ЛОГИСТИКА

УДК 656.025, 656.07, 004.94 **DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-84-90**

МУЛЬТИПОДХОДНОЕ ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА РАЗРАБОТКИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ТРАНСПОРТА

Е. А. Гайдук
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассматривается мультиподходная имитационная модель для предварительной оценки включения водного транспорта в городскую пассажирскую сеть на примере Санкт-Петербурга. Агрегированная задача распределения пассажиров формализована как транспортная задача с ограничениями провозной способности за расчётный период. Критерий сравнения учитывает время подхода, ожидания, движения и перехода к пункту назначения. Описана модель AnyLogic, объединяющая индивидуальное правило выбора транспорта и дискретно-событийное представление перевозочного процесса. Разграничены оптимизационная постановка и пороговое правило выбора водного участка. Представлен численный разбор сохранённых сводных показателей модели и определены ограничения их интерпретации. Применимость подхода связана с оценкой соотношения выигрыша во времени движения и дополнительных затрат на пересадку; переход к цифровому двойнику требует связи с эксплуатационными данными и проверки модели на наблюдениях.

Ключевые слова: цифровизация, цифровой двойник, транспортная инфраструктура, имитационное моделирование, водный транспорт, мультимодальные перевозки, AnyLogic.

Для цитирования:
Гайдук, Е. А. Мультиподходное имитационное моделирование как основа разработки цифрового двойника городского общественного транспорта / Е. А. Гайдук // Системный анализ и логистика. – 2026. – № 3(51). – с. 84-90. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-84-90.

MULTIPROACH SIMULATION MODELING AS A BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF A DIGITAL TWIN OF URBAN PUBLIC TRANSPORT

E. A. Gaiduk
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

A multimethod simulation model is considered for the preliminary assessment of water transport integration into an urban passenger network, using St. Petersburg as a case study. Aggregate passenger allocation is formulated as a transportation problem with service capacity constraints over a specified planning period. The comparison criterion includes access, waiting, in-vehicle and egress times. The AnyLogic model combines an individual transport choice rule with a discrete-event representation of transport operations. The aggregate optimization problem is distinguished from the waiting-time threshold used to choose the waterborne alternative. A numerical examination of the available summary outputs is provided, together with the limitations of their interpretation. The approach assesses whether in-vehicle time savings outweigh additional transfer-related time. Its development into a digital twin requires integration with operational data and validation against observations.

Keywords: digitalization, digital twin, transport infrastructure, simulation modeling, water transport, multimodal transportation, AnyLogic.

For citation:
Gaiduk, E. A. Multiproach simulation modeling as a basis for the development of a digital twin of urban public transport / E. A. Gaiduk // System analysis and logistics. – 2026. – № 3(51). – p. 84-90. DOI: 10.31799/2077-5687-2026-3-84-90.

Введение

Развитие улично-дорожной сети не всегда обеспечивает устойчивое сокращение времени поездки. На данных городов США G. Duranton и M. A. Turner установили связь между увеличением протяжённости полос движения и ростом автомобильного пробега [1]. Этот результат указывает на необходимость учитывать индуцированный спрос, но не означает, что расширение любой дороги неизбежно увеличивает заторы. Для проектирования пассажирской сети важно сопоставлять инфраструктурные решения с альтернативными способами

организации перевозок.

В работе М. И. Амосова и С. С. Сафиной рассмотрены проблемы развития транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга [2]. Для города с водными преградами и ограниченным числом связей между отдельными территориями водные маршруты представляют самостоятельный объект транспортного планирования [3]. Однако географическая близость водного пути к направлению спроса ещё не доказывает удобство такой поездки: необходима оценка доступа к причалу, ожидания и перехода к конечному пункту [4]. Вопросы восприятия водных перевозок пассажирами и факторов их планирования исследованы M. Tanko и соавторами на шведском материале [5].

Постановка задачи цифрового моделирования интеграции внутренних водных путей в транспортную систему мегаполиса представлена в работе В. Е. Таратун и Е. А. Таратун [6]. В настоящей статье внимание сосредоточено на пересадочном узле: необходимо связать ограничения транспортного предложения, индивидуальный выбор пассажира и итоговые затраты времени. Сочетание агентного и дискретно-событийного описания позволяет рассматривать эти элементы в рамках одного сценария [7].

Цель исследования – формализовать распределение пассажиров между наземным и водным транспортом и описать имитационную модель пересадочного узла для предварительного сравнения вариантов обслуживания. Рассматриваемая реализация является имитационным прототипом, а не действующим цифровым двойником городской сети. Такое разграничение существенно: цифровой двойник предполагает связь виртуального представления с физическим объектом и синхронизацию данных [6, 8].

Математическая модель пересадочного узла

Рассматривается общий исходный пассажирский поток и фиксированный расчётный период H. Индекс $k = 1, \dots, K$ обозначает транспортную альтернативу с определённым местом посадки и схемой обслуживания, а индекс $j = 1, \dots, J$ — пункт назначения. Величина x_{kj} равна числу пассажиров, направляемых по альтернативе k в пункт j; D_j — спрос на поездки в этот пункт; S — общее число пассажиров. Все три величины относятся к одному периоду и измеряются в пассажирах, а не в пассажирах в час.

Временной коэффициент c_{kj} характеризует полную поездку между одинаковыми для сравниваемых альтернатив начальной и конечной точками. Полное время представляется суммой двух частей:

$$c_{kj} = t_k + t_{kj}, t_k = a_k + w_k, t_{kj} = v_{kj} + e_{kj}. \qquad (1)$$

Здесь a_k — время доступа к месту посадки; w_k — ожидаемое время до фактической посадки; v_{kj} — время движения в транспорте; e_{kj} — остальные затраты на пересадку и переход к пункту назначения, не включённые в предыдущие составляющие. При пропуске рейса из-за отсутствия мест учитывается дополнительное ожидание. Все составляющие выражаются в минутах. Разложение (1) исключает сравнение только водного и автобусного участков без учёта пешеходных переходов.

Ограничение транспортного предложения задаётся величиной M_k — числом пассажиров, которых можно принять в общем пункте посадки по альтернативе k за период H. Её нельзя отождествлять с вместимостью одного автобуса или судна. При известном наборе отправлений используется агрегированная оценка:

$$M_k = \sum_{r \in \mathrm{R}_k(H)} q_{kr}^{\text{free}}. \qquad (2)$$

В формуле (2) $\mathcal{R}_k(H)$ — множество отправлений, учитываемых в расчётном периоде, а

q_{kr}^{free} — доступное для рассматриваемого потока число мест в рейсе r. Эта запись применима при едином учитываемом ограничении посадки. Для нескольких пунктов посадки, общих участков маршрутов или совместного использования подвижного состава необходимы дополнительные ограничения по участкам и рейсам.

При фиксированных временных коэффициентах задача минимизации суммарных временных затрат имеет вид:

$$F = \sum_{k=1}^{K}\sum_{j=1}^{J} c_{kj} x_{kj} \to \min. \tag{3}$$

Величина F измеряется в пассажиро-минутах. При неизменном $S > 0$ её минимизация эквивалентна минимизации среднего времени F/S. Допустимое распределение удовлетворяет ограничениям:

$$\begin{aligned} &\sum_{j=1}^{J} x_{kj} \le M_k, \quad && k = 1,\dots,K, \\ &\sum_{k=1}^{K} x_{kj} = D_j, && j = 1,\dots,J, \\ &x_{kj} = 0, && (k,j) \notin \mathrm{A}, \\ &x_{kj} \in \mathrm{Z}_{\ge 0}, && k = 1,\dots,K;\ j = 1,\dots,J. \end{aligned} \tag{4}$$

Множество $\mathcal{A}$ содержит допустимые сочетания транспортных альтернатив и пунктов назначения. Согласованность спроса означает, что сумма D_j по всем направлениям равна S. Тогда суммирование ограничений удовлетворения спроса даёт общий баланс пассажиров; его отдельное включение в систему (4) избыточно.

Для существования допустимого плана сумма предложения M_k по всем альтернативам должна быть не меньше S. Это условие достаточно только при доступности всех направлений и отсутствии дополнительных общих ограничений. При запрещённых связях общей вместимости может хватать, но часть спроса не будет обеспечена доступным предложением. Тогда необходимо изменить предложение либо отдельно учитывать неудовлетворённый спрос.

Выражения (1)–(4) задают агрегированную транспортную задачу с верхними ограничениями предложения. Её решение является эталонным распределением при принятых временах, но само по себе не описывает образование очередей и доступность конкретного рейса в момент прибытия пассажира. Если время ожидания зависит от искомой загрузки, временные коэффициенты перестают быть постоянными. В этом случае требуется согласование расчёта с имитационной моделью, а не применение неизменной линейной постановки к любому режиму работы.

Имитационная модель

В AnyLogic рассматриваются взаимодействующие пассажиры, автобусы и речные суда. Агентная составляющая отвечает за индивидуальный выбор способа перемещения, а дискретно-событийная — за последовательность ожидания, посадки, движения, высадки и дальнейшего перехода. Система описывается двумя ветвями обслуживания с групповыми посадками и различными режимами движения, а не классической двухканальной системой с взаимозаменяемыми обслуживающими приборами.

Пассажирский поток формируется с переменной интенсивностью в течение суток. В описанной реализации выбор водного участка задаётся пороговым правилом: пассажир направляется к речному транспорту, если прогнозируемое ожидание не превышает 10 минут; при большем ожидании выбирается автобус. Порог 10 минут является допущением сценария.

Эмпирическое обоснование этого порога не приведено; из решения задачи (3)–(4) он не следует. Поэтому такое правило не гарантирует ни минимального времени индивидуальной поездки, ни минимума суммарных затрат.

Формирование автобусных рейсов увязано с пассажиропотоком, тогда как отправления судов подчинены расписанию. В часы пик в модели снижается скорость автобусов. Эта конструкция воспроизводит различие между заданной дорожной задержкой и движением по воде, однако результат зависит не только от наличия водного маршрута, но и от принятого правила формирования автобусного предложения. Для выделения эффекта водной линии в сравнительных сценариях необходимо сохранять одинаковыми внешний спрос и правило работы наземного транспорта.

Прикладная схема связывает Красногвардейский район со станциями метро «Площадь Ленина» и «Василеостровская» через причал на Свердловской набережной. На рисунке 1 показаны рассматриваемые водные связи с Арсенальной набережной и набережной Макарова. Картографическая основа используется для описания расположения участков [9]; она не заменяет измерение пассажиропотока или времени поездки. Структура процесса в AnyLogic представлена на рисунке 2.

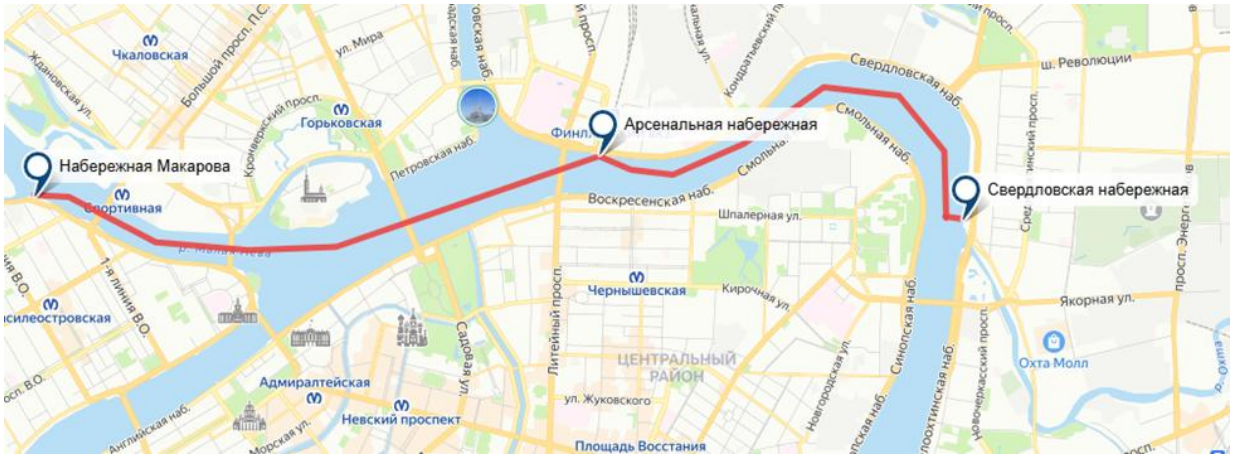


Рис. 1. Предлагаемая схема водного сообщения. Картографическая основа — Яндекс Карты [9]

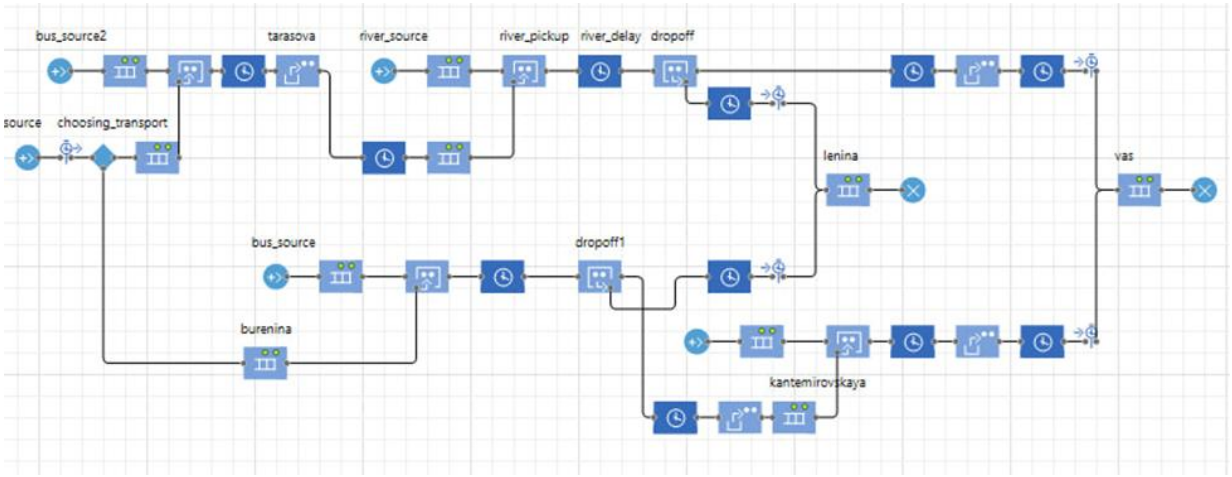


Рис. 2. Структура модели рассматриваемого маршрута в AnyLogic

Временные показатели следует регистрировать от появления пассажира в системе до прибытия в один и тот же конечный пункт. Ограничения посадки проверяются для каждого

рейса: пассажир, которому не хватило места, не должен исчезать из учёта. На границе периода необходимо либо завершать поездки всех пассажиров выбранной группы, либо отдельно учитывать незавершённые поездки. Эти проверки связывают агрегированный баланс (4) с динамическим описанием и предотвращают искусственное сокращение среднего времени за счёт исключения задержавшихся пассажиров.

Результаты сценарного сравнения и их интерпретация

На сохранённой панели статистики модели представлены два набора наблюдений. Их имена, объёмы и средние значения приведены в таблице 1. Эти данные позволяют проверить арифметику сопоставления, но не восстановить распределение наблюдений по направлениям и времени суток.

Таблица 1 — Сводные показатели, отображённые на панели статистики модели

Набор наблюдений	Число наблюдений	Среднее значение
passangersBus	961	44,003
passangersWater	961	41,899

Примечание — Идентификаторы сохранены в исходном написании. Единица времени и состав сравниваемых групп на панели не указаны; значения не следует автоматически трактовать как минуты полной поездки для всех пассажиров.

Разность показанных средних составляет 2,104 единицы исходного показателя. При использовании значения 44,003 в качестве базы относительная разность равна:

$$\delta = \frac{44,003 - 41,899}{44,003} \cdot 100\% \approx 4,78\%. \tag{5}$$

Результат (5) характеризует разность средних, но не устанавливает транспортный эффект без проверки сопоставимости показателей и групп. Число 961 означает количество наблюдений, а не независимых прогонов. Для оценки статистической значимости и результатов по отдельным направлениям необходимы первичные ряды и параметры эксперимента.

Механизм возможного выигрыша следует непосредственно из полного времени поездки. Обозначим автобусную альтернативу индексом b, а альтернативу с водным участком — индексом f. Из (1) водный вариант предпочтителен по времени для направления j, если выполняется условие:

$$v_{bj} - v_{fj} > \left(a_f - a_b\right) + \left(w_f - w_b\right) + \left(e_{fj} - e_{bj}\right). \tag{6}$$

Левая часть (6) выражает выигрыш на движении в транспорте, правая — дополнительные затраты на доступ, ожидание и переходы. Поэтому одинаковое сокращение времени движения может дать разный итог на маршрутах различной длины. Для рассматриваемых направлений до двух станций метро требуется самостоятельный расчёт пешеходных участков. Одного условия ожидания судна не более 10 минут для вывода о предпочтительности всей поездки недостаточно.

Обсуждение и ограничения

Для выбора расписания, числа судов или места причала требуется серия сопоставимых сценариев с заданными профилем спроса, вместимостью, временами переходов и правилами посадки. Помимо среднего времени следует оценивать длительные задержки и долю

обслуженного спроса: улучшение среднего показателя может сочетаться с ухудшением обслуживания части пассажиров.

В описанной модели дорожная ситуация вводится через изменение скорости автобусов. Поэтому она позволяет исследовать последствия заданных заторов для пассажиров, но не доказывает обратное влияние водного сообщения на дорожный трафик. Для такого вывода потребуются данные о переходе пассажиров с личного автомобиля и модель реакции улично-дорожной сети. Аналогично экономическая целесообразность не следует из выигрыша во времени без расчёта затрат на суда, причалы и эксплуатацию.

Область применения ограничивается принятыми условиями доступности водного сообщения. Сезонность, погода, отмены рейсов и ограничения причалов требуют отдельных сценариев. Развитие прототипа в цифровой двойник предполагает регулярное обновление эксплуатационных данных и проверку прогнозов на независимых наблюдениях [8, 10]. Имитационные эксперименты помогают отбирать варианты для пилотной эксплуатации, но не заменяют натурную проверку.

Заключение

Формализована задача распределения пассажиров между наземными и водными альтернативами с учётом провозной способности за единый расчётный период. Полное время поездки связывает ограничения обслуживания с параметрами пересадки и позволяет отделить выигрыш на движении от затрат на доступ и ожидание. Агрегированная оптимизационная постановка и индивидуальное пороговое правило решают разные задачи; их результаты нельзя считать взаимозаменяемыми.

Основной результат работы — согласованная схема постановки сценарного эксперимента для пересадочного узла. Она позволяет сформулировать условия предпочтительности водного участка, но для количественного обоснования проектных решений требуется воспроизводимая серия расчётов и валидация.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Duranton G.* The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence From US Cities / G. Duranton, M. A. Turner // American Economic Review. – 2011. – Vol. 101. – P. 2616-2652.
2. *Амосов М. И.* Основные проблемы развития транспортной инфраструктуры Санкт-Петербурга и возможные пути их решения / М. И. Амосов, С. С. Сафина // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. – 2015. – № 5(95). – С. 44-49.
3. Санкт-Петербургское государственное казенное учреждение «Агентство Внешнего Транспорта». Регулярная городская линия. Перечень маршрутов водного транспорта [Электронный ресурс]. – URL: https://пмвт.рф/itinerary/203 (дата обращения: 26.05.2026).
4. *Cascajo R.* User perception of transfers in multimodal urban trips: A qualitative study / R. Cascajo, E. Lopez, F. Herrero, A. Monzon // International Journal of Sustainable Transportation. – 2019. – Vol. 13, no. 6. – P. 393–406. DOI 10.1080/15568318.2018.1476632.
5. *Tanko M.* Water transit passenger perceptions and planning factors: A Swedish perspective / M. Tanko, H. Cheemakurthy, S. Hall Kihl, K. Garme // Travel Behaviour and Society. – 2019. – №16. – С. 23-30.
6. *Таратун В. Е.* Исследование и разработка модели цифрового двойника процессов по интеграции внутренних водных путей как элемента основной транспортной системы мегаполиса / В. Е. Таратун, Е. А. Таратун // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 3(37). – С. 203-213. DOI:10.31799/2077-5687-2023-3-203-213.
7. *Борщев А. В.* Практическое агентное моделирование и его место в арсенале



аналитика / А. В. Борщев // Exponenta PRO. – 2004. – № 3–4 (7–8). – С. 38–47.
8. *Jones D.* Characterising the Digital Twin: A systematic literature review / D. Jones, C. Snider, A. Nassehi [et al.] // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. – 2020. – Vol. 29, part A. – P. 36–52. DOI: 10.1016/j.cirpj.2020.02.002.
9. Яндекс Карты. Санкт-Петербург [Электронный ресурс]. – URL: https://yandex.ru/maps/2/saint-petersburg/(дата обращения: 26.05.2026).
10. *Sargent R. G.* Verification and validation of simulation models / R. G. Sargent // Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. – 2010. – P. 166–183.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гайдук Елена Александровна
Ассистент кафедры системного анализа и логистики
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
Россия, 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.67, лит. А
E-mail: gaiduk.e.a@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gaiduk Elena Alexandrovna
Assistant of the Department of System Analysis and Logistics
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaia str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: gaiduk.e.a@yandex.ru

Дата поступления: 13.09.2026
Дата принятия: 14.09.2026