
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ
ПРОГРАММ/MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76> EDN: FIVLYH**АНАЛИЗ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТАНЦИИ МЕТРО НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОГО ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Научная статья

Киндинова В.В.^{1,*}, Деревянко Е.А.²¹ ORCID : 0000-0001-5304-1293;² ORCID : 0009-0005-0338-6820;¹ Московский авиационный институт (национально-исследовательский университет), Москва, Российская Федерация² АО «ОТП Банк», Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (hamstervill[at]mail.ru)

Предложена: 14.04.2026; Принята: 26.06.2026; Опубликовано: 17.07.2026

Аннотация

Авторами разработана имитационная модель станции метро, выступающая в роли «цифрового полигона», который с высокой точностью воспроизводит: геометрию транспортного узла — вестибюли, турникеты, эскалаторы, платформы, колонны, переходы; поведение пассажиров (скорость, цели, реакция на события); расписание поездов. На основе модели возможно проводить эксперименты по оптимизации пассажиропотока — поиск и устранение зон скопления людей у турникетов, эскалаторов, на платформах; планирование ремонтов; разработка схем навигации. Также возможно проводить эксперименты по моделированию чрезвычайных ситуаций — изучать механизмы возникновения давки и тестирование мер по предотвращению. Основной целью работы является изложение авторских методов, использованных в разработке гибридной имитационной модели станции метро. Предложен подход к моделированию пассажиропотока: имитационная модель детально моделирует маршруты движения пассажиров, приходящих с улицы, а также маршруты пассажиров, прибывающих на станцию поездами. Поток пассажиров, прибывающих на станцию, моделируется как поток пакетированных заявок. Также предложен подход к моделированию сложной геометрии станции метро. Модель позволяет количественно оценить загруженность вестибюлей, лестниц, платформ.

Ключевые слова: имитационное моделирование, пассажиропоток, станция метро, геометрия, СМО, вероятностные автоматы, пешеходная библиотека, AnyLogic.

ANALYSIS OF METRO STATION PERFORMANCE BASED ON HYBRID SIMULATION MODELING

Research article

Kindinova V.V.^{1,*}, Derevyanko Y.A.²¹ ORCID : 0000-0001-5304-1293;² ORCID : 0009-0005-0338-6820;¹ Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation² JSC "OTP Bank", Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (hamstervill[at]mail.ru)

Suggested: 14.04.2026; Accepted: 26.06.2026; Published: 17.07.2026

Abstract

A simulation model of a metro station, which is serving as a "digital testing ground", was developed. It accurately reproduces the geometry of the transport hub (vestibules, turnstiles, escalators, platforms, columns, passages), passenger behavior (speed, goals, reaction to events), train schedule. The model can be used to conduct experiments to optimize passenger flow, e.g., identify and eliminate crowded areas near turnstiles, escalators and on platforms, plan repairs and develop navigation schemes. It is also possible to conduct emergency situation modeling experiments such as study of the mechanisms of crowding and testing prevention measures. The main objective of the work is to present the authors' methods used in developing a hybrid simulation model of a metro station. The following approach to passenger flow modeling is proposed: the simulation model details the routes of passengers coming from the street, as well as the routes of passengers arriving at the station by train. The flow of passengers arriving at the station is modeled as a stream of batched requests. An approach to modeling the complex geometry of a metro station is also proposed. The model enables a quantitative assessment of the congestion in vestibules, stairs, and platforms.

Keywords: simulation modeling, passenger flow, metro station, geometry, queuing system, probabilistic automata, pedestrian library, AnyLogic.

Введение

Современные требования к транспортной безопасности требуют от эксплуатантов готовности к нештатным ситуациям: задержкам поездов, временному закрытию выходов, эвакуации или резкому всплеску пассажиропотока после массовых мероприятий. Экспериментировать с такими сценариями в реальных условиях опасно, дорого и

зачастую невозможно. Традиционные аналитические методы расчёта пропускной способности и оценки эффективности работы станций становятся недостаточно гибкими: они не позволяют учесть стохастический характер поведения пассажиров, нелинейные взаимодействия между элементами инфраструктуры, геометрический план транспортного узла и динамику возникновения «узких мест» [1]. Именно поэтому, разработка адекватной имитационной модели станции метро приобретает высокую практическую и научную значимость. Цель работы изложить программный подход, позволяющий разработать имитационную модель с заявленными возможностями.

Программная реализация имитационной модели станции метро «Сокол»

В работе представлена имитационная модель станции метро «Сокол», разработанная в среде моделирования AnyLogic [2]. Имитационная модель разработана для оценки показателей качества функционирования транспортного узла, как системы массового обслуживания (СМО) [3]. При разработке модели были приняты следующие допущения:

Пассажиры прибывают на станцию с промежутками времени, имеющими экспоненциальное распределение, количество прибывающих на поездах людей имеет пуассоновское распределение, время обслуживания на кассах имеет треугольное распределение [2].

С портала открытых данных Москвы получены данные о среднем количестве людей, входящих и выходящих на станции в течение дня [4]. Для моделирования были использованы усреднённые почасовые значения.

В открытых источниках есть информация только по времени прибытия первого и последнего поездов на станцию, поэтому в течение дня промежуток времени между поездами принят постоянным — 4 (или 2) минуты.

На рисунках 1 и 2 представлены формализованные модели поведения пассажиров на станции «Сокол», входящих с улицы и прибывающих на поездах соответственно.

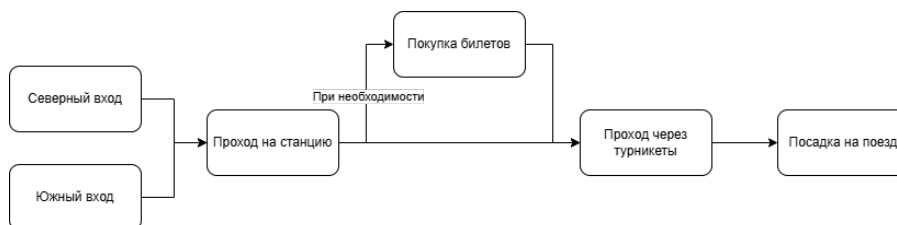


Рисунок 1 - Диаграмма поведения пассажиров, входящих с улицы

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.1>

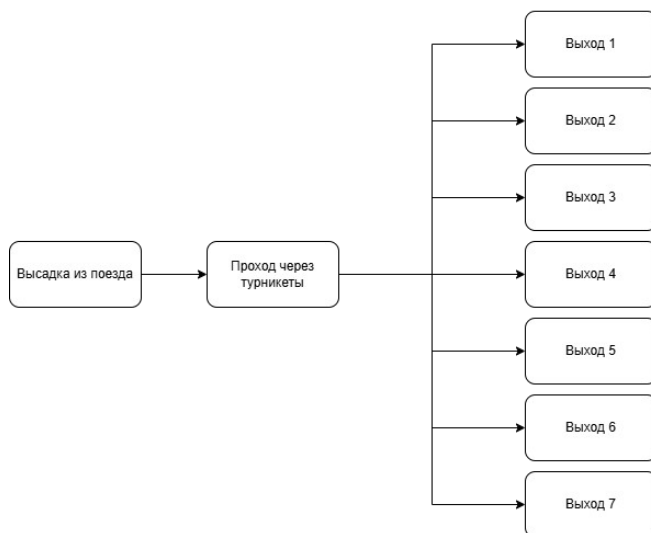


Рисунок 2 - Диаграмма поведение пассажиров, прибывающих на поезде

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.2>

Характер процессов на транспортном узле определяет применение двух разнородных математических схем: СМО и вероятностные автоматы. Вероятностные автоматы использовались для моделирования стохастических процессов покупки билетов пассажирами и выбора номера выхода из метро [5]. К СМО относятся процессы обслуживания на кассах и турникетах. Для моделирования процессов обслуживания потока пассажиров использована дискретно-событийная парадигма имитационного моделирования [6], [7]. На рис. 3 и рис. 4 представлены дискретно-событийные диаграммы, моделирующие процесс обработки пассажиропотоков на транспортном узле.

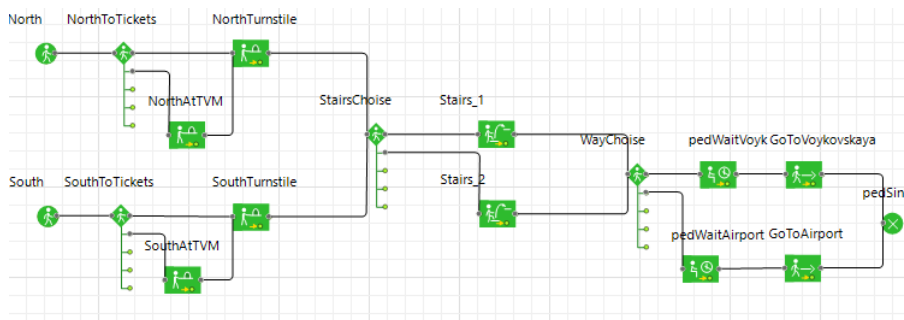


Рисунок 3 - Диаграмма процессов для потока пассажиров, входящих с улицы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.3>

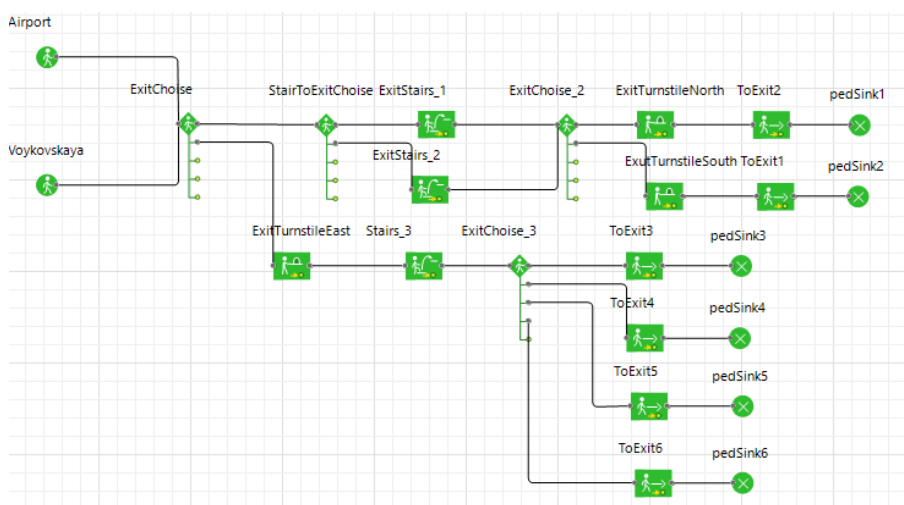


Рисунок 4 - Диаграмма процессов для потока пассажиров, прибывающих на поезде
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.4>

Рассмотрим назначения модельных блоков, представленных на дискретно-событийных диаграммах (рис. 3, рис. 4). Обозначения и описания блоков представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Формализация блоков дискретно-событийных диаграмм

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.5>

Обозначение на диаграмме	Описание
North, South, Airport, Voykovskaya	Блоки создания агентов-пассажиров. North и South на входах на станцию, Airport и Voykovskaya на платформе
NorthToTickets, SouthToTickets	Вероятностный автомат, моделирующий стохастический процесс необходимости покупки билета пассажиром
NorthAtTVM, SouthAtTVM	Кассы
NorthTurnstile, SouthTurnstile, ExitTurnstileEast, ExitTurnstileNorth, ExitTurnstileSouth	Турникеты
StairsChoice, StairsToExitChoice	Вероятностный автомат, определяющий выбор пассажиром лестницы на/с платформы
Stairs_1, Stairs_2, Stairs_3, ExitStairs_1, ExitStairs_2	Лестницы
WayChoice	Выбор направления поездки
pedWaitVoyk, pedWaitAirport	Ожидание поезда
GoToVoykovskaya, GoToAirport	Посадка на поезд
ExitChoice, ExitChoice_2, ExitChoice_3	Вероятностные автоматы, определяющие выход,

Обозначение на диаграмме	Описание
	которым воспользуется пассажир
ToExit1 – ToExit6	Движение пассажира к соответствующему выходу
Движение к соответствующему выходу	Удаление агентов-пассажиров из модели

Для моделирования движения пассажиров и анализа поведения толпы была использована встроенная пешеходная библиотека в среде AnyLogic [2], [8]. В модели каждый пешеход — это самостоятельный агент. Агент «видит» пространство вокруг себя, находит самый короткий путь к своей цели и умеет обходить препятствия и других людей [9]. Реализована возможность гибко настраивать поведение агентов с помощью диаграмм состояний и задавать индивидуальные свойства, задавая им, например, наличие багажа или любимый маршрут. Для анализа результатов моделирования библиотека позволяет строить карты скопления людей и получать подробную статистику: как менялась длина очереди со временем, сколько каждый пассажир провел в ожидании и другие полезные данные.

Поскольку стандартные средства визуализации AnyLogic не обеспечивают необходимой синхронизации прибытия и отбытия поездов с процессами высадки и посадки пассажиров, для реализации сложной логики был разработан программный код на Java [10]. Разработанные функции решают следующие ключевые задачи:

1. *Привязка пассажира к транспорту*: каждого агента ассоциируют с ближайшим подходящим поездом. Программный код функции представлен на рис. 5.

2. *Управление поездами*: Прибывающий поезд удаляется из множества рейсов в момент начала процессов высадки и посадки. Программный код функции представлен на рис. 6.

3. *Генерация и удаление агентов-пассажиров*: Модель динамически создает агентов-пассажиров, прибывающих на станцию в составе поезда, и удаляет тех, кто завершил посадку или покинул станцию.

Поток пассажиров, осуществляющих высадку и посадку, смоделирован по принципу обработки пакетированных заявок.

```

ped.direct = randomTrue(0.5);
Trains t = null;
double minTimeDiff = Double.MAX_VALUE;

for (Trains candidate : trains) {
    boolean isCorrectDirection = (ped.direct && candidate.direction == 1) ||
                                   (!ped.direct && candidate.direction == 2);

    if (isCorrectDirection) {
        double timeDiff = dateToTime(candidate.arrivalTime) - boardingTime - time();

        if (timeDiff >= 0 && timeDiff < minTimeDiff) {
            minTimeDiff = timeDiff;
            t = candidate;
        }
    }
}

if (t != null) {
    ped.p_train = t;
    t.passengers.add(ped);
}
else{
    traceIn("Не найден подходящий рейс для пассажира " + ped);
}

```

Рисунок 5 - Функция, сопоставляющая пассажира с поездом

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.6>

```

for (Trains t : trains) {

    double timeBeforeBoarding = dateToTime(t.arrivalTime) - boardingTime;

    if (timeBeforeBoarding >= 0) {
        create_BoardingEvent(timeBeforeBoarding, t);
        double passengerGenerationTime = timeBeforeBoarding - exitTime;
        if (passengerGenerationTime >= 0) {
            create_PassengerGenerationEvent(passengerGenerationTime, t);
        }
    }
    else {
        create_DepartureEvent(dateToTime(t.arrivalTime), t);
    }
}

```

Рисунок 6 - Функция, удаляющая из множества поездов прибывающий поезд

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.7>

Одна из наиболее сложных решенных в работе задач — моделирование геометрического плана станции. Станция метро «Сокол» представляет собой два этажа: верхний, на котором покупают билеты и проходят через турникеты, и нижний — платформа. Поэтому для корректного построения пассажирских потоков модель состоит из двух уровней, соединенных лестницами. Основные трудности реализации такой модели связаны с организацией переходов агентов между уровнями, так как у AnyLogic отсутствует документация по этому вопросу. Итоговым решением стал

«Прямоугольный узел» из пешеходной библиотеки. Узлы в AnyLogic являются элементами разметки пространства, которые задают место, в котором агенты могут находиться. Другими словами, это поверхность, по которой пешеходы могут передвигаться. Поверх него наложены прямоугольники для имитации ступеней. Переходы между уровнями заданы пассажирам в диаграммах поведения так же с помощью пешеходной библиотеки.

Практические результаты применения имитационной модели транспортного узла

С помощью модели получены следующие наборы данных: количество людей на кассах каждую минуту в течение 5 часов, время пребывания на станции 1000 пассажиров, направляющихся на поезд, и время пребывания на станции 1000 пассажиров, направляющихся к выходам.

На рис. 7, рис. 8, рис. 9 представлены данные, получены на основе вычислительных экспериментов, проведенных с помощью имитационной модели.

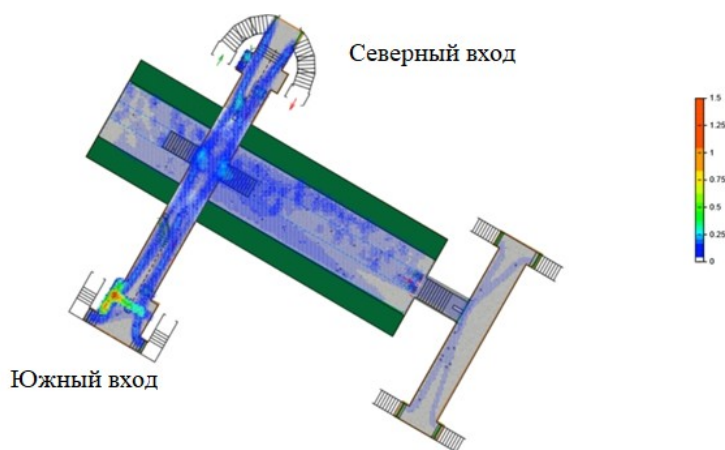


Рисунок 7 - Карта плотности
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.8>



Рисунок 8 - Средняя длина очереди к кассам
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.9>

Анализ карты плотности, изображенной на рисунке 7, позволяет визуально определить узкие места станции метро. Главной проблемой являются кассы южного входа. Немного выделяются также и кассы на северном входе. В зонах расположения турникетов напротив плотность одна из самых низких, из чего можно сделать вывод, что очередей там не образуется. Из собранных данных следует, что среднее количество людей на кассах северного входа — 2 человека, южного входа — 6 человек. Статистика представлена на рисунке 8.

Временем пребывания пассажира на станции будем считать время от момента появления агента в среде до момента его удаления из нее. Среднее время пребывания на станции тех, кто уезжает с «Сокола» примерно 4 минуты, а тех, кто приехал на «Сокол» — 2 минуты (рисунок 9).

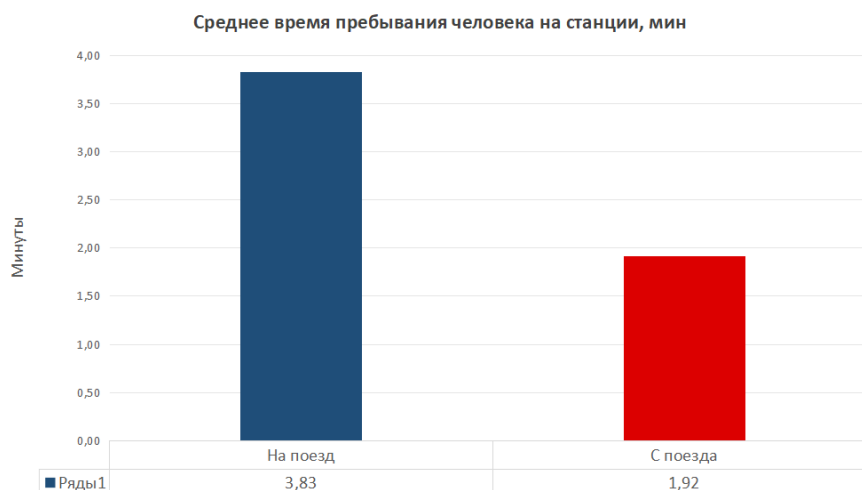


Рисунок 9 - Среднее значение времени пребывания пассажира на станции

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.169.76.10>

Заключение

Рассмотрены подходы к программной реализации гибридной имитационной модели станции метро «Сокол», которая позволяет анализировать пропускную способность станции посредством проведения вычислительных экспериментов. Эксперименты показали, что основным узким местом станции являются кассы южного входа, а турникеты наоборот обладают избыточной пропускной способностью. Полученная модель может быть использована для оценки вариантов оптимизации станции и анализа уже существующей инфраструктуры. Разработанная гибридная имитационная модель станции метрополитена является не просто учебной или научно-исследовательской задачей, а насущной потребностью практического транспортного инжиниринга. Имитационная модель предоставляет инструментарий для принятия обоснованных решений в условиях неопределённости, способствует повышению безопасности, эффективности и комфорта при эксплуатации одного из самых ответственных элементов городской инфраструктуры. В условиях цифровой трансформации транспорта такие модели становятся обязательным этапом как при проектировании новых объектов, так и при модернизации существующих.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

- Halakouei M. Review of analytical models and simulations of pedestrian behavior in open or confined spaces in normal and emergency situations / M. Halakouei. — Milano: Politecnico di Milano, 2025. — 136 p.
- Документация AnyLogic. — URL: <https://anylogic.help/ru/anylogic/index.html> (дата обращения: 05.04.2025).
- Вентцель Е.С. Исследование операций / Е.С. Вентцель. — Москва: Советское радио, 1972. — 552 с.
- Тысячи пассажиров метро. — URL: <https://metrostat.ru/> (дата обращения: 10.01.2025).
- Лимановская О.В. Имитационное моделирование в AnyLogic 7 : учебное пособие : в 2 частях. Часть 1 / О.В. Лимановская. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. — 152 с.
- Эльберг М.С. Имитационное моделирование : учебное пособие / М.С. Эльберг, Н.С. Цыганков. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. — 128 с.
- Белов А.Г. Методы имитационного моделирования / А.Г. Белов, С.А. Моисеев, А.В. Григорьев // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». — 2014. — Т. 1. — С. 277–279.
- Qing Z. Passenger flow simulation of Xiamafang metro station based on AnyLogic / Z. Qing // Highlights in Science, Engineering and Technology. — 2023. — № 37. — P. 142–156.
- Helbing D. Social force model for pedestrian dynamics / D. Helbing, P. Molnar // Physical Review A (Atomic, Molecular, and Optical Physics). — 1995. — Vol. 51. — P. 1928–1935.
- Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5 / Ю.Г. Карпов. — Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Halakouei M. Review of analytical models and simulations of pedestrian behavior in open or confined spaces in normal and emergency situations / M. Halakouei. — Milano: Politecnico di Milano, 2025. — 136 p.
2. Dokumentacija AnyLogic [AnyLogic documentation]. — URL: <https://anylogic.help/ru/anylogic/index.html> (accessed: 05.04.2025). [in Russian]
3. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij [Operations research] / E.S. Ventcel'. — Moscow: Soviet Radio, 1972. — 552 p. [in Russian]
4. Tysjachi passazhirov metro [Thousands of metro passengers]. — URL: <https://metrostat.ru/> (accessed: 10.01.2025). [in Russian]
5. Limanovskaja O.V. Imitacionnoe modelirovanie v AnyLogic 7 [Simulation modeling in AnyLogic 7] : textbook : in 2 parts. Part 1 / O.V. Limanovskaja. — Yekaterinburg: Ural University, 2017. — 152 p. [in Russian]
6. Jel'berg M.S. Imitacionnoe modelirovanie [Simulation modeling] : textbook / M.S. Jel'berg, N.S. Cygankov. — Krasnoyarsk: Sib. Federal University 2017. — 128 p. [in Russian]
7. Belov A.G. Metody imitacionnogo modelirovanija [Methods of simulation modeling] / A.G. Belov, S.A. Moiseev, A.V. Grigor'ev // Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo» [Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality"]. — 2014. — Vol. 1. — P. 277–279. [in Russian]
8. Qing Z. Passenger flow simulation of Xiamafang metro station based on AnyLogic / Z. Qing // Highlights in Science, Engineering and Technology. — 2023. — № 37. — P. 142–156.
9. Helbing D. Social force model for pedestrian dynamics / D. Helbing, P. Molnar // Physical Review A (Atomic, Molecular, and Optical Physics). — 1995. — Vol. 51. — P. 1928–1935.
10. Karpov Ju.G. Imitacionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5 [Simulation modeling of systems. Introduction to modeling with AnyLogic 5] / Ju.G. Karpov. — Saint Petersburg: BHV-Peterburg, 2006. — 400 p. [in Russian]