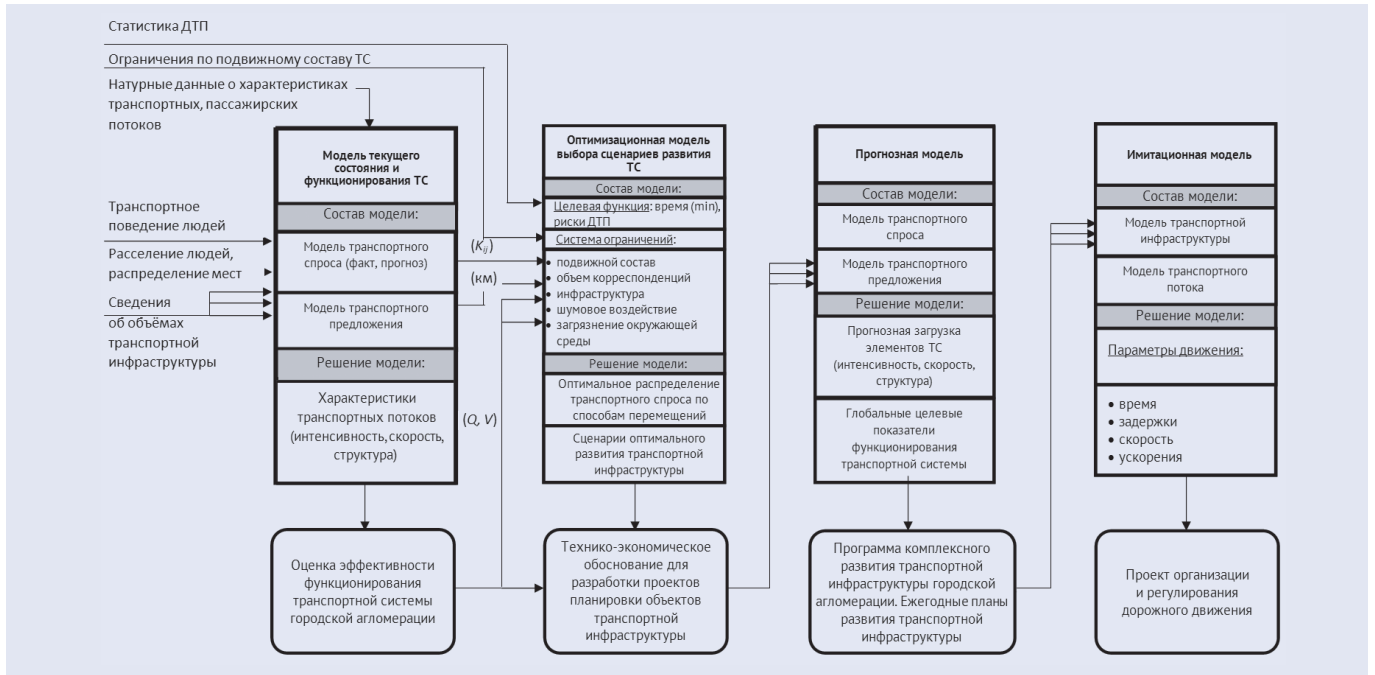


Рис. 1. Взаимосвязь математических моделей различного назначения при решении задач развития транспортных систем

струмент для формирования новых сценариев. Представляется обоснованным включение в оптимизационные модели таких показателей, как шумовое загрязнение среды, загрязнение атмосферного воздуха, учет рисков ДТП. Критерием оптимальности может быть назначен любой из показателей, допускающих формализованное представление, остальные используются как ограничения. Подобный подход позволяет сформировать эффективные сценарии развития транспортных систем городских агломераций с учетом выбранного критерия оптимальности в условиях сохранения действующего (сложившегося) уровня эффективности по другим показателям, например техносферной безопасности на исследуемой территории [13–15].

Далее представлен пример структуры и состава оптимизационной транспортной модели, исходными данными для которой служит модель описания прогнозного транспортного спроса (получена из модели текущего состояния), параметры транспортных потоков (найжены из модели текущего состояния), а также модель транспортного предложения, информация о подвижном составе и о дорожно-транспортных происшествиях.

Оптимизационная модель представляет собой модель математического программирования (в самом простом случае — линейного программирования) для поиска экстремума целевой функции:

$$Z = \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^3 \left(\frac{1}{V_1} \cdot I_{rs} \cdot X_{rs1} + \frac{1}{V_2} \cdot I_{rs} \cdot X_{rs2} + \frac{1}{V_3} \cdot I_{rs} \cdot X_{rs3} \right) \rightarrow \min \quad (1)$$

где r — область исследования (транспортная зона), представляющая собой агрегированный транспортный район, перемещение в котором происходит без смены типа транспортного средства; s — индекс типа перемещения в области исследования: $s=1$ обозначает транзитное движение в области r , $s=2$ — пограничное перемещение (из области r в другую область), $s=3$ — внутренние перемещения в области r ; V_k — средняя скорость движения транспортного средства вида k (км/ч), в качестве вида транспортного средства $k = 1, 2, 3$ можно рассмотреть передвижение на индивидуальном транспорте, на общественном транспорте, а также пешие перемещения или перемещения с использованием легкого транспорта; $X_{rs1}, X_{rs2}, X_{rs3}$ — количество людей, передвигающихся в области r с индексом типа перемещения s на транспортном средстве первого, второго, третьего вида соответственно; I_{rs} — средневзвешенная по количеству людей длина доли корреспонденций, проходящих через зону r по типу s , км:

$$I_{rs} = \frac{\sum_{i,j} l_{ijrs} k_{ijrs}}{\sum_{i,j} k_{ijrs}} \quad (2)$$

здесь l_{ijrs} — длина доли корреспонденций из района i в район j , проходящих через область r с индексом типа перемещения s , км; k_{ijrs} — количество корреспонденций из района i в район j , проходящих через зону r с индексом типа перемещения s в сутки, чел.

При такой постановке в качестве целевой функции формализован целевой индикатор функционирования транспортной системы в виде времени реали-

зации корреспонденций всеми участниками дорожного движения всеми видами транспорта на всей территории городской агломерации.

Общая структура оптимизационной модели рассматриваемого вида представлена на рис. 3. Показано, что в качестве ограничительных выбраны имеющиеся в распоряжении сообщества ресурсы, в частности подвижной состав, объемы инфраструктуры, сложившаяся нагрузка на окружающую среду. Модель предназначена для нахождения такого распределения существующего транспортного спроса по территории городской агломерации, которое даст наибольшее изменение целевого индикатора при условии, что нагрузка на окружающую среду не будет увеличена [16, 17].

При построении двойственной задачи к задаче оптимального распределения транспортного спроса можно определить ценность каждого из ресурсов с точки зрения его влияния на значение целевого индикатора, в частности определить объем транспортной инфраструктуры, необходимый к реализации для каждого вида транспорта в каждой транспортной зоне для максимального снижения времени реализации транспортных корреспонденций.

Отметим, что простейшую альтернативу оптимизационной транспортной модели рассмотренного вида представляет эвристический выбор сценариев транспортным инженером из набора планируемых или возможных инвестиционных проектов развития транспортной системы. Однако при этом обоснование выбора потребует

определенных расчетных оценок с четким определением целевых критериев отбора эффективных решений.

Необходимо учитывать, что при таком подходе поиск эффективных решений и мероприятий развития транспортной системы состоит в выборе решений из поля возможных, и самое важное — формирование первоначального множества таких решений. При этом, учитывая многообразие вариантов развития сложных транспортных систем городских агломераций, поиск возможных решений представляет собой более сложную и более комплексную задачу, чем выбор лучших управленческих решений из найденных. Предложенный формат оптимизационных транспортных моделей позволяет формализовать и решать эти задачи в первом приближении.

В схеме последовательного применения моделей, представленной на рис. 1, показано, что, дополняя оптимизационные модели прогнозными и имитационными, мы получаем универсальную технологию формирования, выработки и выбора управленческих решений, в основе которой лежит использование математических моделей при каждом шаге поиска этих решений.

Следующий блок в схеме последовательного применения моделей (см. рис. 1) — это классическая прогнозная четырехшаговая транспортная модель, которая поможет упорядочить согласно выбранному транспортным инженером целевому индикатору все сценарии, полученные с помощью оптимизационной модели или из других источ-

ников, а затем выбрать лучшие сценарии, которые войдут в программу комплексного развития транспортной инфраструктуры. Алгоритмы прогнозной модели решают четыре последовательные задачи: формирование объемов транспортного движения и распределение по территории, расщепление объема транспортного движения по системам транспорта и распределение движения по имеющейся инфраструктуре всех систем транспорта.

Кроме глобальных показателей функционирования транспортной системы городской агломерации (например, времени реализации транспортных корреспонденций), интерес представляют и локальные параметры функционирования отдельных элементов и объектов транспортной системы: интенсивность и скорость движения по локальным элементам. Такая информация востребована при решении задач организации и регулирования дорожного движения на отдельных участках сети.

Четвертый блок в схеме последовательного применения моделей (см. рис. 1) — это имитационная модель, которая позволит рассмотреть при выделенных сценариях развития транспортной инфраструктуры различные варианты организации дорожного движения и выбрать из них лучшие. Иными словами, эта модель дает возможность сформировать проекты организации дорожного движения для каждого включенного в программу сценария.

Исходными данными для таких моделей служат результаты прогнозного

моделирования в части локальных параметров функционирования отдельных элементов транспортной инфраструктуры, выступающих объектами имитационного моделирования. На рассматриваемом этапе характеристики транспортного потока, полученные на предыдущем этапе, формируют набор отдельных материальных точек и физических объектов, свойства которых имитируют свойства реальных участников дорожного движения. Задача имитационного моделирования, тем самым, состоит в построении математической копии процессов движения и взаимодействия участников дорожного движения, наблюдаемых в реальных условиях улично-дорожной сети.

Описанный комплекс взаимосвязанных моделей обеспечивает последовательное решение основных задач транспортного планирования: анализ состояния транспортной системы, оценка транспортного спроса и его прогноз, формирование и отбор сценариев развития транспортной системы, выбор лучших проектных решений с последовательным уточнением модельных оценок эффективности по целевым и расчетным показателям на моделях различного уровня. В результате применения описанных транспортных моделей обеспечивается поддержка естественного порядка принятия управленческих решений и их детализация, а также передача необходимых вход-выходных данных между моделями.

Подход был реализован на практике при разработке документов транспорт-



Рис. 2. Структура и состав прогнозной транспортной модели текущего состояния транспортной системы

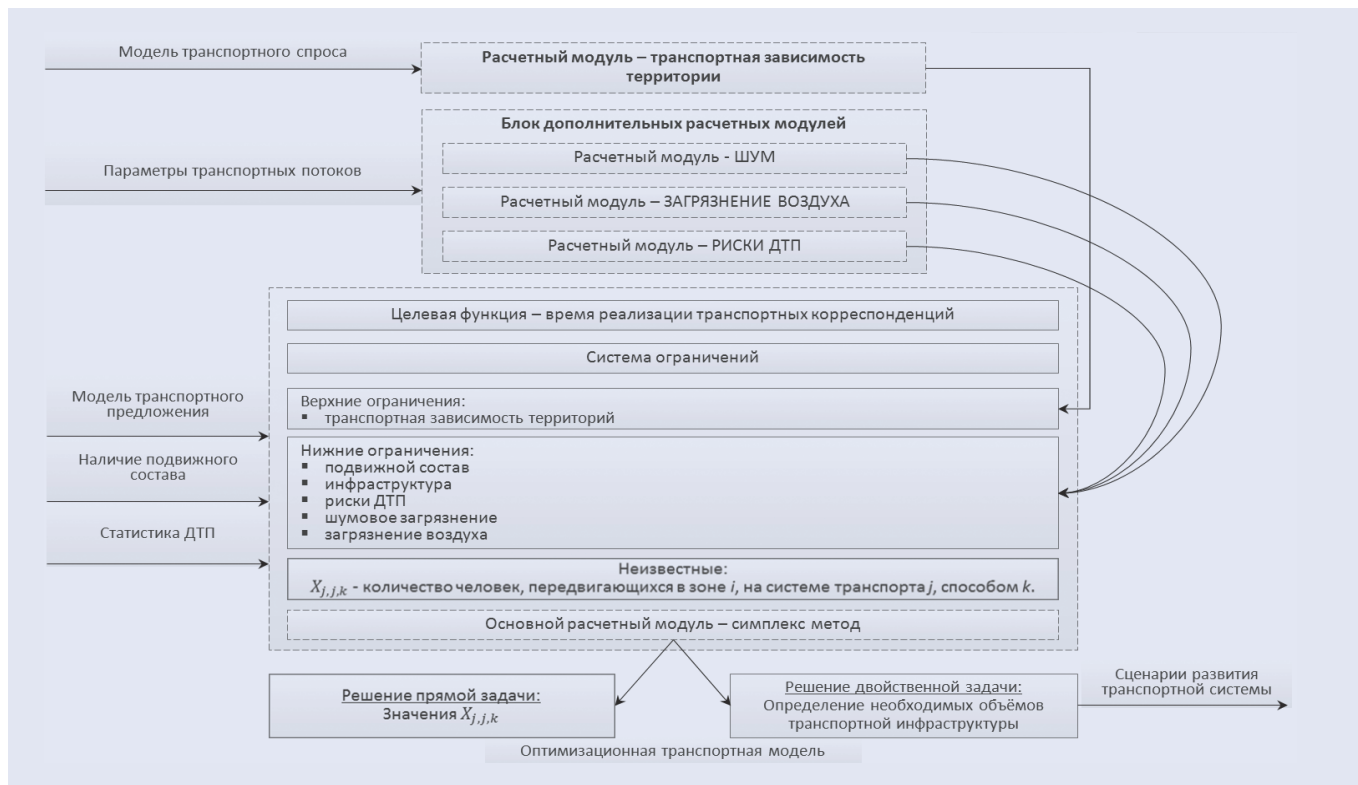


Рис. 3. Структура и состав оптимизационной транспортной модели

ного планирования в городах Дзержинск и Березники, а также в ряде крупных городских агломераций, например, в Кемеровской и Пермской городских агломерациях.

Таким образом, предложенная схема комплексного применения математических моделей в решении задач формирования эффективных транспортных систем городских агломераций позволяет повысить эффективность сложившегося порядка решения задач в области транспортного планирования, организации дорожного движения и совершенствования маршрутной сети пассажирского транспорта общего пользования.

Последовательное применение оптимизационных, прогнозных и имитационных моделей дает возможность существенно расширить количество степеней свободы в поиске эффективных управленческих решений при транспортном планировании, связав такие целевые параметры, как качество жизни населения, качество окружающей среды и эффективность функционирования транспортной системы. ■

Литература

- Мишарин А. С., Евсеев О. В. Актуализация Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года // Транспорт РФ. 2013. № 2 (45). С. 4–13.
- Зырянов В. В., Кочерга В. Г. Современные подходы к разработке комплексных схем организации дорожного движения // Там

- же. 2011. № 1. С. 28–33
- Harris B., Wilson A. G. Equilibrium values and dynamics of attractiveness terms in production-constrained spatial-interaction models // Environment and Planning. 1978. Vol. 10. P. 371–388.
- Popkov Yu. S. Macrosystems theory and its applications. Springer Verl., Berlin – 1995.
- Руководство по прогнозированию интенсивности движения на автомобильных дорогах: утв. распоряжением Минтранса России от 19.06.2003 г. № ОС-555-р. – М.: Росавтодор, 2003.
- Fotheringham A. S. A new set of spacial-interaction models: the theory of competing destinations // Environment and Planning. 1983. Vol. 15. P. 15–36.
- Fotheringham A. S. Modelling hierarchical destination choice // Environment and Planning. – 1986. – Vol. 18. – pp. 401-418.
- Algers S., Daly A., Kjellman P. et al. Stockholm model system (sims): Application // 7th World Conf. Transport. Res. Sydney, 1995.
- Rossi T., Shifan Y. Tour based travel demand modelling in the u.s. // Proceed. 8th IFAC /IFIP/ IFORS Symp. Transport. Systems. Chania, Greece, 1997.
- Якимов М. Р. Оптимизационные задачи транспортного планирования // Трансп. и сервис. 2014. № 2. С. 67–73.
- Трофименко Ю. В., Якимов М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов. – М.: Логос, 2013. – 464 с.

- Yakimov M. Optimal Models used to Provide Urban Transport Systems Efficiency and Safety // Transport. Res. Procedia Ser. «12th International Conference “Organization and Traffic Safety Management in Large Cities, SPbOTSIC2016”». 2017. P. 702–708.
- Якимов М. Р. Транспортное планирование: создание транспортных моделей городов. – М.: Логос, 2013. – 188 с.
- Евсеев О. В., Забоев А. И. Перспективы электронной паспортизации транспортных коридоров ЕАЭС в условиях цифровой трансформации транспорта // Сб. матер Третьей Межд. заочной науч.-практ. конф. «Перспективы развития транспортного комплекса». – Минск: БелНИИТ «Транстехника», 2017. С. 9–12.
- Yakimov M. R. Technologies for restoring the OD matrix elements based on the results of processing video materials obtained from the quadcopters // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. No 2.28. P. 230–233.
- Евсеев О. В., Мурашов В. В., Забоев А. И. и др. Транспортно-экономический баланс и его роль в координации транспортного планирования в условиях цифровой трансформации // Соврем. ин-форм. технол. и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 3. С. 703–710.
- Евсеев О. В. Российская академия транспорта – научное звено в стратегии развития транспортной отрасли России // Инновац. трансп. 2014. № 1 (11). С. 3–5.