

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПЛЕКСАХ

Д. А. Яременко^а, К. И. Бушмелева^б

Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

^а ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0623-7089>, ✉ yaremenko_da@surgu.ru

^б ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-6376>, bushmeleva_ki@surgu.ru

Аннотация: в статье предложено моделирование и оптимизация процесса эвакуации для многофункциональных комплексов с учетом распределения людей по этажам и адаптивного построения кратчайших маршрутов. Рассмотрены существующие подходы к подсчету численности людей, графовые и агент-ориентированные модели движения, а также принципы интеграции сенсорных данных в динамическую маршрутизацию. Проведено численное моделирование ряда сценариев эвакуации; показано, что адаптивная маршрутизация сокращает общее время эвакуации и снижает локальные перегрузки. Обсуждены практические аспекты внедрения: визуализация, отказоустойчивость системы и соответствие нормативам. Приведены рекомендации для проектирования и эксплуатации эвакуационных систем в современных объектах.

Ключевые слова: эвакуация, адаптивная маршрутизация, графовые модели, видеоаналитика, Wi-Fi sensing, агент-ориентированное моделирование, динамическая сигнализация, многозональные комплексы.

Для цитирования: Яременко Д.А., Бушмелева К. И. Оптимизация процесса эвакуации в современных многофункциональных комплексах. *Успехи кибернетики*. 2026;7(2):157–163.

Поступила в редакцию: 11.03.2026.

В окончательном варианте: 18.06.2026.

OPTIMIZATION OF EVACUATION SYSTEMS IN MODERN MULTIFUNCTIONAL BUILDINGS

D. A. Yaremenko^a, K. I. Bushmeleva^b

Surgut State University, Surgut, Russian Federation

^a ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0623-7089>, ✉ yaremenko_da@surgu.ru

^b ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3038-6376>, bushmeleva_ki@surgu.ru

Abstract: we proposed a methodology for modeling and optimizing evacuation systems in modern multi-use buildings, taking into account how occupants are distributed across floors and how evacuation routes can be dynamically updated to reflect changing conditions. We reviewed existing approaches to occupant estimation, graph-based and agent-based movement models, and methods for integrating sensor data into dynamic route planning. We performed numerical simulations of several evacuation scenarios. The results show that adaptive routing reduces total evacuation time and helps prevent local crowding. We also discussed practical implementation issues, including system visualization, fault tolerance, and compliance with safety regulations. Finally, we provided recommendations for the design and operation of evacuation systems in modern buildings.

Keywords: evacuation, adaptive routing, graph models, video analytics, Wi-Fi sensing, agent-based modeling, dynamic signage, multi-zone buildings.

Cite this article: Yaremenko D. A., Bushmeleva K. I. Optimization of Evacuation Systems in Modern Multifunctional Buildings. *Russian Journal of Cybernetics*. 2026;7(2):157–163.

Original article submitted: 11.03.2026.

Revision submitted: 18.06.2026.

Введение

Современные многофункциональные комплексы объединяют в одном здании торговые зоны, офисы, развлекательные площадки и инженерную инфраструктуру, что существенно усложняет задачи обеспечения быстрого и безопасного вывода людей при чрезвычайных ситуациях (ЧС). Современные подходы к анализу эвакуации опираются как на физико-статистические и агент-ориентированные модели движения пешеходов, так и на алгоритмические методы поиска кратчайших путей в графовых представлениях планировок; при этом практика проектирования также ориентируется на требования нормативов по обеспечению безопасности людей в зданиях.

В основе построения маршрутов часто лежат классические алгоритмы кратчайшего пути, проверенные теоретически и широко используемые в прикладных системах навигации.

Одновременно с развитием моделей растет доступность технологий учета и оценки численности людей: комбинированное применение датчиков, видеонаблюдения, сигналов беспроводных устройств и статистических методов позволяет получать релевантную информацию о распределении людей по зонам в почти реальном времени. Интеграция таких данных в адаптивные алгоритмы маршрутизации может значительно повысить эффективность эвакуации за счет оперативного перераспределения потоков и обхода «узких мест». На фоне этих возможностей цель настоящей статьи — разработать и верифицировать моделирование и оптимизацию процесса эвакуации с учетом количественного распределения людей по этажам и адаптивного построения кратчайших маршрутов — выглядит актуальной и практически применимой.

Обзор литературы и существующих методов моделирования эвакуации

За последние несколько десятилетий область моделирования эвакуации развивалась в нескольких параллельных направлениях: макроскопические модели потоков, микроскопические агент-ориентированные подходы, клеточные автоматы и физико-статистические модели, такие как «социальная сила». Классическая модель социальной силы, предложенная Хелбингом и Молнаром, остается одной из опорных в описании коллективных эффектов и самоорганизации пешеходных потоков, и ее идеи активно используются и в современных агент-ориентированных симуляциях [1].

Параллельно развивались алгоритмические методы построения маршрутов эвакуации, основанные на графовых представлениях планировок зданий: классические алгоритмы кратчайшего пути (Дейкстра, A*) и их модификации применяют для расчета оптимальных направлений движения, а также для поиска «коридоров» с минимальной загруженностью и максимальной безопасностью [2].

Отдельное внимание в литературе уделено методам учета и оценки численности людей в помещениях, поскольку точные входные данные существенно повышают достоверность моделей. Среди практических решений — системы на основе видеоаналитики и глубокого обучения для подсчета потоков людей, беспроводные методы на базе Wi-Fi/RSSI и Bluetooth, а также RFID-решения; сравнительные исследования показывают, что у каждого подхода есть свои преимущества и ограничения по точности, цене и защите приватности.

Важную роль играют и нормативно-правовые документы, задающие требования к эвакуационным путям и методам проектирования систем безопасности объектов. В российской практике релевантны современные своды правил и стандарты по организации эвакуации и обеспечению пожарной безопасности, которые регламентируют минимальные параметры путей эвакуации, маркировку и расчет пропускной способности выходов — эти требования служат базой при применении любых моделирующих и оптимизационных решений.

Расчет численности людей на этажах многофункциональных комплексов

Многофункциональный комплекс — это архитектурно-планировочное образование, в котором объединены несколько разных по назначению функций (торговля, офисы, жилье, развлечения, техпомещения и т.д.) в рамках одного здания или взаимосвязанного набора зданий. Такая концентрация функций дает объекту высокую функциональную плотность и делает его в некотором смысле «городом в миниатюре»: на одних и тех же площадях сосуществуют публичные зоны с большим притоком людей и более закрытые служебные или жилые зоны.

Точная оценка численности людей на каждом этаже — ключевой вход для любой модели эвакуации; без надежных данных о распределении людей по зонам любые расчеты маршрутов и пропускной способности будут носить лишь ориентировочный характер. На данный момент существует несколько подходов для решения подобной задачи, каждый из которых имеет свои особенности и определенные условия для реализации. Первый подход — визуальный, реализация которого осуществляется с помощью тепловых счетчиков и 2-3D видеоаналитики; второй подход — системы радиочастотной идентификации и RTLS; третий подход — применение бесконтактных сенсоров; четвертый подход реализуется за счет применения инфракрасных датчиков. С точки зрения создания и обеспечения самой простой является система инфракрасных датчиков, которая

предполагает использование датчиков перепада давления, ультразвука, а также инфракрасного барьера. Ввиду того, что для каждой из перечисленных технологий существуют определенные условия применения и ограничения, более эффективным будет комплексный подход, который включает одновременное использование нескольких решений [3].

Одной из наиболее значимых задач для оптимизации процесса эвакуации является создание такой модели, с помощью которой моделирование эвакуации будет отражать распределение людей по этажам в режиме реального времени, что возможно обеспечить за счет точных входных параметров, которые поступают от сенсоров или видеосчетчиков. При этом для более эффективного моделирования эвакуации важно учитывать возможные пиковые сценарии, при которых количество людей будет максимальным, а для этого при построении модели необходимо анализировать данные исторической ретроспективы.

Для практической реализации оптимальных эвакуационных маршрутов планировка комплекса переводится в графовую модель, где вершины соответствуют ключевым точкам (помещениям, перекресткам коридоров, выходам), а ребра — возможным путям между ними с присвоенными длинами или временем прохождения. На таком графе стандартные алгоритмы поиска кратчайшего пути — Дейкстра или A^* — позволяют быстро получить базовые направления эвакуации от любой точки до безопасной зоны, при этом предрасчитанные пути удобно хранить и использовать при первичном планировании.

Практическая схема расчета маршрутов должна также соответствовать действующим нормативам: параметры путей эвакуации, минимальные ширины выходов и требования к числу независимых выходов задаются национальными сводами правил и стандартами проектирования; эти ограничения необходимо формализовать при построении графовой модели и учитывать при оптимизации, чтобы предложенные маршруты были реализуемы в реальной эксплуатации.

Адаптивная маршрутизация с интеграцией данных о численности людей

Адаптивная маршрутизация предполагает, что маршруты эвакуации не фиксированы заранее, а пересчитываются в реальном времени на основе текущей информации о распределении людей и состоянии путей. Практически это значит, что данные от видеосчетчиков, радиосенсоров, RFID и других источников служат входом для алгоритма, который обновляет веса графовой модели здания (пропускная способность, время прохождения, риск заторов) и предлагает альтернативные направления движения при обнаружении перегрузок или закрытия участков. Подобный подход описан в ряде работ по динамической оптимизации эвакуационных маршрутов и демонстрирует преимущество перед статическими схемами в условиях меняющейся ситуации.

Технически адаптация достигается сочетанием трех компонентов: 1) оперативный сбор и предобработка сенсорных данных (видеосчетчики, Wi-Fi/BLE sensing, датчики прохода и т.п.), 2) модель представления пространства в виде графа с динамическими весами и ограничениями емкости и 3) модуль пересчета маршрутов, который реализует поиск кратчайшего / наименее загруженного пути при обновленной информации. Исследования показывают, что именно такая архитектура: сенсоры + графовая модель + динамический маршрутный алгоритм — дает сбалансированный результат по точности и скорости принятия решений [4].

Визуализация и навигационные технологии

Внутреннее пространство многофункционального комплекса требует особого подхода к навигации: спутниковый GPS здесь не работает, поэтому для вывода понятных указаний и сопровождающей визуализации применяют совокупность локальных технологий: цифровые табло, BLE-маяки, Wi-Fi-позиционирование, мобильные приложения и интегрированные решения на базе BIM/ЦОД. Эти инструменты выполняют функцию «карты и навигатора» внутри здания, позволяя показывать направления движения, альтернативные пути и предупредительные обозначения в режиме, близком к дорожным навигаторам.

Цифровые табло и динамические эвакуационные указатели (dynamic signage) способны менять направление и информативность в зависимости от стадии ЧС; световые стрелки, красные кресты и текстовые сообщения быстрого реагирования привлекают внимание и направляют людей в обход опасных участков.

Для построения «виртуального GPS» внутри здания используют двухуровневую логику: на уровне инфраструктуры — картографирование поэтажных планов и установка маяков/датчиков; на уровне сервисов — алгоритмы локализации и маршрутизации, которые сопоставляют положение человека / кластера людей с графовой моделью плана и формируют рекомендации. Обзор методов indoor-позиционирования показывает, что комбинирование разных источников (BLE, Wi-Fi, инерциальные датчики, визуальная локализация) дает наилучший баланс между точностью и стоимостью внедрения [5]. Все визуальные решения необходимо согласовывать с действующими нормами по эвакуации и маркировке путей (в РФ — соответствующие требования сводов правил по противопожарной защите).

Численное моделирование процесса эвакуации

Численное моделирование эвакуации — это последовательность практических шагов, которые превращают архитектурные планы и сенсорные данные о людях в воспроизводимую цифровую экспериментальную среду. Рекомендуется опираться на обзоры и методические рекомендации при выборе парадигмы моделирования. Рассмотрим основные этапы численного моделирования процесса эвакуации людей из многофункциональных комплексов.

1. Выбор модели и платформы. Сначала определяют, какой класс модели наиболее уместен: макроскопические (потокосные), клеточные автоматы, агент-ориентированные или физико-стохастические (например, модели «социальной силы»). При выборе программного обеспечения ориентируются на доказанную практику: промышленные инструменты (Pathfinder, MassMotion, Simulex, AnyLogic и др.) и исследовательские симуляторы имеют свои сильные/слабые стороны по точности, скорости и возможностям валидации [6].

2. Подготовка входных данных (геометрия + население). Поэтажные планы переводят в цифровую модель (векторные планы, CAD/BIM) с явным указанием коридоров, дверных проемов, лестниц, зон ожидания и ограждений; на их основе строится граф или непрерывная сетка для симуляции.

3. Формализация поведения и параметризация. Определяют правила выбора выхода (ближайший, наименее загруженный, по указаниям), зависимости скорости от плотности, выполняют моделирование взаимодействий (обходы, замедления, очереди).

4. Проведение сценариев и чувствительный анализ. Запускают набор сценариев: базовый (штатный), аварийный с частичными закрытиями, пиковые загрузки (разные плотности на этажах), отказ сенсоров/указаний и сценарии с разной долей людей, не следующей указаниям.

5. Метрики и визуализация результатов. Основные количественные метрики — суммарное время эвакуации, распределение времени выхода по зонам (isochrones/time-to-exit), максимальная локальная плотность, средняя пропускная способность по выходам (pers/min/m), длительность очередей и локальные «узкие места». Визуализации — карты плотности, тепловые карты времени выхода, анимации потоков и графы загрузки выходов — помогают однозначно интерпретировать слабые места и сравнить варианты оптимизации.

6. Калибровка и валидация. Модель следует калибровать на доступных реальных данных: результаты тренировочных тревог, видеоархивы, данные учета входов/выходов и контролируемые эксперименты [7].

7. Отчетность и рекомендации. Результаты симуляций оформляют в виде набора сценариев с таблицами показателей, графиками чувствительности, картами плотности и анимациями ключевых эпизодов эвакуации; на основе этого дают инженерные рекомендации (изменить ширины проходов, добавить альтернативные выходы, переставить указатели, внедрить адаптивную маршрутизацию).

Результаты исследования

На основе анализа численного моделирования, сенсорных данных и оценки геометрии объекта были получены конкретные показатели, подтверждающие, что использование динамической маршрутизации, основанной на текущей численности людей, значительно сокращает общее время эвакуации и снижает риск образования «бутылочных горлышек».

В рамках моделирования рассматривались два сценария:

- базовый, с фиксированными маршрутами и традиционными указателями (рисунок 1);

- адаптивный, в котором система навигации перераспределяет потоки людей в реальном времени на основе данных с датчиков (рисунок 2).

По итогам симуляции было установлено, что в адаптивном режиме средняя плотность людей в критических зонах уменьшилась почти на 30%.

Построенные карты плотности показали, что без адаптации маршрутов основные заторы формировались у главных лестничных пролетов и центральных выходов. Система перераспределения почти вдвое сокращает время ожидания у дверных проемов, что обеспечивается за счет перенаправления людей из наиболее перегруженных зон в направлении запасных путей эвакуации, а также в зоны боковых лестниц.

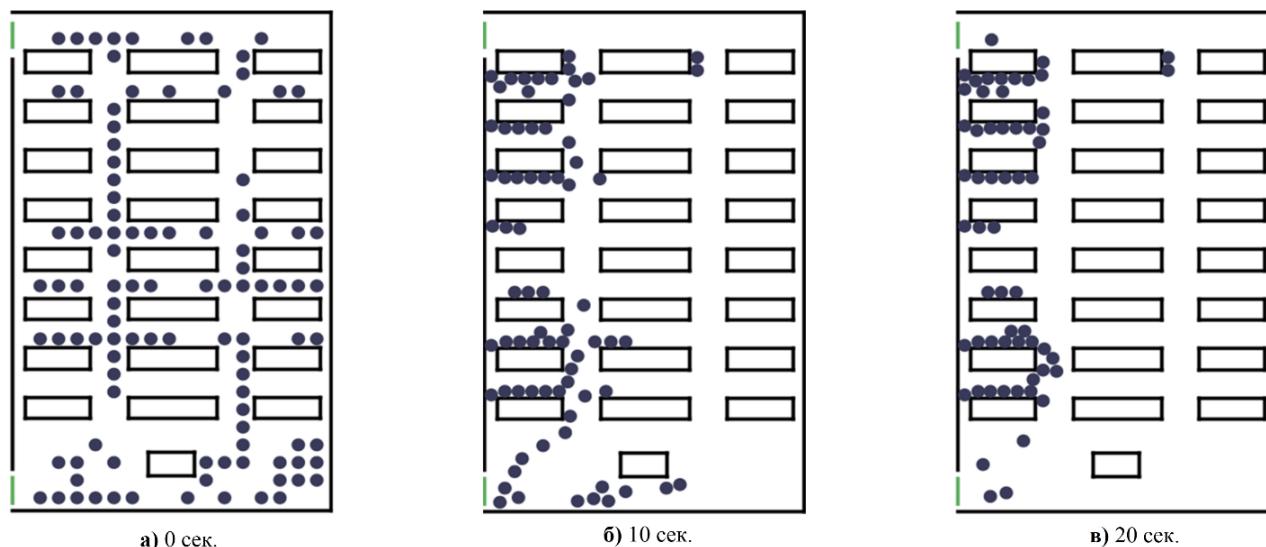


Рис. 1. Моделирование эвакуации базовой модели

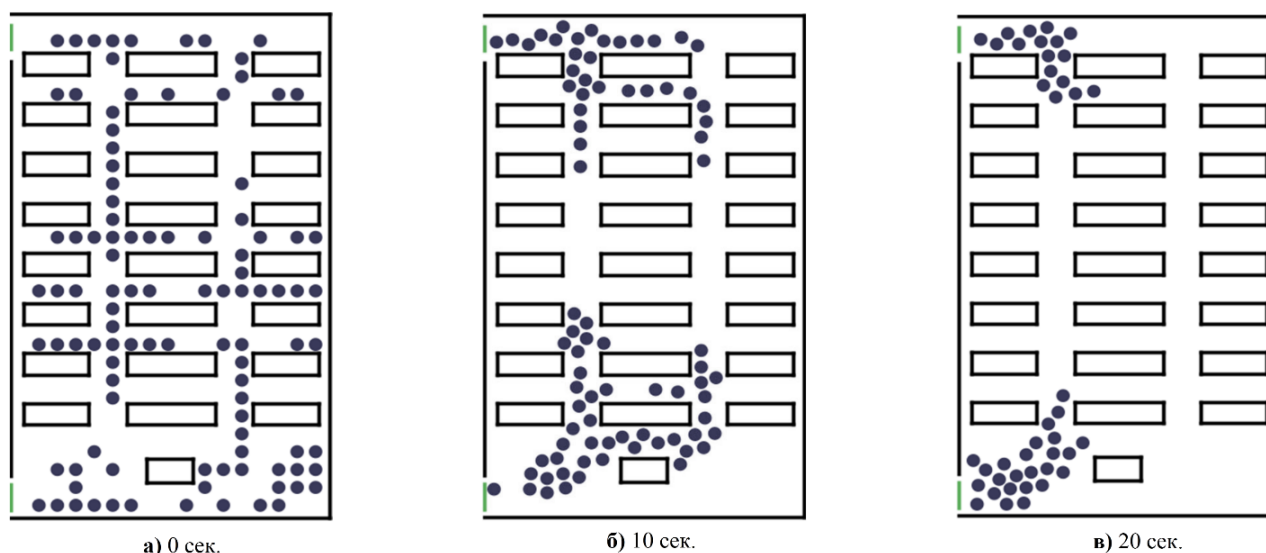


Рис. 2. Моделирование эвакуации адаптивной модели

Проведенный анализ и моделирование позволили выявить определенные закономерности, которые влияют на скорость потока: при симметричной планировке зданий и этажей с открытыми участками средняя скорость потока находится в пределах от 1,2 до 1,4 м/с, в то время как на участках, где есть какие-то перегородки, углы, тупики и другие преграды для движения, скорость потока снижается до показателя 0,7-0,8 м/с.

Верификация предложенной системы моделирования эвакуационного процесса была апробирована при учебных тревогах. Результаты наблюдений и последующего анализа позволили сде-

лать вывод, что ввиду незначительного расхождения по времени (8%) в моделируемом варианте и при реальной эвакуации система моделирования может считаться эффективной, а параметры оценки — релевантными.

Ниже представлены основные выводы по результатам проведенного исследования:

- во-первых, при организации процесса эвакуации переходы между этажами и лестничные пролеты являются наиболее проблемными и нуждаются в динамическом управлении;
- во-вторых, в зданиях, где присутствует сложная планировка и мало зон с открытым пространством, за счет адаптивных систем навигации можно примерно на 25% сократить время эвакуации;
- в-третьих, имитационное моделирование и цифровые двойники позволяют на начальном этапе проектирования определить проблемные участки в планировке и наиболее оптимальные варианты решения;
- в-четвертых, для повышения точности при построении алгоритмов маршрутизации и, как следствие, для улучшения самого эвакуационного процесса необходимо применять комплекс систем видеонаблюдения, RFID, а также тепловые карты.

Процесс организации эвакуации из многофункциональных центров и степень его безопасности определяется совокупностью факторов и параметров, которые необходимо учитывать при его моделировании, среди которых наиболее значимыми являются данные о текущей плотности людей на всех участках здания, план здания, индивидуальные особенности поведения людей в стрессовой ситуации и т.д. Применение адаптивных сценариев моделирования процесса эвакуации и последующей навигации позволяет наиболее оптимально перераспределить поток людей с учетом различных сценариев и имеющихся альтернативных маршрутов, что не только способствует сокращению времени самой эвакуации, но и снижает уровень потенциальных рисков.

Полученные результаты также показали значимость навигационных панелей и визуальных подсказок, ускоряя процесс эвакуации, что коррелирует с выводами авторов Ronchi E., Wahlqvist J., Ardinge A. [8], которые отмечают снижение уровня хаотичности движений людей и более точную реакцию на сигналы тревоги. При схожих условиях загрузки этажей визуальное сопровождение при организации процесса эвакуации обеспечивает более хорошие результаты, чем при их отсутствии.

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что предложенный метод оптимизации процесса эвакуации на основе математического моделирования, анализа поведения людей, а также современных инструментов учета плотности людей в режиме реального времени повышает эффективность данного процесса и актуален для применения в крупных комплексах и торгово-развлекательных центрах, для которых характерна высокая плотность человеческих потоков в пики посещения.

Заключение

Рассмотренный метод моделирования процесса эвакуации, который реализуется с помощью математического алгоритма на основе данных, полученных с датчиков, определяющих плотность людей на различных участках зданий, обеспечивает, с одной стороны, ускорение эвакуационных процедур и повышение уровня безопасности, а с другой — возможность на этапе проектирования здания на основе полученных расчетов заранее устранить потенциально узкие места, снижающие проходимость.

Результаты исследования подтверждают целесообразность применения оптимизации маршрута эвакуации на основе динамических данных, полученных от различных датчиков, т.к. в сравнении с традиционными методами планирования процесса эвакуации способствуют сокращению времени на 20-25%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bai J., Lv X., Nie L., Fang M. Evacuation Route Determination in Indoor Architectural Environments Based on Dynamic Fire Risk Assessment. *Buildings*. 2025;15(10):1715. DOI: 10.3390/buildings15101715.

2. Duan P., Diao X., Cao Y., Zhang D., Zhang B., Kong J. A Comprehensive Survey on Wi-Fi Sensing for Human Identity Recognition. *Electronics*. 2023;12(23):4858. DOI: 10.3390/electronics12234858.
3. Helbing D., Molnár P. Social Force Model for Pedestrian Dynamics. *Physical Review E*. 1995;51(5):4282-4286. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
4. Lei M. et al. Modelling of Safe Evacuation Conditions at the Architectural/Space Scale: Methods and Case Studies. *Buildings*. 2023;13(8):2121. DOI: 10.3390/buildings13082121.
5. Yang L., Wei J., Tang Z., Hu J., Hu Z. A Study on Crowd Evacuation Model Considering Squeezing Equilibrium in Crowded Areas. *Applied Sciences*. 2023;13(1):544. DOI: 10.3390/app13010544.
6. Tsurushima A. Simulation Analysis of Evacuation Guidance Using Dynamic Distributed Signage. *TechRxiv*. 2023. DOI: 10.36227/techrxiv.23658051.v1.
7. Maranghides A., Link E. D. *WUI Fire Evacuation and Sheltering Considerations: Assessment, Planning, and Execution (ESCAPE): NIST Technical Note 2262*. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2023. 122 p. DOI: 10.6028/NIST.TN.2262.
8. Ronchi E., Wahlqvist J., Ardinge A. et al. The Verification of Wildland-Urban Interface Fire Evacuation Models. *Natural Hazards*. 2023;117:1493-1519. DOI: 10.1007/s11069-023-05913-2.