

УДК 69:504.064.2:504.75.06:004.942

Н. С. Рудь^а, П. В. Шишкина^б, В. И. Теличенко^б

^а ООО «Нью иммо сервисиз»

^б Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

ОЦЕНКА УРОВНЯ КОМФОРТНОСТИ СРЕДЫ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ: ПОДХОД К ВЫБОРУ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ КОМФОРТНОСТИ

Авторы решают задачу формирования системы факторов, которые влияют на комфортность среды жизнедеятельности административных зданий, их классификации и структурирования, а также задачу выделения из всего множества факторов наиболее значимых. В статье впервые на массиве эмпирических данных пользовательских оценок комфортности среды жизнедеятельности административных зданий ($n = 843$) осуществлен комплексный статистический отбор факторов, определяющих восприятие комфортности среды жизнедеятельности. Используемая методика сочетает множественную регрессию с последовательным исключением переменных, k -кратную кросс-валидацию и бутстрэп-анализ, что позволило выделить устойчивую пятерку наиболее значимых факторов для дальнейшего моделирования системы нечеткого вывода и многоканальной нейронной сети.

К л ю ч е в ы е с л о в а: комфортная среда жизнедеятельности, уровень комфорта, здоровьесбережение, экологическая безопасность, «зеленое» строительство, устойчивое развитие, экологическая безопасность.

Введение

Современный этап развития общества характеризуется интенсивной урбанизацией, повышением мобильности населения и трансформацией представлений о качестве среды жизнедеятельности (СЖ) [1]. Значительную часть времени человек проводит внутри зданий, что актуализирует проблему создания не просто функциональных, но и комфортных пространств, способствующих сохранению физического и психологического здоровья и повышению производительности труда [1]. Задача формирования комфортной и безопасной СЖ декларируется на различных уровнях, включая государственные программы и национальные проекты [1]. Однако ее практическое решение сопряжено с рядом трудностей, обусловленных отсутствием устоявшегося понятийного аппарата, формализованных критериев «комфортности» и «комфортной среды», а также методик их комплексной оценки, учитывающих как объективные параметры среды, так и субъективное восприятие пользователей [4].

В этом контексте концепция биопозитивности, предложенная А. Н. Тетиором и подразумевающая гармоничное взаимодействие строительных объектов с окружающей средой и улучшение качества жизни пользователей, приобретает особую значимость [5]. Эффективное управление биопозитивностью требует разработки и внедрения методик оценки, которые были бы не только точными, но и интерпретируемыми, позволяя принимать обоснованные проектные и эксплуатационные решения.

Исследования в области оценки качества внутренней среды (Indoor Environmental Quality, IEQ) и комфорта пользователей активно развиваются

на протяжении последних десятилетий. Значительный вклад в данную область внесли работы, посвященные разработке и применению методик оценки после заселения (Post-Occupancy Evaluation, POE) [6] и оценки эффективности зданий (Building Performance Evaluation, BPE) [7]. Ведущие международные исследовательские группы, в частности, научный коллектив Центра по изучению искусственной среды Калифорнийского университета в Беркли, разработал и апробировал комплексную методику POE — CBE Occupant IEQ Survey [8], а группа исследователей из Сиднейского университета — методику BOSSA (Building Occupants Survey System Australia) [9]. Данные методики предназначены для анализа больших массивов данных о пользовательском восприятии СЖ. В указанных работах указ широко применяются статистические методы, такие как анализ главных компонент (РСА) и иерархический кластерный анализ (НСА), для выявления латентной структуры данных и сокращения размерности факторного пространства [10, 11]. Эти подходы позволяют агрегировать множество исходных переменных в меньшее число обобщенных компонент или кластеров, объясняющих значительную долю дисперсии в данных. В более ранних исследованиях изучались нелинейные взаимосвязи между отдельными факторами СЖ и общей удовлетворенностью пользователей с использованием модели Кано [12]. Однако, несмотря на очевидные достоинства, существующие подходы обладают определенными ограничениями. Так, методы РСА и НСА, являясь эффективными инструментами для выявления общих паттернов, часто приводят к формированию компонент, представляющих собой линейные комбинации исходных переменных, что затрудняет их прямую физическую интерпретацию и, как следствие, разработку конкретных инженерных или управленческих рекомендаций. Модель Кано, хотя и учитывает асимметрию влияния факторов, в своей классической реализации не всегда обеспечивает возможность количественного прогнозирования удовлетворенности на основе измеряемых инженерных параметров и не интегрирована с методами сокращения размерности в последующих работах упомянутых исследовательских групп. Таким образом, определена научная проблема, заключающаяся в недостатке методик, которые бы позволяли одновременно эффективно сокращать размерность данных, сохраняя при этом ясный физический смысл отобранных факторов, и обеспечивали бы основу для последующего точного количественного прогнозирования пользовательского восприятия уровня комфортности СЖ с учетом нелинейного и субъективного характера.

Научной задачей в настоящей работе является разработка и апробация методологического подхода к отбору факторов СЖ, который, с одной стороны, обеспечивал бы статистическую строгость и объективность, а с другой — сохранял интерпретируемость результатов для их практического использования в задачах проектирования, эксплуатации и модернизации гражданских зданий.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в последовательном применении инструментов математической статистики и машинного обучения для идентификации факторов комфортности на основе большой выборки пользовательских оценок. Более того, данный подход целенаправленно решает проблему потери интерпретируемости, свойственную методам, основанным на РСА/НСА, т. к. множественная линейная регрессия (МЛР)

позволяет отбирать исходные факторы, сохраняя их прямой физический и инженерный смысл. Это критически важно для последующего построения нелинейных моделей, таких как многоканальные нейронные сети (ММО), где правила нечеткого вывода будут оперировать реальными, измеримыми параметрами среды, а не абстрактными компонентами. Практическая значимость определяется возможностью использования разработанной методики отбора факторов для поддержки принятия решений на этапах проектирования и эксплуатации зданий, направленных на формирование комфортной СЖ, а также для планирования опережающего повышения уровня комфортности СЖ перед модернизацией объектов.

Материалы и методы

Исходный перечень из 36 факторов (от F1 до F36), влияющих на восприятие уровня комфортности СЖ гражданских зданий, определен на основе анализа научно-технической литературы. Этот анализ включал международные зеленые стандарты¹, результаты научных исследований [13—17] и апробированных методик РОЕ [8, 9, 18—20]. Перечень факторов расширен с учетом специфики проектирования и эксплуатации административных зданий, что позволило охватить максимально широкий спектр возможных воздействий. Таким образом, в состав системы факторов, определяющих уровень комфортности СЖ гражданских зданий вошли следующие группы:

I. Группа факторов, определяющих параметры климатических условий прилегающих к зданию территорий:

- F1. Температура наружного воздуха.
- F2. Уровень шума на прилегающей территории.
- F3. Качество воздуха на прилегающей территории.
- F4. Скорость ветра на прилегающей территории.
- F5. Световой климат местности.
- F6. Количество и частота осадков.
- F7. Озеленение прилегающей территории.
- F8. Вертикальное/горизонтальное озеленение здания.

II. Группа факторов, определяющих пространственный комфорт:

F9. Объем пространства, доступный для работы (жизнедеятельности) и хранения вещей.

F10. Легкость взаимодействия с коллегами в офисном пространстве (легкость перемещения по квартире).

- F11. Уровень визуальной приватности.
- F12. Возможность изменения планировочного решения.

III. Группа факторов, определяющих эргономику мебели/рабочего места:

- F13. Комфортность офисной мебели.
- F14. Возможностью настраивать мебель.

IV. Группа факторов, определяющих удовлетворенностью отделкой помещения:

F15. Качество отделочных материалов (выделение формальдегида и прочих ЛОС).

¹ The WELL Building Standard v1 with May 2016 addenda. URL: <https://standard.wellcertified.com/sites/default/files/The%20WELL%20Building%20Standard%20v1%20with%20May%202016%20addenda.pdf>.

F16. Цвета и текстуры напольных покрытий, мебели и отделки поверхностей.

V. Группа факторов, определяющих визуальный комфорт:

F17. Качество естественного освещения (блики, отражения, контраст).

F18. Уровень естественного освещения (уровень освещенности).

F19. Уровень искусственного освещения.

F20. Качество искусственного освещения (пульсация, цветопередача).

F21. Возможностью индивидуального управления освещенностью.

VI. Группа факторов, определяющих акустический комфорт:

F22. Уровень шума работы инженерного оборудования.

F23. Уровень ударного шума.

F24. Уровень проникающего воздушного шума.

F25. Уровень конфиденциальности в рабочем пространстве (возможность вести разговоры так, чтобы их не подслушивали соседи, и вы не слышали их разговоры).

VII. Группа факторов, определяющих тепловой комфорт:

F26. Температура воздуха.

F27. Влажность воздуха.

F28. Возможностью индивидуального управления температурой и/или влажностью воздуха.

VIII. Группа факторов, определяющих качество воздуха:

F29. Качество воздуха на рабочем месте (т. е. душный/несвежий воздух, чистота, запахи).

F30. Кратность воздухообмена.

F31. Распределение воздушных масс в помещении (сквозняки).

IX. Качество воды:

F32. Качество питьевой воды.

F33. Доступность кулеров/фонтанчиков с питьевой воды.

X. Эксплуатация здания:

F34. Чистота здания в целом.

F35. Качество уборки рабочего места.

F36. Уровень эксплуатации здания.

Эмпирическая база исследования сформирована на основе анкетирования 843 респондентов — пользователей 11 административных зданий, расположенных в г. Москве. В качестве респондентов выступили практикующие специалисты в области проектирования и строительства зданий и сооружений. В рамках опроса респондентам предложены 36 вопросов, каждый из которых соответствует факторам комфортности СЖ, полученным на основании анализа литературы, а также один обобщающий вопрос, в котором необходимо было оценить уровень комфортности здания, где респонденты находятся. Оценка по каждому фактору производилась по семибалльной шкале, соответствующей вербальным суждениям от «абсолютно дискомфортно» до «абсолютно комфортно». Суждения были закодированы на оценочной шкале Лайкерта от –3 (абсолютно дискомфортно) до +3 (абсолютно комфортно), где 0 соответствует нейтральной оценке.

Дополнительно во всех зонах обследуемых объектов проводились инструментальные измерения значений факторов внутренней среды с использованием мобильной станции Climate Guard. Измерялись следующие параметры:

температура и влажность воздуха, концентрации CO_2 и ЛОС, освещенность, пульсация света, концентрация частиц $\text{PM}_{2,5}$, а также уровень проникающего шума и скорость воздушных потоков. Измерения проводились по единым протоколам и сопровождалась регистрацией пространственного положения.

Следует отметить, что массив инструментально измеренных значений параметров СЖ не используется в данной работе в рамках статистического анализа. Он будет задействован авторами на последующих этапах исследования — при моделировании многоканальной нейронной сети, направленной на интеграцию субъективных пользовательских оценок и инструментальных измерений с целью оценки и прогнозирования комфортности СЖ гражданских зданий.

Для оценки влияния факторов СЖ на итоговую пользовательскую оценку уровня комфортности СЖ применялась МЛР с поэтапным исключением переменных (stepwise regression). Порядок анализа включал:

- анализ корреляций между предикторами и зависимой переменной (общим уровнем комфортности СЖ здания);
- вычисление коэффициентов детерминации (R^2) и p -значений для каждого предиктора;
- расчет коэффициентов инфляции дисперсии (VIF) для выявления мультиколлинеарности;
- однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) для подтверждения значимости регрессионной модели;
- ранжирование факторов по модулю β -коэффициентов для определения приоритетности включения факторов в последующую модель нечеткого логического вывода и нейронную сеть.

Для визуализации результатов использовались тепловые карты корреляционных матриц, гистограммы распределения значений исходной выборки, а также столбчатые диаграммы статистических метрик моделей.

Для выделения ключевых факторов, оказывающих влияние на восприятие комфортности СЖ, в рамках множественной регрессии с пошаговым исключением переменных оценка значимости проводилась по следующим критериям:

- $p\text{-value} < 0,05$ — уровень статистической значимости по t -критерию;
- $\text{VIF} < 5$ — отсутствие мультиколлинеарности между предикторами.

Для оценки стабильности модели линейной регрессии и корректности отбора наиболее значимых факторов применена методика k -кратной перекрестной проверки (k -Fold Cross-Validation). Метод k -кратной перекрестной проверки представляет собой подход к валидации модели, направленной на снижение риска переобучения и повышение обобщающей способности модели. Исходная выборка случайным образом разбивается на k равных по размеру непересекающихся подвыборок (фолдов). Затем модель обучается k раз, каждый раз используя $k - 1$ подвыборку в качестве обучающей и оставшуюся подвыборку в качестве тестовой. Таким образом, каждый наблюдаемый объект участвует в валидации модели ровно один раз. В каждом цикле вычисляется качество модели (в настоящем исследовании — коэффициент детерминации R^2), а также сохраняются абсолютные значения регрессионных коэффициентов. На основании полученных коэффициентов в каждой подвыборке отбирались 5 факторов с наибольшим вкладом в модель (наибольшим

по модулю коэффициента регрессии). Частота попадания факторов в топ-5 по всем подвыборкам позволила оценить стабильность их влияния и устойчивость модели к вариативности обучающих подмножеств. В настоящем исследовании использовано значение $k = 10$, что соответствует современным рекомендациям по обеспечению баланса между статистической надежностью оценки модели и допустимыми вычислительными затратами [21, 22].

Для оценки устойчивости коэффициентов регрессии и построения доверительных интервалов использовался метод бутстрэп-анализа. Метод основан на многократном случайном формировании псевдовыборок с возвращением из исходной выборки [23]. На каждой итерации формировалась подвыборка, равная по объему исходной, за счет случайного выбора наблюдений с возвратом. Для каждой псевдовыборки строилась модель множественной линейной регрессии, и сохранялись значения ее коэффициентов. Проведение большого числа итераций (в настоящем исследовании — $B = 1000$) позволило получить эмпирическое распределение коэффициентов для каждого фактора. По этим распределениям рассчитаны доверительные интервалы на уровне 95 %, определяемые по значениям 2,5 и 97,5-го перцентилей [24]. Кроме того, в каждой итерации фиксировалось, какие факторы входили в число 5 наиболее значимых по модулю коэффициента регрессии. Это позволило определить частоту попадания каждого признака в топ-5, что дополнительно характеризует устойчивость его вклада в модель и степень влияния на отклик [1].

Результаты

Визуализация результатов оценки уровня комфортности (СЖ) административных зданий выполнена с использованием горизонтальной составной столбчатой диаграммы, отражающей распределение оценок пользователей по 36 параметрам (рис. 1). Оценки собирались по шкале от -3 (экстремально некомфортное восприятие) до $+3$ (максимально комфортное воздействие). Категория 0 интерпретировалась как нейтральная позиция без выраженной оценки.

Наивысшие значения уровня комфортности (≥ 80 % положительных оценок) продемонстрировали следующие параметры:

- F10 — легкость взаимодействия с коллегами, где 87 % респондентов отметили выраженно позитивный эффект от пространственной организации, способствующей неформальному и деловому общению, при этом доля негативных оценок составила всего 3 %;
- F32 — качество питьевой воды (83 %) и F33 — доступность питьевой воды (82 %) получили стабильно высокие оценки, что указывает на важность водной инфраструктуры в повседневном восприятии среды;
- F19 — уровень искусственного освещения также получил 82 % положительных откликов при низкой доле негативных (6 %), подтверждая значимость продуманного светового дизайна в формировании комфортной визуальной среды.

Умеренно высокие показатели уровня комфортности (в пределах 60...70 %) характерны для:

- F13 — комфорта офисной мебели (68 % положительных, 16 % отрицательных);
- F17 — качества естественного освещения (69 % / 19 %).

В то же время, наименьшие оценки получили следующие факторы:

- F28 — индивидуальное управление микроклиматом, где 46 % респондентов указали на негативное восприятие и лишь 31 % отметили положительное воздействие;
- F7 — озеленение прилегающей территории также вызвало значительный отклик — 39 % негативных оценок против 35 % положительных.

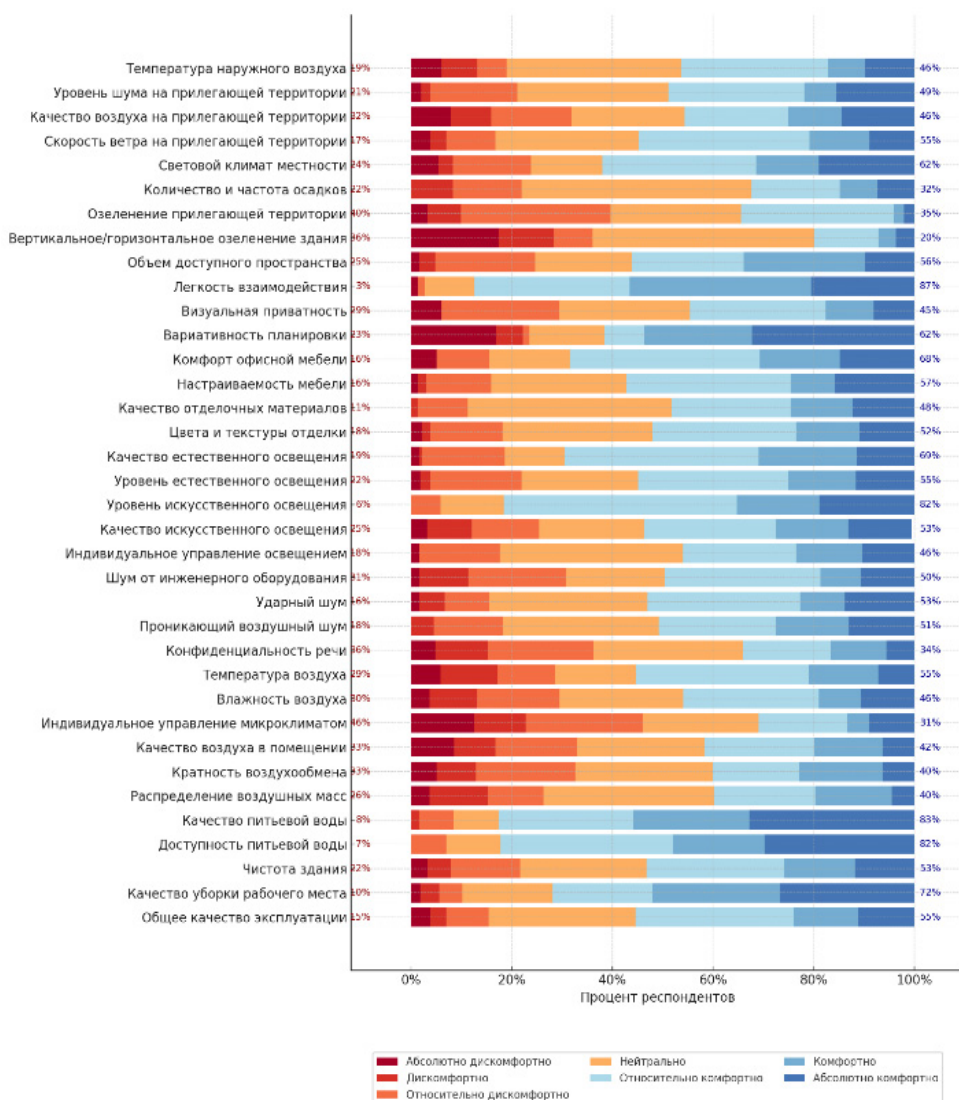


Рис. 1. Диаграмма распределения пользовательских оценок по шкале Лайкерта

На первом этапе анализа построена первичная модель множественной линейной регрессии, в которую включены оценки всех 36 факторов СЖ, полученные от респондентов. В качестве зависимой переменной использовалась пользовательская итоговая оценка уровня комфортности административного здания. Обработка данных осуществлялась на массиве, содержащем 843 наблюдения.

Результаты показали высокую объяснительную способность модели:

- коэффициент детерминации $R^2 = 0,885$;
- уровень значимости модели по F -критерию — $1,11\text{e-}16$;
- среднеквадратичная ошибка — $0,21$;
- средняя абсолютная ошибка — $0,34$.

Результат дисперсионного анализа (ANOVA) представлен в табл. 1. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,885$ свидетельствует о тесной связи зависимой и независимых переменных. Проведенный дисперсионный анализ подтвердил значимость модели: F — значение выборки $1,11\text{e-}16 \ll 0,01$.

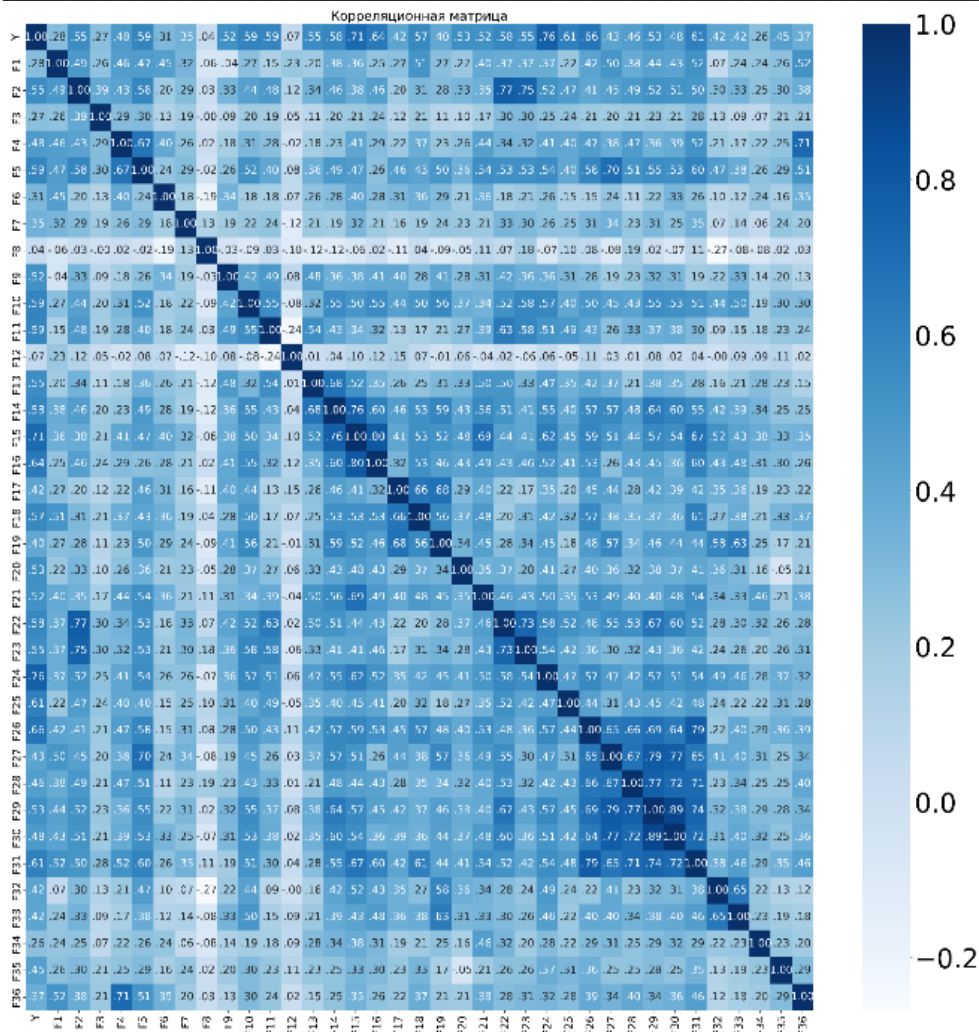
Таблица 1

*Характеристики и ранжирование предикторов первичной модели МЛР
по величине модуля коэффициента регрессии*

Фактор	Coef. reg.	P-value	VIF	Фактор	Coef. reg.	P-value	VIF
F15	0,396	0,000	14,150	F7	0,071	0,000	1,702
F18	0,315	0,013	5,089	F27	−0,068	0,009	11,491
F19	−0,292	0,000	6,391	F35	0,068	0,000	1,644
F24	0,233	0,001	2,986	F16	−0,054	0,024	9,671
F26	0,200	0,029	5,823	F2	0,049	0,080	7,866
F1	−0,192	0,071	4,380	F28	0,047	0,000	4,553
F5	0,154	0,000	8,527	F30	−0,036	0,000	11,767
F21	−0,154	0,078	4,713	F4	−0,034	0,155	6,074
F14	−0,141	0,000	8,157	F10	−0,031	0,000	4,616
F31	−0,128	0,000	7,039	F9	0,030	0,002	3,076
F11	0,121	0,006	4,032	F8	0,028	0,000	1,973
F6	0,117	0,000	2,732	F29	−0,027	0,000	14,375
F20	0,110	0,418	1,733	F34	−0,020	0,129	1,461
F25	0,087	0,000	1,914	F17	0,012	0,000	4,136
F33	0,087026	0,000	3,301	F12	0,007	0,000	2,155
F32	0,085918	0,000	4,994	F36	0,003	0,011	2,373
F22	0,078270	0,070	7,472	F23	0,003	0,006	8,432
F13	0,076847	0,000	3,731	F3	−0,001	0,017	1,267

Примечание: зеленым цветом выделены ячейки с факторами с наибольшим модулем коэффициента регрессии, отобранные для дальнейшего моделирования; синим — со значимыми факторами; оранжевым — с мультиколлинеарными факторами.

На рисунке 2 представлена матрица корреляции первичной модели, а на рис. 3 — гистограммы распределения коэффициентов регрессии.



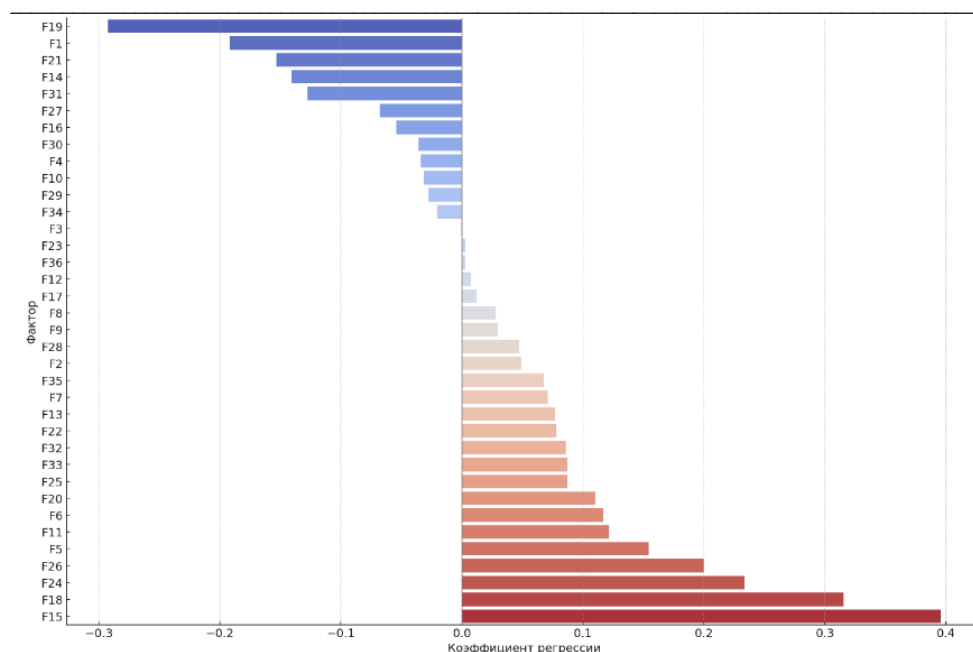


Рис. 3. Гистограмма ранжирования предикторов по величине коэффициентов регрессии

Таблица 2

Характеристики предикторов в уточненной модели МЛР

Фактор	Coef. reg.	P-value	VIF
F15	0,295	0,000	2,087
F18	0,218	0,013	1,827
F19	-0,222	0,000	1,670
F24	0,447	0,001	1,850
F26	0,186	0,029	1,960

Уточненная модель сохранила высокую объясняющую способность:

- $R^2 = 0,749$;
- уровень значимости по F-критерию = $6e-237$;
- $MSE = 0,45$;
- $MAE = 0,48$.

Таким образом, уточненная модель с пятью предикторами позволяет объяснить порядка 75 % вариации пользовательских оценок комфортности СЖ, что свидетельствует о высокой эффективности процедуры отбора.

С целью проверки устойчивости выборки и достоверности отбора факторов, предварительно отобранных на основании статистической значимости ($p\text{-value} \leq 0,05$), применены процедуры k -кратной перекрестной проверки и бутстрэп-анализа. Эти методы позволили оценить стабильность включения отдельных предикторов в модель множественной линейной регрессии при варьировании состава обучающей выборки.

В результате проведения k -кратной перекрестной проверки (при $k = 10$) установлено, что факторы F15, F18, F19, F24 и F26 входят в пятерку предикторов с

наибольшими по модулю значениями коэффициентов линейной регрессии во всех подвыборках, сформированных в рамках процедуры. Среднее значение коэффициента детерминации по итогам перекрестной проверки составило $R^2 = 0,854$.

При выполнении бутстрэп-анализа (при $B = 1000$) для каждого из факторов рассчитаны 95%-е доверительные интервалы коэффициентов, определенные на основе 2,5 и 97,5-го процентилей эмпирического распределения. Частота включения факторов в пятерку наиболее значимых по модулю коэффициентов составила: F19 — 100,0 %; F24 — 96,0 %; F18 — 93,9 %; F15 — 86,1 %; F26 — 72,4 %.

Обсуждение

В рамках исследования построены две модели множественной линейной регрессии: первичная, включающая все 29 предикторов, отобранных по критерию значимости $p \leq 0,05$, и уточненная, содержащая только 5 факторов, устойчиво демонстрирующих статистическую значимость и интерпретируемость. Первичная модель показала высокую объясняющую способность, достигая коэффициента детерминации $R^2 = 0,885$. Это указывает на согласованную структуру вклада предикторов в формирование пользовательской оценки уровня комфортности СЖ.

Первичная модель позволила зафиксировать исходную величину вклада каждого из факторов и послужила основой для отбора устойчивых переменных. Уточненная модель, в свою очередь, демонстрировала сопоставимую объясняющую способность при существенно меньшем числе предикторов, что говорит о высокой концентрации объясненной дисперсии в ограниченном числе признаков.

Уточненная модель, включающая только факторы F15, F18, F19, F24 и F26, продемонстрировала несколько более низкое значение $R^2 = 0,749$, что отражает снижение доли объясненной дисперсии, однако при этом сохранила интерпретируемость и статистическую устойчивость структуры. Снижение точности является ожидаемым следствием упрощения модели, но остается в пределах, приемлемых для практического применения. Факторы, включенные в уточненную модель, могут рассматриваться в качестве минимального набора предикторов для прогностической модели, и далее были верифицированы с помощью независимых процедур валидации.

Проведенный анализ позволил выделить 5 ключевых факторов, оказывающих устойчивое влияние на субъективную оценку комфортности СЖ административных зданий. Их значимость подтверждена как классической линейной регрессией, так и процедурами валидации — k -кратной перекрестной проверкой и бутстрэп-анализом.

Данные k -Fold Cross-Validation ($k = 10$) показали 100%-ю частоту включения факторов F15 (качество отделочных материалов), F18 (естественное освещение), F19 (искусственное освещение), F24 (проникающий воздушный шум) и F26 (температура воздуха) в топ-5 наиболее значимых по модулю регрессионных коэффициентов. Среднее значение R^2 по всем фолдам (подвыборкам) составило 0,854, что свидетельствует о высокой обобщающей способности модели и согласованности вклада отобранных переменных.

Результаты бутстрэп-анализа ($B = 1000$) подтвердили устойчивость полученных оценок — построенные 95%-е доверительные интервалы

коэффициентов не включают нулевое значение, а частота попадания указанных факторов в пятерку лидеров варьировала от 72,4 % (F26) до 100 % (F19). Частота включения остальных факторов после пятого по убыванию не превышала 25 %, что подтверждает их второстепенную роль.

Таким образом, выявленные предикторы демонстрируют не только статистическую значимость, но и устойчивость к вариативности обучающих подмножеств. Это указывает на их фундаментальную роль в формировании комфортности СЖ с учетом пользовательского восприятия.

Выделенные в результате регрессионного анализа 5 ключевых факторов (F15 «Качество отделочных материалов», F18 «Уровень естественного освещения», F19 «Уровень искусственного освещения», F24 «Уровень проникающего воздушного шума» и F26 «Температура воздуха») находят подтверждение в результатах авторитетных международных исследований. Так, согласно данным обобщенной базы Центра по изучению искусственной среды (CBE), визуальный комфорт, включающий как уровень естественного, так и искусственного освещения, стабильно входит в тройку факторов, наиболее существенно влияющих на пользовательскую оценку качества внутренней среды (IEQ) в административных зданиях. В [15] отмечается, что естественное освещение упоминается как значимый фактор более чем в 90 % случаев, а искусственное — в 85...90 %. Результаты настоящего исследования подтверждают данную тенденцию: переменные F18 (уровень естественного освещения, $\beta = 0,218$) и F19 (уровень искусственного освещения, $\beta = -0,222$) вошли в уточненную регрессионную модель со значимыми по модулю коэффициентами, что указывает на существенное влияние световой среды на восприятие уровня комфортности.

Особого внимания заслуживает отрицательное значение коэффициента регрессии фактора F19 «Уровень искусственного освещения» ($\beta = -0,222$). Данный результат может показаться контринтуитивным, если интерпретировать его исключительно как реакцию на количественный уровень освещенности. Однако он может отражать негативное восприятие респондентами слишком высоких значений освещенности рабочей поверхности.

Уровень проникающего воздушного шума (F24) занял лидирующую позицию среди предикторов ($\beta = 0,447$). Этот вывод согласуется с результатами исследований [9, 20, 26, 27], где уровень фонового шума часто идентифицируется как один из ключевых факторов, влияющих на комфорт и удовлетворенность средой. В частности, проникающий шум неоднократно определялся как значимый фактор уровня комфортности административных зданий.

В исследованиях под руководством Р. де Диара [12, 20, 28—30] показано, что адаптивное восприятие температуры заметно влияет на удовлетворенность пользователей уровнем комфортности СЖ, при этом усредненные β -коэффициенты для температурных параметров находятся в интервале 0,15...0,25. В настоящей работе сходный эффект продемонстрировал фактор F26 «Температура воздуха», включенный в уточненную модель с коэффициентом $\beta = 0,186$, что подтверждает его весомый вклад в формирование комфортной внутренней среды.

Фактор F15 «Качество отделочных материалов» (включая восприятие эмиссии летучих органических соединений — ЛОС) также показал высокую значимость ($\beta = 0,295$). Эти результаты коррелируют с результатами [9, 16],

где качество воздуха в помещении и сенсорные характеристики интерьера (в т. ч. запахи от материалов) входят в число ведущих факторов, ассоциированных с ощущением дискомфорта и влияющих на здоровье пользователей.

В отличие от методологий, фокусирующихся на построении интегральных индексов комфорта преимущественно на основе объективных физико-технических параметров, как, например, в подходе В. А. Салтыкова и А. И. Герасимова [31], настоящее исследование ставит во главу угла анализ пользовательского восприятия для выявления ключевых факторов комфортности. Если в первом случае набор факторов и их комбинация для интегральной оценки задаются априорно или на основе расчетных экспериментов, то наш подход использует пользовательские оценки для идентификации статистически значимых и устойчивых предикторов.

Настоящее исследование имеет ряд ограничений, определяющих границы экстраполяции полученных результатов:

1) локальный характер выборки — все данные получены в административных зданиях г. Москвы. Климатическая специфика, типовые конструктивные решения и пользовательские привычки формируют ограниченное представление о спектре восприятия, что требует верификации результатов в иных климатических и культурных контекстах;

2) размер выборки — хотя исследование охватило 843 респондента, его масштаб существенно уступает международным базам CBE Berkeley (более 90 000 строк данных) [10], ASHRAE (более 80 000 строк данных) [20], BOSSA (более 20 000 строк данных) [9], что ограничивает статистическую мощность модели. Однако совпадение структуры ключевых предикторов с международными исследованиями указывает на методологическую состоятельность примененного подхода и дает основание для использования результатов на следующих этапах исследования;

3) специфика респондентов — выборка состояла из практикующих специалистов в области проектирования и строительства. Хотя это могло обеспечить более дифференцированные оценки, их восприятие может отличаться от восприятия «обычных» офисных работников, не обладающих специальными знаниями в данной области. Это может влиять на обобщаемость выводов на более широкую выборку пользователей административных зданий;

4) перечень факторов — несмотря на то, что исходный перечень из 36 факторов составлен на основе обширного анализа литературы, он не является исчерпывающим и может не учитывать некоторые специфические аспекты, релевантные для определенных типов зданий или рабочих процессов.

В рамках настоящего исследования выбор значимых факторов, влияющих на восприятие уровня комфортности СЖ, осуществлен с использованием модели множественной линейной регрессии с пошаговым исключением переменных. Данный подход принципиально отличается от распространенных в международной практике методик, где основными инструментами сокращения размерности служат методы главных компонент (PCA) и иерархической кластеризации (HCA).

Так, в работах [2, 8, 11, 15] реализована процедура PCA по 16 шкалам восприятия факторов IEQ, на основании которой выделены 7 компонент: акустика, тепловой комфорт, освещение, чистота, качество воздуха и пр. HCA подтвердил естественность сформированных групп, что позволило использовать

полученные индексы в целях бенчмаркинга и подготовки рекомендаций по модернизации офисной среды. Однако каждая из компонент представляет собой линейную комбинацию исходных переменных, что затрудняет их инженерную интерпретацию и не позволяет напрямую соотнести вклад конкретного фактора с физическими параметрами среды.

Схожий методологический путь прослеживается в [9], где на основе пользовательских оценок по 31 фактору СЖ также применяется РСА с последующей кластеризацией. Компоненты служат агрегированными индексами, на которые затем накладываются регрессионные модели для оценки вклада в общую удовлетворенность, продуктивность и здоровье пользователей. Однако ни один из этапов не позволяет установить точную количественную связь между исходными факторами и целевым показателем, а полученные компоненты теряют физическую идентификацию.

В отличие от этого, примененный в настоящем исследовании шаговый отбор на базе МЛР позволил выполнить целевое сокращение размерности, при котором удаляются исключительно статистически незначимые или мультиколлинеарные переменные, сохраняются только те, которые вносят достоверный вклад в объяснение вариации интегрального отклика. Отобранные 5 факторов (качество отделочных материалов, естественное и искусственное освещение, уровень проникающего шума и температура воздуха) сохраняют полную семантическую прозрачность, что позволяет напрямую использовать их в системах поддержки принятия решений.

Заключение

В настоящем исследовании решена задача сокращения размерности факторного пространства путем выделения ключевых факторов СЖ, оказывающих наибольшее влияние на восприятие комфортности для последующего построения прогностических моделей оценки уровня комфортности зданий. Из 36 исследованных факторов с применением линейной регрессии, анализа мультиколлинеарности, k -кратной перекрестной проверки и бутстрэп-анализа отобраны 5 наиболее значимых: F15 — качество отделочных материалов (включая эмиссию ЛОС), F18 — уровень естественного освещения, F19 — уровень искусственного освещения, F24 — уровень проникающего воздушного шума, и F26 — температура воздуха.

Уточненная модель множественной линейной регрессии с пятью предикторами демонстрирует высокую объясняющую способность — $R^2 = 0,749$ при $p < 0,0001$, а ее структура подтверждена процедурами k -кратной перекрестной проверки (среднее $R^2 = 0,854$) и бутстрэп-анализа ($B = 1000$). Выбранные факторы продемонстрировали максимальную устойчивость к вариативности подвыборок и узкие доверительные интервалы.

Структура выявленных значимых факторов комфортности (качество отделочных материалов/качество воздуха, световая среда, акустическая среда, термическая среда) согласуется с результатами ведущих международных исследований, подтверждая релевантность и общность данных факторов для оценки уровня комфортности СЖ гражданских зданий.

Результаты пользовательской оценки комфортности показали высокую вариативность качества среды в административных зданиях. Это подтверждает необходимость перехода от универсальных нормативных требований к адаптивным (параметрическим), основанным на реальных пользовательских

предпочтениях, интегрированных с инструментальными измерениями параметров СЖ.

Предложенный инструментарий отбора факторов может быть использован для разработки систем поддержки принятия решений на этапах проектирования, эксплуатации и модернизации зданий, для мониторинга и адаптации среды, а также в рамках программ повышения энергоэффективности, реализации ESG-повестки и проведения «зеленой» сертификации зданий, ориентированных на создание комфортной СЖ гражданских зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Слесарев М. Ю. Инновационные методы формирования систем экологической безопасности строительства // Вестник МГСУ. 2007. № 3. С. 7—12.
2. Wargocki P., Schiavon S., Goins J., Arens E. Satisfaction and self-estimated performance in relation to indoor environmental quality and building features // Building and Environment. 2020. Vol. 169. P. 106568. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106568.
3. Теличенко В. И., Бенуж А. А., Рудь Н. С., Йёйе О. У. Параметры проектирования комфортной среды жизнедеятельности в нормативной документации // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 5. С. 51—56. DOI: 10.33622/0869-7019.2020.05.51-56.
4. Теличенко В. И., Слесарев М. Ю., Бенуж А. А., Рудь Н. С. Качественная оценка среды жизнедеятельности гражданских зданий после заселения // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 9. С. 20—25. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.09.20-25.
5. Тетиор А. Н. Городская экология: учебное пособие для студентов. М.: Academia, 2006. 336 с.
6. Preiser W. F. E., Rabinowitz H., White E. Post-occupancy evaluation. London: Routledge, 2015. 264 p.
7. Preiser W. F. E. Building Performance Evaluation: From Design and Delivery to Management and Operations New York: Routledge, 2018. 328 p.
8. Zagreus L., Huizenga C., Arens E., Lehrer D. Listening to the occupants: a web-based indoor environmental quality survey // Indoor Air. 2004. Vol. 14. Suppl. 8. Pp. 65—74. DOI:10.1111/j.1600-0668.2004.00301.x.
9. Candido C., Kim J., de Dear R., Thomas L. BOSSA: a multidimensional post-occupancy evaluation tool // Building Research & Information. 2016. Vol. 44. Iss. 2. Pp. 214—228. DOI: 10.1080/09613218.2015.1072298.
10. Graham L., Parkinson T., Schiavon S. Lessons learned from 20 years of CBE's occupant surveys // Building and Cities. 2021. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 166—184. DOI: 10.5334/bc.76.
11. Parkinson T., Schiavon S., Kim J., Betti G. Common sources of occupant dissatisfaction with workspace environments in 600 office buildings // Buildings and Cities. 2023. Vol. 4. Iss. 1. Pp. 17—35. DOI: 10.5334/bc.274.
12. Kim J., de Dear R. J. Nonlinear relationships between individual IEQ factors and overall workspace satisfaction // Building and Environment. 2012. Vol. 49. Pp. 33—40. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.09.022.
13. Indoor environmental quality, occupant satisfaction, and acute building-related health symptoms in Green Mark-certified compared with non-certified office buildings / J. Lee, P. Wargocki, Y. Chan, L. Chen, K. Tham // Indoor Air. 2019. Vol. 29. Iss. 1. Pp. 112—129. DOI: 10.1111/ina.12515.
14. Elijah-Barnwell S., Friedow B. Development and Psychometric Testing of a Post-Occupancy Evaluation // HERD: Health Environments Research & Design Journal. 2014. Vol. 8. Iss. 1. Pp. 115—121. DOI: 10.1177/193758671400800109.
15. Altomonte S., Schiavon S., Kent M. G., Brager G. Indoor environmental quality and occupant satisfaction in green-certified buildings // Building Research & Information. 2019. Vol. 47. Iss. 3. Pp. 255—274. DOI: 10.1080/09613218.2018.1383715.
16. Toftum, J., Wyon D. P., Svanekjar H., Lantner A. Remote Performance Measurement (RPM): A new, internet-based method for the measurement of occupant performance in office buildings // 10th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. 2005. Pp. 357—61.
17. Frontczak M., Wargocki P. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments // Building and Environment. 2011. Vol. 46. Iss. 4. Pp. 922—937. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.10.021.

18. Герасимов А. И., Салтыков И. П. Подход к оценке комфортности внутренней среды обитания в помещениях жилых зданий строительными методами. // Вестник МГСУ. 2011. № 2. С. 406—411.
19. Roulet C. A., Cox L. C., de Oliveira Fernandes E., Müller B. Health, Comfort, and Energy Performance in Buildings Guidelines to Achieve Them All. HOPE Health Optimisation Protocol for Energy-Efficient Buildings, 2005. 64 p.
20. de Dear R. A global database of thermal comfort field experiments // ASHRAE Transactions. 1998. Vol. 104. Iss. Pt 1B. Pp. 1141—1152.
21. Marcot B. G., Hanea A. M. What is an optimal value of k in k-fold cross-validation in discrete Bayesian network analysis? // Computational Statistics. 2020. Vol. 36. Pp. 2009—2031. DOI: 10.1007/s00180-020-00999-9.
22. Chamorro-Atalaya O., Pizarro-Romero J., Paredes-Villacrés H. K-fold cross-validation through identification of the opinion classification algorithm for the satisfaction of university students // International Journal of Online and Biomedical Engineering. 2023. Vol. 19. Iss. 11. Pp. 140—157. DOI: 10.3991/ijoe.v19i11.39887.
23. Pelawa Watagoda L. C. R., Olive D. J. Bootstrapping multiple linear regression after variable selection // Statistical Papers. 2019. Vol. 62. Iss. 3. Pp. 681—700. DOI: 10.1007/s00362-019-01108-9.
24. Variable selection with scalable bootstrapping in generalized linear model for massive data / Z. Zhang, Z. He, Y. Qin, Y. Shen, B.-C. Shia, Y. Li // Journal of Data Science. 2023. Vol. 21. Iss. 1. Pp. 87—105. DOI: 10.6339/22-JDS1052.
25. Hofner B., Boccutto L., Göker M. Controlling false discoveries in high-dimensional situations: boosting with stability selection // BMC Bioinformatics. 2015. Vol. 16. Iss. 144. DOI: 10.1186/s12859-015-0575-3.
26. Sound in occupied open-plan offices: Objective metrics with a review of historical perspectives / M. Yadav, D. Cabrera, J. Kim, J. Fels, R. de Dear // Applied Acoustics. 2021. Vol. 177. P. 107943. DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.
27. Kent M., Parkinson T., Kim J., Schiavon S. A data-driven analysis of occupant workspace dissatisfaction // Building and Environment. 2021. Vol. 205. P. 108270. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108270.
28. The impact of occupant's thermal sensitivity on adaptive thermal comfort model / R. F. Rupp, T. Parkinson, J. Kim, J. Toftum, R. de Dear // Building and Environment. 2022. Vol. 207. P. 108517. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108517.
29. Identification of Environmental and Contextual Driving Factors of Air Conditioning Usage Behaviour in the Sydney Residential Buildings / B. Jeong, J. Kim, Z. Ma, P. Cooper, R. de Dear // Buildings. 2021. Vol. 11. Iss. 3. P. 122. DOI: 10.3390/buildings11030122.
30. Carlucci S., Erba S., Pagliano L., de Dear R. ASHRAE Likelihood of Dissatisfaction: A new right-here and right-now thermal comfort index for assessing the Likelihood of dissatisfaction according to the ASHRAE adaptive comfort model // Energy & Buildings. 2021. Vol. 250. P. 111286. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111286.
31. Герасимов А. И., Салтыков И. П. Проектирование комфортной среды обитания в помещениях жилых зданий с позиции физико-технических параметров ограждающих конструкций: монография. М. : Директ-Медиа, 2019. 175 с.

© Рудь Н. С., Шишкина П. В., Теличенко В. И., 2025

Поступила в редакцию
08.07.2025

Ссылка для цитирования:

Рудь Н. С., Шишкина П. В., Теличенко В. И. Оценка уровня комфортности среды жизнедеятельности гражданских зданий: подход к выбору значимых факторов комфортности // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2025. Вып. 3(100). С. 233—249. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_233.

Об авторах:

Рудь Никита Сергеевич — руководитель экологического инжиниринга, ООО «Нью иммо сервис». Российская Федерация, 107140, г. Москва, ул. Верхняя Красносельская, 3, стр. 2; RudbNS@gmail.com

Шишкина Полина Владимировна — студентка каф. строительной и теоретической механики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Российская Федерация, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; pshishkina638@gmail.com

Теличенко Валерий Иванович — акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., проф. каф. строительства объектов тепловой и атомной энергетики, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Российская Федерация, 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; president@mgsu.ru

Nikita S. Rud^a, Polina V. Shishkina^b, Valery I. Telichenko^b

^a LLC «New Immo Services»

^b National Research Moscow State University of Civil Engineering

ASSESSING THE LEVEL OF COMFORT OF THE LIVING ENVIRONMENT IN CIVIL BUILDINGS: AN APPROACH TO SELECTING SIGNIFICANT FACTORS

This paper addresses the challenge of establishing a classified and systematized framework of factors influencing the comfort of the living environment in administrative buildings, and subsequently identifying the most significant among them. Utilizing an extensive empirical dataset from administrative buildings in a major metropolitan area ($n = 843$ respondents across 11 office buildings), this study, for the first time, conducts a comprehensive statistical selection of factors that determine the perceived satisfaction levels of the living environment. The methodology integrates step-wise multiple linear regression, k -fold cross-validation, and bootstrap analysis. This robust approach facilitated the identification of a stable set of five key factors that account for the largest share of variance in subjective assessments, rendering them critical for subsequent modeling using.

Key words: comfortable living environment, comfort level, health preservation, environmental safety, green construction, sustainable development, environmental safety.

For citation:

Rud N. S., Shishkina P. V., Telichenko V. I. [Assessing the level of comfort of the living environment in civil buildings: an approach to selecting significant factors]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 3, pp. 233—249. DOI: 10.35211/18154360_2025_3_233.

About authors:

Nikita S. Rud — Head of Environmental Engineering, LLC «New Immo Services». 3, bld. 2, Verkhnyaya Krasnoselskaya st., 107140, Moscow, Russian Federation; RudbNS@gmail.com

Polina V. Shishkina — Student, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; pshishkina638@gmail.com; ORCID: 0009-0003-4531-4249

Valery I. Telichenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering. 26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; president@mgsu.ru; ORCID: 0000-0001-7669-713X