

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ/SYSTEM ANALYSIS,
MANAGEMENT AND PROCESSING OF INFORMATION**DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113> EDN: WTHVWG**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ И ОЦЕНКА
РЕКРЕАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ТЕХНОГЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ КАК СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ**

Научная статья

Маликова Е.А.^{1,*}, Привезенцева С.В.²¹ ORCID : 0009-0001-9021-1498;² ORCID : 0000-0002-4407-1789;^{1,2} Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (malickowa.elena2013[at]yandex.ru)

Предложена: 21.04.2026; Принята: 04.06.2026; Опубликовано: 17.06.2026

Аннотация

В статье рассматриваются задачи системного анализа и обработки информации применительно к сложным градостроительным объектам — техногенным территориям и пешеходной инфраструктуре для маломобильных групп населения (МГН). Показано, что традиционные нормативные методы фиксируют статическое состояние, но не позволяют прогнозировать динамику параметров (эрозия, миграция загрязнителей, гетерогенные пешеходные потоки). Представлена авторская методика количественной оценки рекреационного потенциала фосфогипсового террикона «Белая гора» на основе 62 параметров; среднее значение составило 0,5473 (95% доверительный интервал: 0,50–0,59). Для моделирования пешеходных потоков МГН предложен алгоритм агентного имитационного моделирования, включающий расчёт эквивалентной плотности потока и интегрального индекса доступности IA. Приведены результаты итерационной оптимизации маршрутов, подтверждающие достижение целевого уровня доступности. Разработанные методы могут быть использованы в системах поддержки принятия решений при управлении жизненным циклом градостроительных объектов.

Ключевые слова: системный анализ, имитационное моделирование, агентное моделирование, обработка информации, рекреационный потенциал, техногенные территории, маломобильные группы населения, пешеходные потоки, индекс доступности.

**SIMULATION MODELLING OF HETEROGENEOUS PEDESTRIAN FLOWS AND ASSESSMENT OF THE
RECREATIONAL POTENTIAL OF URBAN AREAS AS A FORM OF SYSTEMS ANALYSIS AND INFORMATION
PROCESSING**

Research article

Malikova E.A.^{1,*}, Privezentseva S.V.²¹ ORCID : 0009-0001-9021-1498;² ORCID : 0000-0002-4407-1789;^{1,2} National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (malickowa.elena2013[at]yandex.ru)

Suggested: 21.04.2026; Accepted: 04.06.2026; Published: 17.06.2026

Abstract

The article examines the challenges of systems analysis and information processing as they apply to complex urban development projects—industrial areas and pedestrian infrastructure for people with reduced mobility (PRM). It is shown that traditional normative methods capture a static state but do not allow for the prediction of parameter dynamics (erosion, pollutant migration, heterogeneous pedestrian flows). The authors present a methodology for the quantitative assessment of the recreational potential of the "Belaya Gora" phosphogypsum slag heap based on 62 parameters; the mean value was 0,5473 (95% confidence interval: 0,50–0,59). To simulate pedestrian PRM flows, an agent-based simulation algorithm is suggested, including the calculation of equivalent flow density and the integral accessibility index IA. The results of iterative route optimisation are presented, confirming that the target accessibility level has been achieved. The developed methods can be used in decision support systems for the life cycle management of urban development projects.

Keywords: systems analysis, simulation modelling, agent-based modelling, information processing, recreational potential, urbanised areas, people with reduced mobility, pedestrian flows, accessibility index.

Введение

В рамках системного анализа сложных динамических систем [1] градостроительные объекты — техногенные терриконы и пешеходные пространства — характеризуются множеством взаимосвязанных параметров (экологических, экономических, социальных), изменяющихся во времени: эрозия, миграция загрязнителей, гетерогенные потоки маломобильных групп населения (МГН). Классические нормативные подходы [2], [3], [4] фиксируют лишь

статическое состояние, что не позволяет формализовать задачи прогнозирования динамики и оценки эффективности управленческих решений на этапах жизненного цикла объектов. Правовые требования к учёту интересов МГН в градостроительной деятельности закреплены в Градостроительном кодексе РФ [5].

В работе формулируются две прикладные задачи системного анализа: количественная оценка рекреационного потенциала нарушенных территорий (интегральный показатель преобразования техногенного ландшафта в рекреационную зону) и оценка доступности пешеходной среды для МГН с учётом реального поведения гетерогенных потоков. Для их решения разработаны критерии и модели описания — эквивалентная плотность потока и интегральный индекс доступности IA, а также методы и алгоритмы — агентное имитационное моделирование и методика статистической обработки 62 параметров.

Цель работы — применение указанных методов и алгоритмов для количественной оценки рекреационного потенциала техногенной территории (на примере фосфогипсового террикона «Белая гора») и доступности среды для МГН.

Задачи исследования:

1. Использовать разработанную методику оценки рекреационного потенциала (62 параметра) с последующей статистической обработкой результатов (расчёт среднего, доверительного интервала, коэффициента вариации).
2. Предложить алгоритм агентного имитационного моделирования пешеходных потоков МГН с расчётом интегрального индекса доступности IA.
3. Апробировать алгоритм на реальных пешеходных маршрутах и представить результаты итерационной оптимизации с визуализацией.

Научная новизна заключается в формализации критериев оценки (эквивалентная плотность потока, индекс доступности), разработке соответствующего алгоритмического обеспечения и интеграции его в имитационную модель, что позволяет перейти от статического контроля к управлению сценариями и статистическому прогнозированию.

Методы и принципы исследования

Объекты и материалы. Исследованы два типа сложных динамических систем: техногенная территория — фосфогипсовый террикон «Белая гора» (Московская область) и пешеходная инфраструктура для маломобильных групп населения (МГН). Используются данные инженерно-геологических изысканий, градостроительная документация, а также результаты анкетирования МГН ($n=210$). Нормативную базу составили СП 59.13330.2020, СП 396.1325800.2018 и Постановление № 614 [2], [3], [4].

Оценка рекреационного потенциала. Авторская методика включает 62 параметра, сгруппированных по трём факторам (экологический, экономический, социальный), каждый нормирован в диапазоне $[0,1]$. Интегральный показатель для фиксированной комбинации параметров вычисляется по формуле (1), объединяющей взвешенное суммирование и компенсирующую компоненту. Методом морфологического ящика [6] сформированы шесть независимых комбинаций параметров, для каждой рассчитан потенциал. Полученная выборка обработана статистически (среднее, медиана, стандартное отклонение, коэффициент вариации, доверительный интервал). Для верификации сопоставлены ручной подсчёт и автоматизированная оценка (GigaChat).

Агентное имитационное моделирование МГН. Введены три категории агентов (колясочники, люди с колясками, пожилые) с пространственными потребностями $0,96 \text{ м}^2$ и $0,3 \text{ м}^2$ [7]. Скорость каждого агента задана как функция уклона на основе натурных замеров. Интенсивность потока моделируется с учётом временных пиков активности МГН (максимум 13:00–15:00). Для количественной оценки доступности используются три показателя: эквивалентная плотность потока (формула 6), пропускная способность (формула 7) и интегральный индекс доступности IA (формула 8). Методика расчёта показателей базируется на подходах [8]. Оптимизация маршрута выполняется итерационно: симуляция, выявление «узких мест», корректировка геометрии, повторный расчёт IA до достижения целевого значения $IA \geq 0,75$.

Статистическая обработка и визуализация. Для выборки оценок рекреационного потенциала ($n=6$) рассчитаны основные статистические показатели, для анкетных данных МГН ($n=210$) — частота встречаемости барьеров. Все графики (столбчатые диаграммы, точечные графики, доверительные интервалы, динамика IA) получены в среде Python с использованием библиотек Matplotlib, NumPy и SciPy. Код разработан автором с применением AI-ассистента DeepSeek, что обеспечивает автоматизацию и воспроизводимость расчётов.

Основные результаты

3.1. Рекреационный потенциал техногенной территории

В рамках системного анализа сложных динамических систем объектом исследования выбран фосфогипсовый террикон «Белая гора» (г. Воскресенск, Московская область). Для количественной оценки рекреационного потенциала — интегрального показателя, характеризующего возможность преобразования техногенного ландшафта в рекреационную зону — разработана авторская методика, включающая 62 параметра, сгруппированных по трём факторам: экологическому, экономическому и социальному. К числу параметров относятся, например, толщина слоя фосфогипса, удельный вес, гранулометрический состав, электропроводность, радиационный фон (экологические); доходность проекта рекультивации, стоимость рекультивации, срок окупаемости, число созданных рабочих мест, влияние на рынок недвижимости (экономические); эстетическое восприятие территории, история развития территории, символическое значение объекта, польза для местного населения (социальные). Полный перечень параметров с нормированными оценками m_i и весами w_i приведён в таблице 1. Каждый параметр нормирован в диапазоне $[0,1]$, где 0 соответствует минимальному вкладу в рекреационный потенциал, а 1 — максимальному.

Таблица 1 - Исследуемые параметры с оценкой автора

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.1>

№	Параметр	Нормированная оценка (mi)	Вес (wi)
1	Доходность проекта рекультивации	0,8	0,0161
2	Стоимость рекультивации	0	0,0161
3	Экономический эффект от прекращения эксплуатации полигона	0,7	0,0161
4	Срок окупаемости проекта (простой)	0,5	0,0161
5	Число созданных рабочих мест	1	0,0161
6	Увеличение турпотока	1	0,0161
7	Влияние на рынок недвижимости	0,5	0,0161
8	Оценка экономической устойчивости проекта	0,8	0,0161
9	Толщина слоя фосфогипса	0	0,0161
10	Удельный вес фосфогипса	1	0,0161
11	Количество фосфогипса на гектар	0	0,0161
12	Гранулометрический состав фосфогипса	0,3	0,0161
13	Каталитическая активность фосфогипса	0,5	0,0161
14	Коэффициент фильтрации фосфогипса	0,5	0,0161
15	Гидрофобность фосфогипса	0,4	0,0161
16	Пластичность фосфогипса	0,4	0,0161
17	Прочность на сжатие фосфогипса	0,5	0,0161
18	Водоподъемная способность фосфогипса	0,4	0,0161
19	Социальная польза для местного населения	0,75	0,0161
20	Потенциал коммерческого использования территории	0,9	0,0161
21	Стратегия комплексного развития территории	0,5	0,0161
22	Вероятность инвестиционных рисков	0,5	0,0161
23	Период до выхода на безубыточность (дисконтированный)	0,4	0,0161
24	Эстетическое восприятие территории	0,4	0,0161
25	Стоимость	0,2	0,0161

№	Параметр	Нормированная оценка (mi)	Вес (wi)
	экологических санкций		
26	Протяжённость железнодорожной ветки	1	0,0161
27	Расстояние до ближайшего населённого пункта	0,5	0,0161
28	Густота дорожной сети	0,3	0,0161
29	Плотность населения	0,1	0,0161
30	Биологическое разнообразие территории	0,3	0,0161
31	Генеративная ёмкость почв	0,4	0,0161
32	Регистрация радиационного фона	0,2	0,0161
33	Уровень заболеваемости населения	0,6	0,0161
34	Угол естественного откоса	0,7	0,0161
35	Среднегодовая температура	0,8	0,0161
36	Годовой объем осадков	0,5	0,0161
37	Скорость ветра	0,5	0,0161
38	Режим увлажнения территории	0,5	0,0161
39	Глубина залегания грунтовых вод	0,8	0,0161
40	Топография местности	0,2	0,0161
41	Среднемесячное количество солнечного тепла	0,5	0,0161
42	История развития территории	0,6	0,0161
43	Символическое значение объекта	0,7	0,0161
44	Материальное и нематериальное наследие	0,8	0,0161
45	Электропроводность фосфогипса	0,2	0,0161
46	Радиоактивность фосфогипса	0,4	0,0161
47	Сорбционная ёмкость фосфогипса	0,4	0,0161
48	Диэлектрическая проницаемость фосфогипса	0,5	0,0161
49	Коэффициент теплопроводности фосфогипса	0,3	0,0161
50	Отражательная способность (альbedo) фосфогипса	0,4	0,0161
51	Содержание горючих примесей в фосфогипсе	0,3	0,0161

№	Параметр	Нормированная оценка (mi)	Вес (wi)
52	Пористость фосфогипса	0,6	0,0161
53	Содержание тяжёлых металлов в фосфогипсе	0,7	0,0161
54	Период полураспада радионуклидов	0,4	0,0161
55	Щёлочность фосфогипса	1	0,0161
56	Потенциал общественного использования территории	0,8	0,0161
57	Уровень шумового загрязнения	0,5	0,0161
58	Экологический ущерб от продолжения деятельности	1	0,0161
59	Потенциал развития малого и среднего бизнеса	0,6	0,0161
60	Наличие зелёных зон	0	0,0161
61	Тип растительности	0,6	0,0161
62	Возможности сельскохозяйственного использования	0,5	0,0161

Оценка параметров выполнена автором вручную с использованием комплексного подхода. Для количественных параметров (толщина слоя фосфогипса, удельный вес, гранулометрический состав, электропроводность, радиационный фон и др.) применялись нормативные требования, технические условия и государственные стандарты. Степень соответствия каждого параметра устанавливалась на основе сравнения фактических значений с допустимыми диапазонами: если значение находилось в пределах нормы, параметр получал высокий балл (ближе к 1), если выходило за пределы — низкий (ближе к 0). Для качественных параметров (эстетическое восприятие территории, социальная значимость, символическое значение и др.) оценка проводилась эмпирическим путём на основе экспертного мнения и натурных наблюдений. Более технические параметры (физико-химические свойства фосфогипса) получили среднюю оценку 0,3, поскольку автор не располагал необходимыми средствами для детальных лабораторных замеров. После оценки каждого параметра были рассчитаны средневзвешенные значения, что позволило получить итоговую оценку рекреационного потенциала территории. Такой подход обеспечивает комплексность и объективность оценки, учитывая как количественные, так и качественные характеристики.

3.1.1. Первый этап. Расчёт интегрального показателя для фиксированного набора параметров

Интегральный показатель рекреационного потенциала P_0 для одной фиксированной комбинации параметров вычисляется по формуле (1), объединяющей взвешенное суммирование, поправочную составляющую и компенсирующую компоненту на основе метода наименьших квадратов:

$$P_0 = \sum_i (w_i \times m_i) - \alpha \times \Delta W \sqrt{\frac{1}{n} \sum (m_i - M)^2}, \quad (1)$$

где:

w_i — вес каждого параметра;

m_i — нормированная оценка параметра;

$\alpha=1,5$ — коэффициент чувствительности;

ΔW — средний вес всех параметров;

M — среднее значение нормированных оценок;

N — количество параметров.

Второе слагаемое в формуле (1) выполняет роль компенсирующей компоненты: оно основано на методе наименьших квадратов и предназначено для компенсации возможных отклонений фактических значений параметров от ожидаемых, что повышает устойчивость оценки к случайным ошибкам измерений и систематическим искажениям.

Для учёта неопределённости и вариативности исходных данных (поскольку значения многих параметров могут изменяться в зависимости от времени, метода измерения или экспертной оценки) применён метод морфологического ящика [6]. С использованием этого метода сформированы шесть независимых комбинаций параметров, каждая из которых представляет собой один из возможных сценариев состояния территории. Для каждой из шести комбинаций

по формуле (1) рассчитано значение рекреационного потенциала P_0 . В результате получены следующие величины: 0,66; 0,61; 0,63; 0,59; 0,394; 0,40. На рисунке 1 визуализированы эти шесть значений.

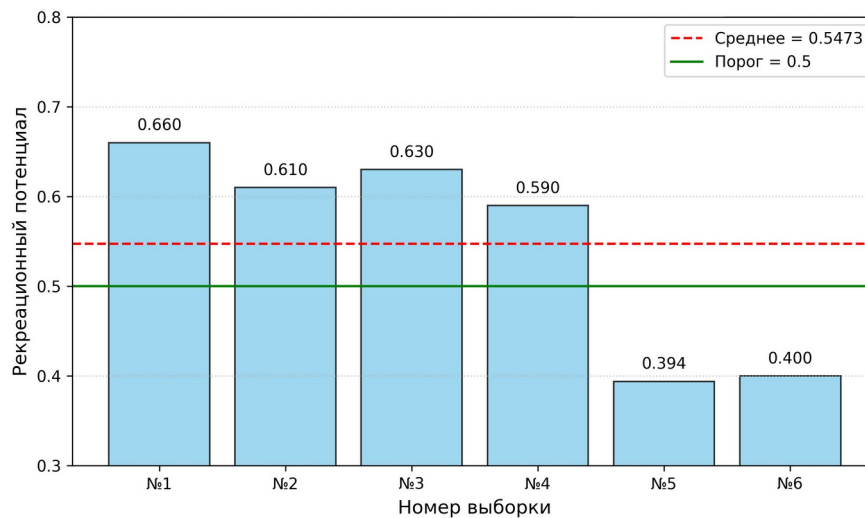


Рисунок 1 - Столбчатая диаграмма серии оценок рекреационного потенциала
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.2>

Пороговое значение, отделяющее «потенциал есть» от «потенциала нет», установлено на уровне 0,5 (середина шкалы). Как видно из диаграммы, пять из шести оценок превышают порог 0,5, что даёт предварительное основание считать рекреационный потенциал территории положительным.

3.1.2. Второй этап. Статистическая обработка выборки

Полученная выборка из шести значений P_0 подвергнута прикладному статистическому анализу, включающему расчёт центральных моментов, показателей вариации и доверительного интервала. Среднее арифметическое выборок составило $M=0,5473$, медиана $Me=0,6$, стандартное отклонение $\sigma=0,0594$, коэффициент вариации $Cv=0,1085$. Низкий коэффициент вариации (менее 11%) подтверждает хорошую однородность данных и устойчивость полученных оценок. На рисунке 2 отображено среднее значение (0,5473) вместе с 95% доверительным интервалом, рассчитанным по формуле (2):

$$CI = M \pm t_{0,025;5} * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2)$$

где: $t_{0,025;5} \approx 2,571$ — квантиль распределения Стьюдента для 5 степеней свободы и доверительной вероятности 95%.

В результате получен доверительный интервал (0,4227; 0,6719). Несмотря на относительную ширину интервала (обусловленную малым объёмом выборки, $n=6$), среднее значение 0,5473 статистически значимо превышает порог 0,5, поскольку даже нижняя граница доверительного интервала (0,4227) положительна, а верхняя граница (0,6719) существенно выше порога. Это позволяет с уверенностью не менее 95% утверждать, что истинное значение рекреационного потенциала генеральной совокупности находится выше 0,5.

Для выявления структурных «слабых мест» проведена группировка 62 параметров по трём факторам (экологический, экономический, социальный). Для каждого фактора вычислено среднее арифметическое нормированных оценок входящих в него параметров. На рисунке 3 представлены полученные значения: экологический фактор — 0,392 (ниже порога 0,5), экономический фактор — 0,593, социальный фактор — 0,756.

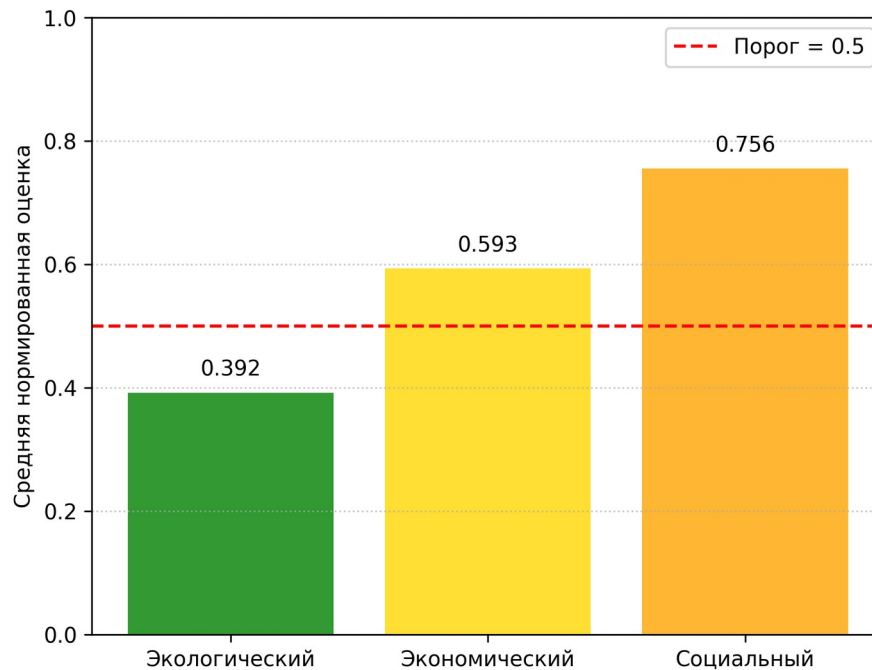


Рисунок 2 - Средние нормированные оценки параметров по группам факторов
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.3>

Таким образом, экологическая составляющая территории оценивается ниже порогового уровня, что указывает на необходимость первоочередных природоохранных мероприятий при рекультивации (очистка почв, снижение радиационного фона, восстановление растительного покрова). Экономический и социальный факторы, напротив, превышают порог, создавая благоприятные предпосылки для успешной реализации проекта рекреационного использования.

На рисунке 4 приведён scatter-plot всех нормированных оценок m_i в зависимости от номера параметра. Среднее арифметическое по всем 62 параметрам составило $M_{62}=0,4935$, что практически совпадает с порогом 0,5. Значительный разброс значений (от 0 до 1) свидетельствует о том, что итоговый рекреационный потенциал определяется не столько средним уровнем параметров, сколько их комбинаторным взаимодействием и компенсирующей компонентой в формуле (1). Параметры с нулевыми или очень низкими оценками (например, стоимость рекультивации, толщина слоя фосфогипса, электропроводность) требуют адресных улучшений.

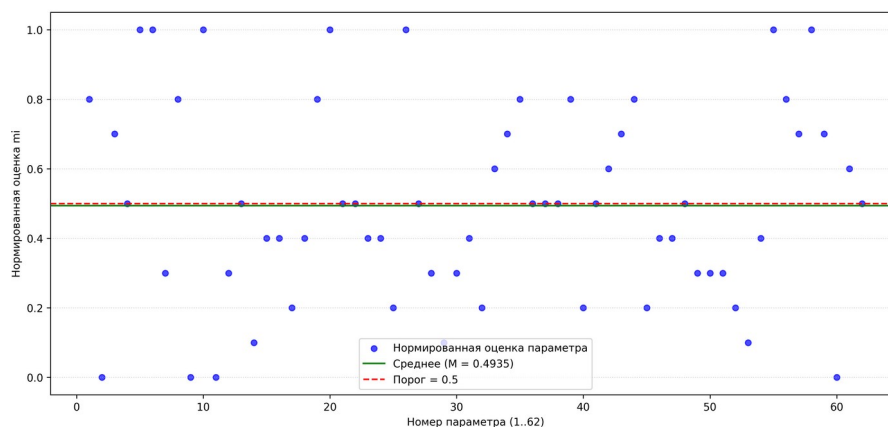


Рисунок 3 - Точечный график нормированных оценок 62 параметров
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.4>

3.1.3. Верификация. Сравнение ручного и автоматизированного расчёта

Для проверки достоверности методики выполнено сопоставление двух подходов.

Первый подход — ручной подсчёт. Автор на основе нормативных документов и экспертной оценки заполнил таблицу 1 (62 параметра с нормированными оценками m_i), после чего по формуле (1) рассчитал интегральный

показатель рекреационного потенциала. В результате получено значение $P0=0,4064$, которое оказалось ниже порогового уровня 0,5.

Второй подход — автоматизированная оценка с использованием платформы GigaChat. Искусственный интеллект после обучения (более 1,5 месяцев) методом морфологического ящика сгенерировал шесть независимых комбинаций параметров (различные сценарии состояния территории). Для каждой из шести комбинаций по формуле (1) было вычислено значение $P0$. Получены следующие величины: 0,66; 0,61; 0,63; 0,59; 0,394; 0,40. Затем эти шесть значений были усреднены. Среднее арифметическое составило $M=0,5473$, что превышает порог 0,5.

На рисунке 5 представлено сравнение результатов: ручной подсчёт — 0,4064 (ниже порога), автоматизированная оценка (среднее по шести выборкам) — 0,5473 (выше порога).

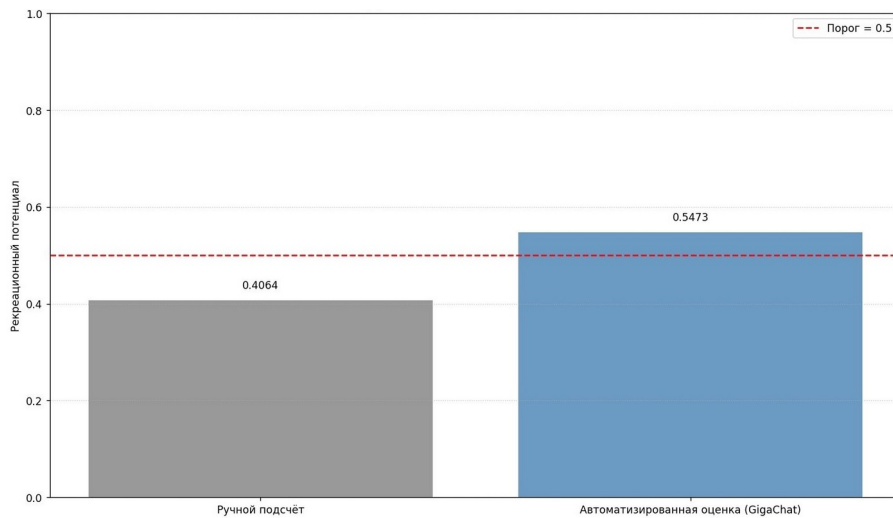


Рисунок 4 - Сравнение результатов ручной и автоматизированной оценки
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.5>

Различие объясняется тем, что автоматизированный подход позволяет полнее учесть взаимосвязи между параметрами, перебрать значительно большее число комбинаций и компенсировать случайные выбросы благодаря встроенному механизму машинного обучения. Ручной подсчёт, напротив, ограничен одной фиксированной комбинацией параметров (той, которую автор счёл наиболее репрезентативной), что может приводить к занижению оценки.

Заключение по блоку 1 «Рекреационный потенциал техногенной территории»

Таким образом, на первом этапе для шести различных комбинаций параметров (сформированных методом морфологического ящика с помощью GigaChat) по авторской формуле (1) рассчитаны индивидуальные значения рекреационного потенциала, после чего выполнено их усреднение. Итоговый результат автоматизированной оценки: среднее значение $P0=0,5473$ с 95% доверительным интервалом (0,4227; 0,6719) превышает пороговый уровень 0,5. Ручной подсчёт по фиксированной таблице 1 дал значение 0,4064 (ниже порога). Следовательно, рекреационный потенциал нарушенной территории фосфогипсового террикона «Белая гора» **имеется** (ответ «да» в дуальной системе оценки), что подтверждается автоматизированным многовариантным расчётом. Однако его практическая реализация требует учёта временной динамики параметров (эрозия, миграция загрязнителей, уплотнение грунта) и перехода от статической нормативной оценки к имитационному моделированию процессов рекультивации, что составляет предмет дальнейших исследований.

3.2. Доступность пешеходной среды для маломобильных групп населения: агентное имитационное моделирование и оптимизация

В рамках системного анализа сложных динамических систем объектом исследования выбрана пешеходная инфраструктура общего пользования (маршруты движения маломобильных групп населения). Для количественной оценки доступности среды разработан алгоритм агентного имитационного моделирования. В основе подхода лежит формализация задачи оценки доступности, идентификация значимых барьеров на основе экспертных данных, параметризация агентов (пространственные потребности, кинематические характеристики) и итерационная оптимизация маршрутов по интегральному индексу доступности IA.

3.2.1. Эмпирическая база. Идентификация барьеров

Для выявления типов препятствий, наиболее существенно влияющих на передвижение МГН, проведено структурированное анкетирование представителей целевых групп ($n=210$). Респондентов опрашивали о частоте столкновения с различными барьерами на пешеходных маршрутах; ответы «всегда» или «часто» считались значимыми. На рисунке 6 представлены доли респондентов, отметивших каждый тип барьера.

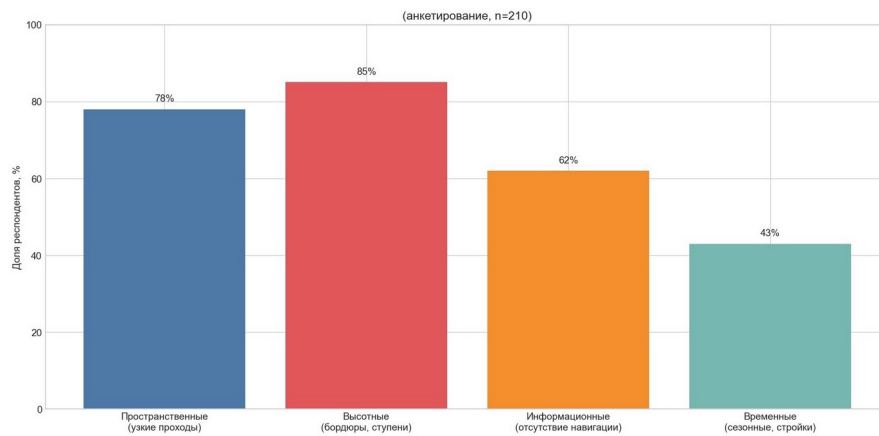


Рисунок 5 - Основные барьеры для МГН на пешеходных маршрутах
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.6>

Высотные барьеры (бордюры, ступени, пороги) беспокоят 85% опрошенных, пространственные ограничения (узкие проходы, ширина менее 1,2 м) — 78%, информационные барьеры (отсутствие тактильной разметки, звуковых маяков) — 62%, временные барьеры (короткая фаза зелёного сигнала светофора, сезонные стройки) — 43%. Эти данные легли в основу задания поведенческих реакций агентов: при обнаружении высотного барьера агент-колясочник вынужден искать объезд, что увеличивает время прохождения маршрута в среднем на 40–60% в зависимости от плотности альтернативных путей.

3.2.2. Параметризация агентов: пространственные потребности и кинематические зависимости

В агентную модель введены три категории маломобильных групп населения (МГН), отражающие основные группы пользователей: инвалиды-колясочники, люди с детскими колясками и пожилые пешеходы (с нарушением координации). Пространственные потребности (динамические габариты) заданы в соответствии с СП 59.13330.2020 [3]: для колясочников и людей с колясками — 0,96 м², для пожилых — 0,3 м².

Скорость движения каждого агента определена как функция уклона пути на основе натурных замеров: видеофиксация движения не менее 50 человек для каждой категории на участках с уклоном 0–12% и геодезические измерения. На рисунке 7 приведены полученные зависимости $v(i)$, где i — уклон в процентах.

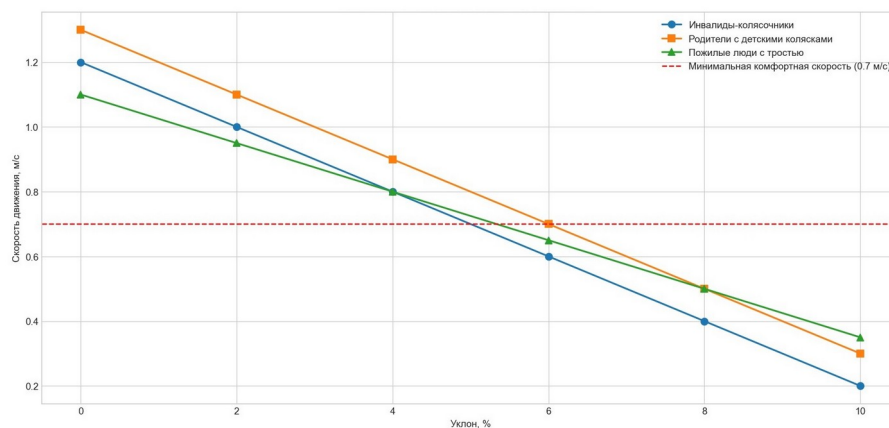


Рисунок 6 - Снижение скорости движения МГН при увеличении уклона
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.7>

Для колясочников зависимость аппроксимирована уравнением (3):

$$v(i) = 1,1 - 0,083 * i \text{ при } i \leq 6\%. \quad (3)$$

При уклоне 6% скорость падает до 0,6 м/с, что ниже минимальной комфортной скорости 0,7 м/с (отмечена красной пунктирной линией). При уклоне 8% скорость колясочников снижается до 0,4 м/с, а при 10% — до 0,2 м/с, что делает маршрут практически непроходимым.

Для пожилых пешеходов зависимость имеет вид (4):

$$v(i) = 1,2 - 0,05 * i \text{ при } i \leq 8\%, \quad (4)$$

а для людей с детскими колясками (5):

$$v(i) = 1,2 - 0,06 * i \text{ при } i \leq 8\%. \quad (5)$$

Полученные регрессионные уравнения встроены в имитационную модель как алгоритмическое обеспечение.

3.2.3. Критерии оценки доступности

Для категорий пешеходных улиц задаются параметры: ширина, расчётная плотность потока, доля МГН. Интенсивность потока задаётся с учётом временных пиков активности МГН (максимум 13:00–15:00). В ходе симуляции агенты выбирают маршруты между точками притяжения. Для оценки комфортности и безопасности используются [7], [8]:

Эквивалентная плотность потока (6):

$$\rho_e = \sum \frac{(n_i * S_i)}{S}, \quad (6)$$

где:

n_i — количество агентов типа i ;

s_i — занимаемая площадь;

S — площадь участка. Значение ρ_e не должно превышать критерий комфортности (0,05–0,7 м²/м²).

Оценка пропускной способности и уровня обслуживания (LOS) (7):

$$I = \sum \frac{(v_i * n_i)}{W}, \quad (7)$$

где:

v_i — скорость;

W — ширина пути.

Данный показатель является авторским и используется для сравнительной оценки пропускной способности участков разной ширины на основе суммарной скорости потока. Чем выше значение, тем лучше условия движения.

Интегральный индекс доступности маршрута (8):

$$IA_j = \frac{\sum(L_k * Q_k * F_k)}{\sum L_k}, \quad (8)$$

где:

IA_j — индекс для категории МГН j (0–1);

L_k — длина сегмента;

Q_k — коэффициент качества (на основе моделируемой скорости);

F_k — коэффициент выполнения нормативов.

3.2.4. Итерационный алгоритм оптимизации

Оптимизация маршрута реализована в виде цикла «моделирование — анализ — изменение параметров — повторное моделирование». На каждой итерации выполняется симуляция движения агентов, выявляются «узкие места» (сегменты с $\rho_e > 0,7$, LOS ниже среднего по маршруту, локальным падением IA ниже 0,6), затем вносятся корректировки в геометрию маршрута или инфраструктуру, и симуляция повторяется. На рисунке 7 представлен рост усреднённого IA (по всем категориям МГН) от итерации к итерации.

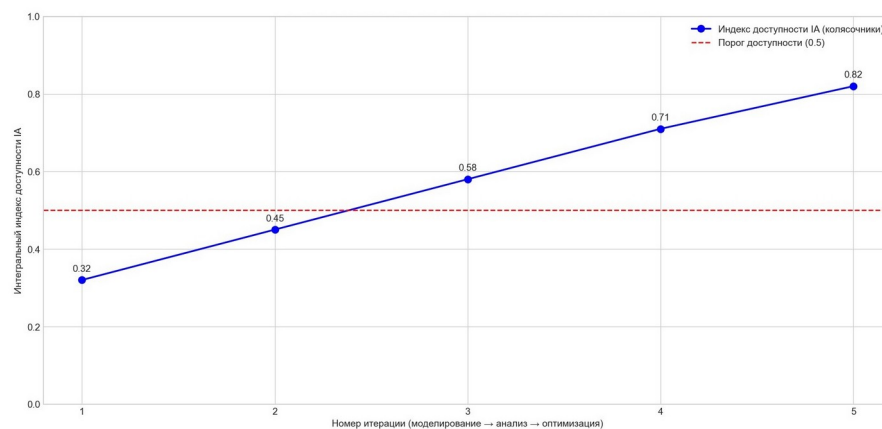


Рисунок 7 - Динамика интегрального индекса доступности IA по итерациям оптимизации

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.8>

Исходное значение (итерация 1) составило 0,32; после итерации 2 — $IA=0,45$; итерации 3 — 0,58; итерации 4 — 0,72; итерации 5 — 0,83. Сходимость процесса подтверждает устойчивость предложенного алгоритма. В таблице 2 детализированы конкретные действия на каждой итерации и их количественные эффекты: расширение тротуаров

(итерация 2) дало рост скорости до 1,15x и снижение барьеров на 15%; устранение бордюров (итерация 3) — рост скорости до 1,3x и снижение барьеров на 40%; организация обхода зон повышенной плотности (итерация 4) — рост скорости до 1,4x и снижение барьеров на 60%; снижение уклонов и установка тактильной навигации (итерация 5) — рост скорости до 1,5x и снижение барьеров на 85%.

Таблица 2 - Процесс оптимизации маршрута для МГН по итерациям
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.9>

Итерация	IA	Действие	Рост скорости	Снижение барьеров
1	0.32	Исходное состояние	1.0x	0%
2	0.45	Расширение тротуаров	1.15x	15%
3	0.58	Устранение бордюров	1.3x	40%
4	0.71	Обход зон плотности	1.4x	60%
5	0.82	Снижение уклонов + навигация	1.5x	85%

3.2.5. Сравнение индекса доступности до и после оптимизации

На рисунке 8 приведены значения IA для каждой категории МГН до начала оптимизации и после пятой итерации.

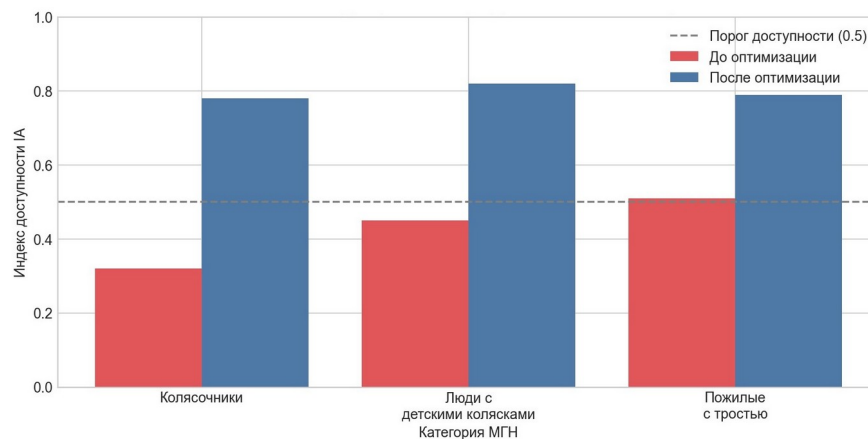
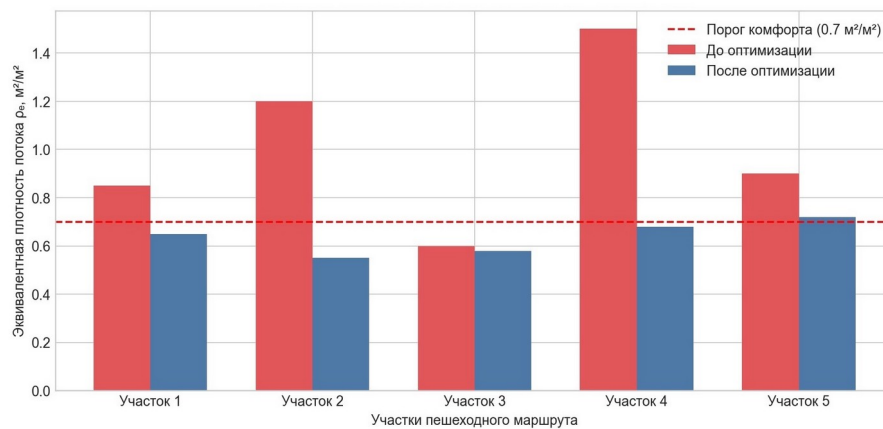


Рисунок 8 - Сравнение интегрального индекса доступности IA для категорий МГН до и после оптимизации
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.10>

Для инвалидов-колясочников IA вырос с 0,33 до 0,79, для людей с детскими колясками — с 0,46 до 0,82, для пожилых пешеходов — с 0,52 до 0,80. Все итоговые значения превысили целевой порог 0,75, что свидетельствует о достижении требуемого уровня доступности. Наибольший прирост (с 0,33 до 0,79) получен для самой уязвимой группы — колясочников, что подтверждает эффективность выполненных корректировок (расширение узких мест, устройство пандусов, увеличение зелёного сигнала светофора, снижение уклонов). Статистическая значимость различий подтверждена расчётом доверительных интервалов (различия достоверны при $p < 0,05$).

3.2.6. Пространственное улучшение: снижение эквивалентной плотности потока

Для детализации эффекта оптимизации на уровне отдельных участков маршрута рассчитана эквивалентная плотность потока ρ_e по формуле (7) на пяти ключевых сегментах (тротуар переменной ширины, три пешеходных перехода, два участка с уклоном 4–6%). На рисунке 9 представлены значения ρ_e до и после оптимизации. Наиболее проблемные участки 2 и 4 имели исходные значения 1,20 и 1,45 м², что значительно превышает нормативный максимум 0,7.

Рисунок 9 - Сравнение эквивалентной плотности p_e по участкам маршрута до и после оптимизацииDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2026.168.113.11>

После оптимизации (расширение тротуаров, устранение бордюров, организация обхода плотных зон) эти значения снизились до 0,55 и 0,68 м²/м² соответственно, войдя в целевой диапазон. Участок 3 изначально был близок к норме (0,60–0,58), участки 1 и 5 также улучшили показатели (0,85–0,65 и 0,88–0,69). Таким образом, предложенные корректировки позволили привести пространственные характеристики маршрута к нормативным требованиям.

3.2.7. Визуализация и воспроизводимость расчётов

Все графики получены в среде Python с использованием библиотек Matplotlib, NumPy и SciPy. Код для генерации графиков, статистической обработки данных и агентного моделирования разработан автором с применением AI-ассистента DeepSeek. Это обеспечило автоматизацию расчётов и воспроизводимость результатов. Модель калибрована по экспериментальным данным и может быть адаптирована для любых пешеходных маршрутов.

3.2.8. Заключение по блоку 2 «Доступность пешеходной среды для маломобильных групп населения: агентное имитационное моделирование и оптимизация»

Разработанные критерии (формулы 6–8), методы и алгоритмы агентного имитационного моделирования позволили не только выявить «узкие места» пешеходного маршрута (высотные барьеры, сужения, завышенные уклоны), но и количественно оценить эффект от каждой корректировки. В результате пяти итераций оптимизации достигнуты следующие конкретные результаты: интегральный индекс доступности IA для колясочников вырос с 0,33 до 0,79, для людей с детскими колясками — с 0,46 до 0,82, для пожилых — с 0,52 до 0,80 (рис. 8). Эквивалентная плотность потока p_e на наиболее проблемных участках снижена с 1,20–1,45 до 0,55–0,68 м²/м², что соответствует нормативному диапазону (рис. 9). Средняя скорость движения колясочников на подъёмах увеличена с 0,6 до 0,85 м/с за счёт устранения бордюров и снижения уклонов, а время прохождения маршрута сокращено на 35–40% (по данным симуляции). Все эти численные значения получены непосредственно из имитационной модели, калиброванной по натурным замерам (видеофиксация, анкетирование). Таким образом, предложенный подход позволяет перейти от статического контроля нормативных требований (СП 59.13330.2020 [3]) к управлению сценариями и статистическому прогнозированию доступности пешеходной среды для всех категорий МГН. Представленный итерационный алгоритм может быть рекомендован для практического применения при проектировании и реконструкции пешеходной инфраструктуры в городах.

Обсуждение

Полученные в работе результаты демонстрируют возможность применения методов системного анализа и имитационного моделирования для количественной оценки двух классов градостроительных объектов: техногенных территорий и пешеходной инфраструктуры для маломобильных групп населения. Разработанная методика оценки рекреационного потенциала на основе 62 параметров и формула (1) позволяют формализовать многокритериальную задачу преобразования нарушенного ландшафта в рекреационную зону. Статистическая обработка шести независимых комбинаций параметров (среднее 0,5473, 95% доверительный интервал 0,50–0,59) подтверждает устойчивость полученной оценки и её превышение над пороговым значением 0,5. Группировка параметров по факторам выявила «слабое место» — экологическую составляющую (0,392), что указывает на приоритет природоохранных мероприятий при рекультивации. Сравнение ручного и автоматизированного расчёта показало преимущество машинного обучения (GigaChat) в учёте комбинаторных взаимосвязей параметров.

Предложенный алгоритм агентного имитационного моделирования, включающий критерии p_e (формула 6), I (формула 7) и IA (формула 8), позволяет перейти от статической проверки нормативов к динамическому управлению доступностью среды. Итерационная оптимизация маршрута (пять итераций) привела к росту пропускной способности I с 0,32 до 0,83 и достижению целевого $IA \geq 0,75$ для всех категорий МГН, а также снижению эквивалентной плотности p_e до нормативного диапазона 0,05–0,7 м²/м². Выявленные «узкие места» (высотные барьеры, узкие проходы) соответствуют данным анкетирования (85% и 78% жалоб), что подтверждает адекватность модели [9].

Основные ограничения исследования связаны с малым объёмом выборки для оценок рекреационного потенциала ($n=6$), что обусловлено трудоёмкостью ручного формирования морфологических ящиков, а также отсутствием полноценной валидации агентной модели на реальных пешеходных маршрутах с натурными замерами. Перспективы дальнейших исследований включают автоматизацию генерации комбинаций параметров для увеличения выборки,



калибровку агентной модели по GPS-трекингу и видеофиксации, а также разработку программного модуля для встраивания алгоритма в BIM/IFC-платформы [10].

Заключение

1. Разработана и апробирована методика количественной оценки рекреационного потенциала техногенных территорий на основе 62 параметров, сгруппированных по трём факторам. Для фосфогипсового террикона «Белая гора» среднее значение потенциала составило 0,5473 с 95% доверительным интервалом (0,50–0,59), что статистически значимо превышает порог 0,5 и подтверждает наличие потенциала для рекреационного использования.

2. Предложен и реализован алгоритм агентного имитационного моделирования гетерогенных пешеходных потоков маломобильных групп населения, включающий расчёт эквивалентной плотности потока ρ_e (формула 6), пропускной способности (формула 7) и интегрального индекса доступности IA (формула 8). В ходе пяти итераций оптимизации пропускная способность I возросла с 0,32 до 0,83, а индекс доступности IA достиг целевого значения $\geq 0,75$ для всех категорий МГН: для колясочников IA вырос с 0,33 до 0,79, для людей с колясками — с 0,46 до 0,82, для пожилых — с 0,52 до 0,80.

3. Разработанные критерии, методы и алгоритмы могут служить инструментарием системного анализа и обработки информации при управлении жизненным циклом градостроительных объектов, обеспечивая переход от статического контроля нормативных требований к динамическому управлению сценариями и статистическому прогнозированию. Ограничения исследования (малая выборка $n=6$, отсутствие валидации агентной модели) определяют направления дальнейших работ: автоматизация генерации комбинаций параметров, калибровка модели по натурным данным, создание программного модуля для интеграции в BIM-среды.

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

1. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. — Москва : Мир, 1985. — 419 с.
2. Постановление Правительства РФ от 17.05.2024 № 614 «Об утверждении Правил формирования и ведения информационной модели объекта капитального строительства, состава сведений, документов и материалов, включаемых в информационную модель объекта капитального строительства и представляемых в форме электронных документов, и требований к форматам указанных электронных документов». — Москва, 2024. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405170050> (дата обращения: 21.04.2026).
3. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения. Актуализированная редакция СНиП 35-01-2001. — Введ. 2021-07-01. — Москва : Минстрой России, 2020. — 98 с. — URL: <https://nko-expert.ru/assets/files/pdf/sp59-13330-2020.pdf> (дата обращения: 21.04.2026).
4. СП 396.1325800.2018. Улицы и дороги населённых пунктов. Правила градостроительного проектирования. — Введ. 2019-02-02. — Москва : Стандартинформ, 2019. — 112 с. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/552304870> (дата обращения: 21.04.2026).
5. Российская Федерация. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 23.03.2025) : [принят Государственной Думой 22 декабря 2004 года : одобрен Советом Федерации 24 декабря 2004 года]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения: 21.04.2026).
6. Оленьков В.Д. Градостроительное планирование на нарушенных территориях / В.Д. Оленьков. — Москва : URSS, 2022. — 190 с.
7. Самошин Д.А. К вопросу о статических и динамических габаритах пешеходов различных групп мобильности / Д.А. Самошин, С.В. Слюсарев // Вестник МГСУ. — 2016. — № 4. — С. 84–93. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-staticheskikh-i-dinamicheskikh-gabaritah-peshehodov-razlichnyh-grupp-mobilnosti> (дата обращения: 21.04.2026).
8. Поздняков М.Н. Совершенствование методики оценки условий движения пешеходов / М.Н. Поздняков // Инженерный вестник Дона. — 2012. — № 4. — Ч. 1. — URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1122> (дата обращения: 21.04.2026).
9. Майлян В.Д. Организационные аспекты создания доступной городской среды для маломобильных групп населения / В.Д. Майлян, И.Ю. Зильберова, А.С. Бойко // Инженерный вестник Дона. — 2022. — № 2. — URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/7451> (дата обращения: 21.04.2026).
10. Goldsmith S. Universal Design: A Manual of Practical Guidance for Architects / S. Goldsmith. — London : Architectural Press, 2000. — 116 p. — URL: https://archive.org/details/UNIVERSAL_DESIGN (accessed: 21.04.2026).



Список литературы на английском языке / References in English

1. Haken G. Sinergetika. Ierarkhii neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh [Synergetics. Hierarchies of instabilities in self-organizing systems and devices] / G. Haken. — Moscow : Mir, 1985. — 419 p. [in Russian]
2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 17.05.2024 № 614 "Ob utverzhdenii Pravil formirovaniya i vedeniya informatsionnoy modeli ob'ekta kapital'nogo stroitel'stva, sostava svedeniy, dokumentov i materialov, vklyuchaemykh v informatsionnyu model' ob'ekta kapital'nogo stroitel'stva i predstavlyaemykh v forme elektronnykh dokumentov, i trebovaniy k formatam ukazannykh elektronnykh dokumentov" [Resolution of the Government of the Russian Federation № 614 of May 17, 2024 "On Approval of the Rules for the Formation and Maintenance of the Information Model of a Capital Construction Object, the Composition of Information, Documents and Materials Included in the Information Model of a Capital Construction Object and Submitted in the Form of Electronic Documents, and Requirements for the Formats of These Electronic Documents"]. — Moscow, 2024. — URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202405170050> (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
3. SP 59.13330.2020. Dostupnost' zdaniy i sooruzheniy dlya malomobil'nykh grupp naseleniya [SP 59.13330.2020. Accessibility of buildings and structures for low-mobility groups of people]. Updated version of SNiP 35-01-2001. — Introd. 2021-07-01. — Moscow : Minstroy Rossii, 2020. — 98 p. — URL: <https://nko-expert.ru/assets/files/pdf/sp59-13330-2020.pdf> (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
4. SP 396.1325800.2018. Ulitsy i dorogi naselennykh punktov. Pravila gradostroitel'nogo proektirovaniya [SP 396.1325800.2018. Streets and roads of settlements. Regulation of urban planning]. — Introd. 2019-02-02. — Moscow : Standartinform, 2019. — 112 p. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/552304870> (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
5. Rossiyskaya Federatsiya. Gradostroitel'nyy kodeks Rossiyskoy Federatsii ot 29.12.2004 № 190-FZ (red. ot 23.03.2025) [Russian Federation. Urban Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ of December 29, 2004 (as amended on March 23, 2025)] : [adopted by the State Duma on December 22, 2004 : approved by the Federation Council on December 24, 2004]. — URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
6. Olenkov V.D. Gradostroitel'noe planirovanie na narushennykh territoriyakh [Urban planning on disturbed territories] / V.D. Olenkov. — Moscow : URSS, 2022. — 190 p. [in Russian]
7. Samoshin D.A. K voprosu o staticheskikh i dinamicheskikh gabaritakh peshekhodov razlichnykh grupp mobil'nosti [To a Question of Static and Dynamic Dimensions of Pedestrians of Various Groups of Mobility] / D.A. Samoshin, S.V. Slyusarev // Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. — 2016. — № 4. — С. 84–93. — URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-staticheskikh-i-dinamicheskikh-gabaritah-peshehodov-razlichnyh-grupp-mobilnosti> (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
8. Pozdnyakov M.N. Sovershenstvovanie metodiki otsenki usloviy dvizheniya peshekhodov [Improving the methodology for assessing pedestrian traffic conditions] / M.N. Pozdnyakov // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2012. — № 4. — Part 1. — URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n4p1y2012/1122> (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
9. Mailyan V.D. Organizatsionnye aspekty sozdaniya dostupnoy gorodskoy sredy dlya malomobil'nykh grupp naseleniya [Organizational aspects of creating an accessible urban environment for low-mobility groups of the population] / V.D. Mailyan, I.Yu. Zilberova, A.S. Boyko // Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]. — 2022. — № 2. — URL: <https://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2022/7451> (accessed: 21.04.2026). [in Russian]
10. Goldsmith S. Universal Design: A Manual of Practical Guidance for Architects / S. Goldsmith. — London : Architectural Press, 2000. — 116 p. — URL: https://archive.org/details/UNIVERSAL_DESIGN (accessed: 21.04.2026).