

УДК: 656, 007, 004, 332, 338

**ДИНАМИЧЕСКАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГРУЗОПЕРЕВОЗОК
НА ВОСТОЧНОМ ПОЛИГОНЕ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ****Самсонова Н.А., Пилунский Ф.И. (Москва)
Аюпов-Комиссаров Т.В. (Санкт-Петербург)****Введение**

Восточный полигон включает четыре железные дороги – Красноярскую, Восточно-Сибирскую, Забайкальскую и Дальневосточную. Большая часть Восточного полигона железных дорог проходит по территории Дальнего Востока. Точки назначения грузов также в основном находятся в пограничных переходах и морских портах Дальневосточного федерального округа.

Ключевое расположение Дальнего Востока в близости к Азиатско-Тихоокеанскому региону и в составе пролегающего транспортного коридора между Азией и Европой должно быть эффективно использовано в условиях ускоренной переориентации экономических потоков с западного на восточное направление. Санкционное давление привело к сокращению экспортно-импортных (и транзитных) грузоперевозок в западном направлении и оперативной перемаршрутизации части поставок через восточное направление.

Помимо переориентации западного рынка, Дальний Восток имеет непосредственные выходы к растущим рынкам стран АТР, которые могут обеспечить потоки инвестиций, прямого экспорта или транзита Российской продукции. Более 50% мирового контейнерооборота приходится на Китай и страны ближней Азии [1].

В потенциале Дальний Восток обладает необходимой транспортной инфраструктурой для сообщения со странами Азии: на территории Дальневосточного федерального округа проходят две крупнейшие в мире железнодорожные магистрали – Байкало-Амурская и Транссибирская; расположены 25 морских портов; функционируют 58 погранпереходов разного типа (в т.ч. 22 морских, 12 автомобильных и 6 железнодорожных) [2] (рис. 1).



Рис. 1. Транспортно-логистическое положение Дальнего Востока
(составлено авторами)

Однако данный потенциал не развит в полном объеме для обеспечения спроса по внутренним и внешним перевозкам: фиксируется дефицит провозных мощностей и несоответствие инфраструктуры современным требованиям, что неизбежно приводит к увеличению времени разгрузочно-погрузочных операций и срока доставки грузов. Так, по разным оценкам дефицит провозной способности Восточного полигона за 2022 год оценивается в более чем 100 млн тонн [3]. Глава ОАО «РЖД» Олег Белозеров на полях ВЭФ-2023 отметил, что перевозки внутри страны нерациональны: для внутреннего потребления угля на Дальнем Востоке используется уголь из Кузбасса, а не локальные станции или доставка по более коротким транспортным плечам. В результате провозные мощности Восточного полигона забиваются и в 2023 году не вывезено более 5,5 млн тонн неугольных грузов высокого передела [4].

Среди ограничений транспортно-логистической системы Дальнего Востока можно выделить низкий уровень доступности и использования автотранспорта – опорная сеть дорог не обширна, 67% автодорог имеют твердое покрытие и только 60% сельских населенных пунктов имеют связь по твердой дороге с сетью общего пользования. Относительно низкий уровень загруженности портовых мощностей – в среднем порядка 70% – объясняется разными причинами: внешними – пропускные возможности интермодального сообщения, и внутренними – низкое качество обслуживания в портах. В 2021 г. только один порт ДФО вошел в рейтинг по индексу эффективности контейнерных портов, заняв 330 место из 370 [5]. В 2022 г. ни один порт ДФО не вошел в рейтинг. Среднее время пребывания в порту контейнеровозов в России почти в 2 раза больше, чем среднемировые значения [6].

В целях решения транспортно-логистических проблем разработаны ряд документов стратегического планирования, включающих мероприятия по модернизации, реконструкции и/или строительству объектов транспортно-логистической инфраструктуры. В числе стратегических задач развития восточной транспортно-логистической системы можно выделить следующие:

1. Транспортная стратегия Российской Федерации и Стратегия пространственного развития Российской Федерации:

- а) увеличение пропускной способности Байкало-Амурской и Транссибирской железнодорожных магистралей;
- б) увеличение мощностей морских портов Дальневосточного бассейна;
- в) развитие узловых мультимодальных транспортно-логистических центров;
- г) цифровая трансформация транспорта: цифровизация грузопотоков, транспортной инфраструктуры; ситуационные центры и моделирование развития транспортной отрасли;

2. Поручения Президента РФ по итогам Восточного экономического форума 2022 (Пр-1991 от 19.10.2022):

- а) обновление тягового и подвижного состава ж/д транспорта в целях эффективного функционирования транспортных коридоров;
- б) планы вывоза угля на экспорт в восточном направлении;

3. План развития Северного морского пути на период до 2035 г.

- а) перспективы перенаправления части грузопотока с Восточного полигона железных дорог на Северный морской путь.

В условиях осложнения ситуации с внешним санкционным давлением возникает необходимость пересмотреть целевые показатели по увеличению пропускной способности объектов транспортно-логистической инфраструктуры Дальнего Востока в связи с переориентацией как внутренних, так и внешних грузопотоков. Дальневосточная транспортная система становится основой обеспечения национальной безопасности страны в части транспортной и продовольственной доступности.

Цель моделирования

Для переоценки целевых показателей документов стратегического планирования и изменения мероприятий инвестиционных проектов, направленных на развитие транспортно-логистической инфраструктуры, необходимо систематизировать технические параметры работы транспортной сети Дальнего Востока, проанализировать возможные последствия мер внешнего санкционного давления и оценить изменение грузопотоков, реализуемых через Дальневосточный федеральный округ.

Динамическая имитационная модель разрабатывается:

- для оценки пропускной способности и грузопотоков станций Восточного полигона и смежных к ним объектов транспортной инфраструктуры;
- оценки потребностей в дополнительном увеличении пропускной и провозной способностей объектов транспортной инфраструктуры для обоснования инвестиционных проектов по их строительству, модернизации и реконструкции;
- оценки эффектов от реализации производственных инвестиционных проектов с использованием транспортной инфраструктуры;
- проведения сценарных расчетов в рамках подготовки документов стратегического планирования, региональных стратегических транспортных планов.

Динамическая имитационная модель грузоперевозок может стать стратегическим инструментом:

- для прогнозирования пропускной и провозной способности объектов Восточного полигона при разных сценариях;
- прогнозирования объемов грузопотоков транспортной сети Восточного полигона;
- выявления узких мест транспортной инфраструктуры;

- оценки использования альтернативных транспортных коридоров и маршрутов при транспортировке грузов;
- оценки социально-экономических эффектов, создаваемых при функционировании объектов Восточного полигона.

Объект моделирования

Динамическая имитационная модель грузоперевозок на Восточном полигоне железных дорог (далее – ДИМ ВП) представляет собой цифровой двойник транспортной системы. В настоящее время использование цифровых двойников широко распространено для исследования транспортных систем разного масштаба: от модели транспортного средства или объекта транспортной инфраструктуры до имитации работы транспортных сетей. Для построения моделей инфраструктурных объектов все чаще применяется BIM (Building Information Model) – информационная модель здания, где параметры объекта имеют конкретную геометрическую привязку [7]. Цифровые двойники и BIM становятся ключевой технологией интеллектуальных транспортных систем [8–10]. Среди разработанных или разрабатываемых цифровых двойников преобладают модели для анализа дорожного движения [11–13], городского рельсового транспорта [13], отдельных объектов транспортной инфраструктуры [14–15]. При этом в меньшем количестве представлены имитационные модели транспортных систем с интермодальными перевозками [16–17]. Для Дальнего Востока актуальными являются именно те виды перевозок, которые включают перегрузку на смежные виды транспорта в процессе доставки грузов. Грузы восточного направления преимущественно приходят в порты через железнодорожный транспорт (за исключением наливных грузов, приходящих трубопроводным транспортом) (рис. 2).

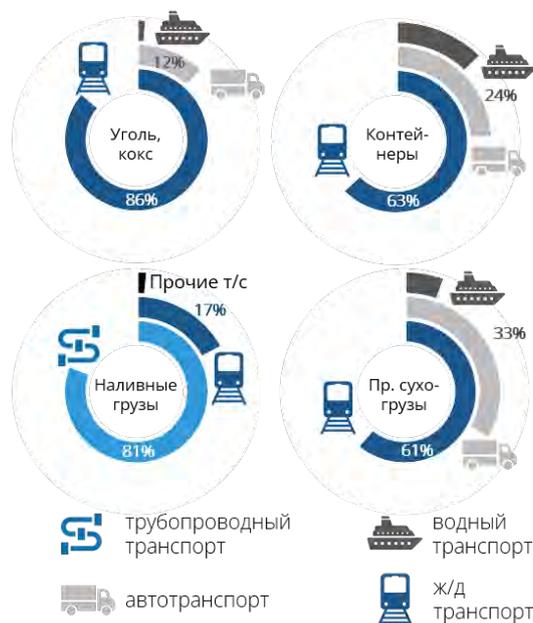


Рис. 2. Виды транспорта для доставки грузов в порты и отправления из портов ДФО (расчеты авторов по данным АО «Морцентр-ТЭК»)

При этом большинство дальневосточных портов не использует свои перегрузочные мощности на 100% (рис. 3).

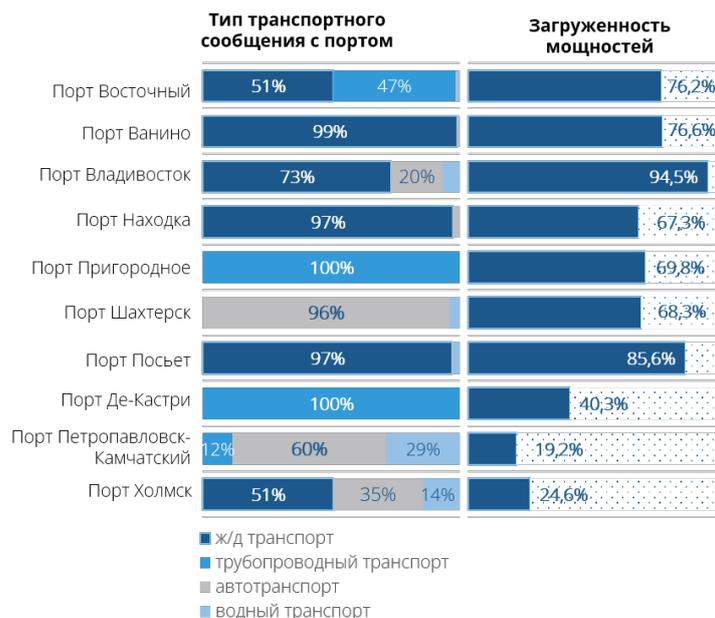


Рис. 3. Характеристика топ-10 морских портов Дальневосточного бассейна по объемам перевалки грузов (расчеты авторов по данным АО «Морцентр-ТЭК», данные ЕМИСС)

Таким образом, в целях анализа проблем и дефицитных (лимитирующих) участков, а также прогнозирования грузопотоков, необходимо рассматривать интермодальную транспортную систему, включающую следующие основные объекты транспортной инфраструктуры восточного направления:

- сеть железных дорог – так называемый Восточный полигон железных дорог;
- порты (терминалы), примыкающие к станциям Восточного полигона железных дорог;
- пограничные переходы, примыкающие к станциям Восточного полигона железных дорог.

Восточный полигон железных дорог согласно Тарифному руководству включает свыше 2 тыс. станций (разъездов, остановочных пунктов).

В грузопотоке участвует более 600 станций.

В рамках детализации объекта моделирования по станциям был выработан подход к агрегации станций и грузопотоков с учетом:

- а) классификации станции по грузовым операциям (и операциям с контейнерами);
- б) важности станции как узла или транзитного пункта;
- в) дифференциации станции по параметрам работы, режиму функционирования.

По Тарифному руководству насчитывается 132 участка, связанных с Восточным полигоном.

Если переходить к графу железных дорог, учитывающему участки между каждой станцией – это более 2 тыс. участков.

В рамках детализации объекта моделирования по участкам был выработан подход к агрегации участков с учетом:

- а) важности участка, как узла;
- б) важности участка, как транзитного, имеющего иные параметры работы (снижающие/повышающие пропускную способность).

Насчитывается более 15 морских портов Дальневосточного бассейна, имеющих непосредственное примыкание к железной дороге. Для каждого порта учитывается

информация по перегрузочным и складским мощностям по разным типам грузов, в том числе по сезонам навигации.

Для погранпереходов также учитываются утвержденные режимы движения поездов.

Концепция и структура модели

На рисунке 4 представлена концептуальная схема разрабатываемой модели.

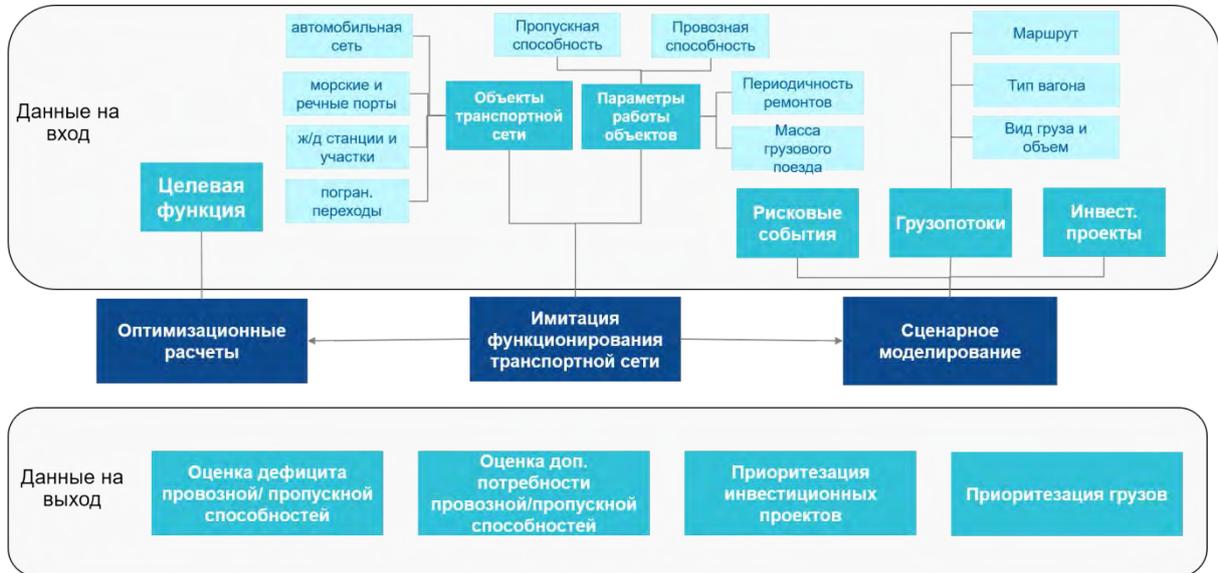


Рис. 4. Концептуальная схема динамической имитационной модели (составлено авторами)

На рисунке 5. представлена структура динамической имитационной модели.



Рис. 5. Структура динамической имитационной модели (составлено авторами)

Каждый модуль описывает основные транспортные процессы по видам транспорта с учетом провозных характеристики входящих элементов.

Режимы работы модели:

– инерционный – режим простого имитационного эксперимента. Данный режим необходим для проведения верификации и валидации модели на ретроспективных данных, а также для осуществления расчетов по провозным и пропускным мощностям отдельных участков;

– сценарный – режим имитационного эксперимента с измененными пользователем параметрами работы объектов модели и значительных изменений планов грузопотоков посредством загрузки сценарных параметров через базу данных, а также с применением инструментов управления параметрами конкретных объектов и/или групп объектов модели в структуре пользовательского интерфейса. Сценарные параметры делятся на следующие типы:

1) события – изменение параметров работы моделируемых объектов или включение новых объектов в модель по расписанию (имитация проведения плановых ремонтов, аварий, реализации инвестиционных проектов);

2) план грузоперевозок – изменение объемов и маршрутов грузоперевозок;

3) параметры объектов модели (станций, участков, терминалов, погранпереходов).

– оптимизационный – режим оптимизационного эксперимента, при котором рассчитываются параметры работы объектов модели, обеспечивающие целевые значения провозной и пропускной мощностей.

Следует отметить, что в силу того, что описываемая модель является мультипараметрической, оптимизационные эксперименты могут быть возможны только для отдельных объектов или участков, а не для всей системы в целом.

Входные данные модели и их источники

На рисунке 6 представлен перечень параметров моделирования.



Рис. 6. Структура параметров моделирования (составлено авторами)

Большинство параметров моделирования являются закрытыми данными. Основными источниками данных служат паспорта инвестиционных проектов, официальные документы и публичные данные ОАО «РЖД». «Закрытые» параметры оценивались расчетными методами с применением открытых данных и будут верифицированы самой имитационной моделью.

Назначение и реализация модели

Назначение модели:

1) моделирование перевозок внутренних, экспортных и импортных грузов на Восточном полигоне железных дорог, через погранпереходы и порты Дальневосточного бассейна;

2) задание сценариев, отличающихся объемом грузовой базы, количеством судозаходов, ограничениями транспортной сети;

3) оценка необходимого количества вагонов для реализации различных сценариев перевозок;

4) оценка возможности использования альтернативных маршрутов транспортировки грузов различными видами транспорта из пункта отправления в пункт назначения, с учетом экономической эффективности проектируемого маршрута.

Модель использует дискретно-событийный подход, в рамках которого агенты (поезда) с грузом перемещаются по сети от точки отправки до точки назначения. Поезда перевозят монопродукт, состоят из вагонов одного типа с фиксированной загрузкой (общий вес поезда и количество вагонов может зависеть от маршрута, продукта). Железнодорожная сеть состоит из участков (сегментов), соединяющих основные узловые, грузовые и сортировочные станции полигона. Точка отправки/назначения может быть на границе полигона, станции погранперехода, станции примыкания терминалов, а также на внутренних станциях сети.

Поезда с грузом создаются в модели на основе входных данных по грузопотоку, содержащих планируемый объем перевозки в разрезе продукта, точек отправления и назначения, типа вагонов и периода (месяц, год).

У каждого участка сети задается пропускная способность в числе пар поездов в сутки (может варьироваться в сценарии), а у каждой станции – максимальное количество размещаемых вагонов. При превышении этих показателей для сегмента в целом или конечной станции поезд будет поставлен в очередь на отправку.

Время в пути на участке рассчитывается исходя из задаваемой для участка средней скорости. Грузовые операции в точках отправления, назначения и транзитных пунктах (перевалка на смежные виды транспорта) осуществляются с учетом параметров работы транспорта.

Если станция назначения связана с погранпереходом – учитывается время перегрузки и пропускная способность перехода.

Если станция назначения связана с портовым терминалом – учитывается время разгрузки и контролируется максимальный объем груза на складе терминала, при его превышении – поезд будет поставлен в очередь на разгрузку.

Отправка и поступление грузов морем моделируется путем задания интенсивности судозаходов (терминал-порт, продукт, период, количество судозаходов, средняя вместимость судна). Предполагается, что суда перевозят монопродукты. На терминале учитывается количество причалов (одновременно обрабатываемых судов) и производительность погрузки-разгрузки на одном причале.

Модель использует иллюстративную карту-схему Восточного полигона с цветовой индикацией загруженности участков (без отображения движения отдельных составов и судов)

Модель проводит расчеты на горизонте от месяца до года с шагом 1 сутки.

Среда реализации модели – программа AnyLogic.

Модель реализуется в несколько этапов: разработка концепции, оценка входных параметров модели, техническая реализация модулей модели, валидация и верификация, настройка экспериментов модели (в рамках разных режимов

моделирования), разработка пользовательского интерфейса. Техническая реализация модулей планируется в следующей последовательности:

- 1) модули железнодорожных перевозок, перевалки в портах и погранпереходах;
- 2) модуль движения судов;
- 3) модуль перевалки на автотранспорт.

На данном этапе разработки модели осуществляется валидация и верификация модулей железнодорожных перевозок, перевалки в портах и погранпереходах.

Заключение

Разрабатываемая ДИМ ВП может служить для ретроспективного анализа и предиктивных прогнозов. В первом случае это создание транспортной карты (цифрового графа), включающей инфраструктурные и технико-технологические параметры станций, портов, пунктов пропуска, терминально-складских объектов – в буквальном смысле «оцифровка» транспортной сети.

Во втором случае – это инструмент сценарного моделирования, позволяющий оценить как изменится состояние сети и грузопотоков в ответ на изменение окружающей системы.

ДИМ ВП может быть использована в качестве ядра цифровой платформы ситуационных центров, анализирующих и прогнозирующих грузовые потоки в регионе. Собранные данные для модели и сформированный цифровой граф транспортной сети могут составить отдельный продукт – автоматизированную информационную систему, включающую механизмы аналитической обработки базы данных и мониторинга транспортных потоков и развития инфраструктуры транспорта (состояние основных фондов, реализация инвестиционных проектов и т.д.), визуализации исходных данных и результатов анализа. Сама ДИМ ВП – инструмент сценарного стратегического прогнозирования. Функционирование вышеуказанной цифровой платформы может обеспечить принцип «единого окна» при разработке стратегических документов в сфере развития транспортного комплекса, в частности региональных стратегических транспортных планов.

Литература

1. Официальный сайт UNCTAD Statistics. Раздел «Maritime transport». URL: https://unctadstat.unctad.org/wds/ReportFolders/reportFolders.aspx?IF_ActivePath=P%2C11&sCS_ChosenLang=en (дата обращения: 15.07.2023)
2. Официальный сайт Дальневосточного таможенного управления. Раздел «Структура». URL: <https://dvtu.customs.gov.ru/folder/255262> (дата обращения: 20.08.2023)
3. Вице-премьер Трутнев: Дефицит мощностей Восточного полигона составляет более 100 млн тонн // Российская газета. URL: <https://rg.ru/2022/06/23/vice-premer-trutnev-deficit-moshchnostej-vostochnogo-poligona-sostavliaet-bolee-100-mln-tonn.html> (дата обращения 20.08.2023)
4. Погрузка на Восток вновь бьет все рекорды // Официальный новостной канал РЖД. Пост от 11.09.2023. URL: t.me/telerzd (дата обращения: 11.09.2023)
5. World Bank. 2022. The Container Port Performance Index 2021: A Comparable Assessment of Container Port Performance. © Washington, DC. URL: <http://hdl.handle.net/10986/37542>
6. UNCTAD/RMT/2022 and Corr.1. URL: https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2022_en.pdf (дата обращения 20.08.2023)
7. Kaewunruen S., Xu N. Digital twin for sustainability evaluation of railway station buildings // *Frontiers in Built Environment*. 2018. Т. 4. С. 77.

8. Liao S. et al. Digital twin consensus for blockchain-enabled intelligent transportation systems in smart cities // *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021. Т. 23. №. 11. С. 22619–22629.
9. Feng H., Lv H., Lv Z. Resilience towarded Digital Twins to improve the adaptability of transportation systems // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2023. Т. 173. С. 103686.
10. Bao L., Wang Q., Jiang Y. Review of Digital twin for intelligent transportation system // *2021 International Conference on Information Control, Electrical Engineering and Rail Transit (ICEERT)*. IEEE, 2021. С. 309–315.
11. Kušić K., Schumann R., Ivanjko E. A digital twin in transportation: Real-time synergy of traffic data streams and simulation for virtualizing motorway dynamics // *Advanced Engineering Informatics*. 2023. Т. 55. С. 101858.
12. Kaliske M., Behnke R., Wollny I. Vision on a digital twin of the road-tire-vehicle system for future mobility // *Tire Science and Technology*. 2021. Т. 49, №1. С. 2–18.
13. Wang S., Zhang F., Qin T. Research on the construction of highway traffic digital twin system based on 3D GIS technology // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. Т. 1802, №4. С. 042045.
14. Фетисов В. А. Исследование и реализация оптимального варианта работы портовой логистической системы с использованием имитационных моделей систем массового обслуживания / В.А. Фетисов, Н.Н. Майоров // *Эксплуатация морского транспорта*. 2012. № 3(69). С. 3–7. EDN PASLCX.
15. Gao Y., Qian S., Li Z., Wang P., Wang F. and He Q. Digital Twin and Its Application in Transportation Infrastructure // *2021 IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI)*, Beijing, China, 2021, pp. 298–301, doi: 10.1109/DTPI52967.2021.9540108.
16. Teodor Gabriel Crainic, Guido Perboli, Mariangela Rosano Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy, *European Journal of Operational Research*, Volume 270, Issue 2, 2018, Pages 401–418, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.11.061>.
17. Вакуленко С.П. Универсальная имитационная модель транспортной системы / С.П. Вакуленко, М.И. Шамров // *Инновационные, информационные и коммуникационные технологии*. 2017. № 1. С. 187–192. – EDN ZHZOYJ.