

УДК: 504.064

OECD: 01.03.AA

DOI: 10.56408/2412-8627.2026.29.81.007

Верифицированная модель акустической эффективности архитектурных конфигураций застройки для умного города

Ледовской Р.А.^{1*}, Колбин М.Д.², Бегдай И.В.³¹Магистрант, ²Ассистент кафедры математического анализа, алгебры и геометрии³К.т.н., доцент^{1,3}Кафедра экологии и биогеографии^{1,2,3}Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, РФ

Аннотация

В статье представлены результаты натурных акустических измерений и математического моделирования шумового загрязнения на пяти типах дворовых территорий г. Ставрополя (замкнутый двор-колодец, двор с параллельной, перпендикулярной и Г-образной застройкой, а также двор-колодец с четырьмя арочными проёмами). Измерения выполнены по ГОСТ 23337-2014 в будние и выходные дни; уровни шума сопоставлены с нормативами СанПиН 1.2.3685-21 (55 дБА днём). Установлено, что замкнутые дворы-колодцы обеспечивают наилучший экранирующий эффект и соответствие нормативам. Перпендикулярная и Г-образная конфигурации приводят к превышениям во всех точках в будни и в прифасадных зонах в выходные. Разработана калиброванная математическая модель прогнозирования уровня шума в расчётной точке внутри двора (среднеквадратическая ошибка 3,5 дБА), учитывающая геометрию зданий, параметры транспортного потока и звукопоглощение. Модель может быть интегрирована в системы поддержки принятия решений при планировании умного города и разработке градостроительных мероприятий, позволяя на этапе проектирования выбирать конфигурацию застройки, минимизирующую шумовую нагрузку на жилые зоны.

Ключевые слова: шумовое загрязнение, математическая модель, умный город, градостроительное проектирование, жилые территории, дворовое пространство, экранирующий эффект

Verified model of acoustic performance of architectural configurations in urban development for a smart city

Ledovskoy R.A.^{1*}, Kolbin M.D.², Begday I.V.³¹Master's student, ²Assistant at the Department of Computational Mathematics and Cybernetics³Ph.D., Associate Professor^{1,3}Department of Ecology and Biogeography^{1,2,3}North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

Abstract

The article presents the results of field acoustic measurements and mathematical modeling of noise pollution in five types of courtyard areas in Stavropol (enclosed courtyard, parallel, perpendicular and L-shaped

*E-mail: ledovskoy_04@mail.ru (Ледовской Р.А.)

buildings, as well as an enclosed courtyard with four arched passages). Measurements were carried out according to GOST 23337–2014 on weekdays and weekends; noise levels were compared with SanPiN 1.2.3685–21 standards (55 dBA daytime). Enclosed courtyards provide the best shielding effect and comply with the standards. Perpendicular and L-shaped configurations lead to exceedances at all points on weekdays and in near-facade zones on weekends. A calibrated mathematical model for predicting the noise level at a calculation point inside a courtyard has been developed (root-mean-square error 3,5 dBA), taking into account building geometry, traffic parameters and sound absorption. The model can be integrated into decision-support systems for smart city planning and urban development measures, allowing selection of building configurations that minimize noise pollution in residential areas at the design stage.

Keywords: noise pollution, mathematical model, smart city, urban planning, residential area, courtyard space, shielding effect

Введение

На фоне стремительной урбанизации и усиления антропогенной трансформации окружающей среды шумовое загрязнение всё увереннее занимает одно из ключевых мест в ряду факторов, определяющих экологическую безопасность современных городов. Крупные населённые пункты, выступающие узлами транспортных, промышленных и социальных процессов, формируют акустический режим, при котором фактические уровни звука нередко превышают действующие санитарно-гигиенические нормативы. Это неизбежно влечёт за собой ухудшение здоровья и снижение качества жизни населения. По мере разрастания городов и усложнения их инфраструктуры звуковой ландшафт становится всё более значимой характеристикой городской среды, способной негативно влиять на физическое и психоэмоциональное благополучие людей. В связи с этим данные, полученные в ходе оценки шумовой нагрузки, должны находить практическое применение при разработке градостроительных решений [1].

Сегодня стало очевидно, что для решения городских проблем необходимо предлагать решения, ориентированные на граждан, чтобы обеспечить устойчивую среду для высокого уровня благосостояния и общественного здоровья, а также эффективное и рациональное использование ресурсов [2]. Умный город – это инновационный городской объект, использующий информационно-коммуникационные технологии для эффективной интеграции различных систем городского управления, обеспечивающий обмен информационными ресурсами и оперативное взаимодействие между этими системами, а также способствующий интеллектуальной трансформации городского управления и сферы услуг. Это повышает уровень оперативного управления городскими процессами и качество государственных услуг, улучшает благосостояние и удовлетворенность жителей, а также способствует устойчивому развитию. Такой подход не только демонстрирует высокую системность и практичность, но и создает конструктивную основу, ориентированную на расширение технологических возможностей, сотрудничество в сфере управления и гуманистический подход. Он соответствует практическому контексту городского развития и обеспечивает баланс между эффективностью, инклюзивностью и устойчивостью, представляя собой ценную парадигму как для теоретического, так и для практического развития концепции «умного города» [3].

Крупные города состоят из множества замкнутых пространств, окруженных высокими зданиями. Их часто называют «городскими каньонами». Точный расчет распространения звука от каньона-источника (например, улицы) в сторону защищенного каньона-приемника представляет интерес с точки зрения «тихих сторон». Уровень шума

в городских каньонах повышается из-за многократного отражения звука от окружающих поверхностей, в первую очередь от фасадов. Таким образом, при грамотном проектировании фасадов можно добиться акустического комфорта в городской среде. Однако, несмотря на растущую обеспокоенность по поводу шумового загрязнения, при городском проектировании акустические последствия в масштабах города обычно не учитываются [4]. В то время как правильная планировка жилых кварталов, рациональное расположение жилых и общественных зданий на территории, прилегающей к транспортным путям, позволит значительно улучшить акустическую ситуацию [5].

Если геометрия двора определяет общий акустический «контур» пространства, то форма самих зданий и архитектурное решение фасадов задают микроструктуру звукового поля. Ключевым понятием здесь является «городской каньон» – пространство между двумя высокими фасадами, где многократные отражения звука могут существенно повышать уровни шума. Согласно численному моделированию Feriani и соавторов, отражения от противоположного здания в узком уличном каньоне могут увеличивать уровень звука до 12 дБА [6].

В связи с возрастающим значением проблемы шумового загрязнения в условиях урбанизированной среды, представляется обоснованным проведение комплексных исследований, направленных на изучение акустических характеристик дворовых пространств и оценку влияния геометрии окружающих зданий на накопление шумовой нагрузки. Особую значимость приобретает анализ конфигурации застройки – формы домов, степени замкнутости дворов, наличия сквозных проездов, – что позволяет выявить пространственно-планировочные факторы, способствующие либо рассеиванию, либо многократному отражению звуковых волн. Благодаря полученным результатам обеспечивается возможность оценки акустического качества различных типов дворовых территорий, идентификации наиболее проблемных с точки зрения реверберации и задержки звука архитектурных решений, а также разработки рекомендаций по оптимальному размещению зданий, выбору формы дворов и применению звукопоглощающих фасадных материалов, направленных на снижение шумовой нагрузки и повышение экологической безопасности городской среды.

1 Методы исследования

Для решения поставленной задачи использовался комплексный подход, включающий натурные акустические измерения и математическое моделирование распространения шума в условиях городской застройки.

Измерения уровней звука проводились в соответствии с ГОСТ 23337-2014 «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий» с использованием шумомера UNIT-T UT352 [7]. Полученные результаты сопоставлялись с нормативными значениями, установленными СанПиН 1.2.3585-21 [8].

Измерения выполнялись в безлиственный период (февраль 2026 года) в утренние (8:00-10:00) и вечерние (17:00-19:00) часы. Для каждого из пяти типов дворовых территорий фиксация уровней шума проводилась синхронно в двух будних днях и одном выходном дне. Такая схема позволила учесть, как регулярную транспортную нагрузку, так и её снижение в выходные дни.

Для прогнозирования эквивалентного уровня шума в расчётной точке внутри дворового пространства разработана математическая модель, объединяющая теоретические положения геометрической теории дифракции и эмпирические зависимости, полученные по результатам натурных измерений.

За теоретическую основу принято описание распространения звука от транспортной магистрали до внутридворовой территории с учётом многократных отражений от фасадов зданий, экранирующего эффекта застройки и поглощения звука ограждающими поверхностями; использованы соотношения для цилиндрических и квазичилиндрических волн, адаптированные к условиям «городских каньонов».

На основе данных натурных замеров выведена зависимость, позволяющая рассчитать опорный уровень шума у проезжей части; в качестве входных параметров используются интенсивность транспортного потока, длительность светофорного цикла, время красного сигнала и этажность зданий, что даёт возможность учесть влияние светофорного регулирования и высотности застройки на акустическую нагрузку. Распространение звука от дороги до расчётной точки внутри двора описывается как последовательное ослабление опорного уровня за счёт дифракции на зданиях, звукопоглощения во дворе и геометрического расхождения волнового фронта (с учётом перехода от цилиндрической волны к сферической по мере удаления от источника). Модель учитывает геометрические размеры зданий (высоту, ширину, длину), расстояние от дороги до фасада первого здания, а также акустические свойства поверхностей двора (средний коэффициент звукопоглощения и суммарную площадь ограждающих конструкций).

Для приведения модели к реальным условиям конкретных дворовых территорий введена калибровочная константа, значение которой определено по натурным замерам с использованием нелинейного метода наименьших квадратов (алгоритм Левенберга – Марквардта), реализованного в среде Python с применением библиотеки SciPy. Среднеквадратическая ошибка модели, вычисленная при калибровке, составляет 3,5 дБА, что подтверждает её пригодность для инженерных акустических расчётов. Весь вычислительный эксперимент (обработка измерений, подбор параметров, оценка погрешности) выполнен в программной среде Python с привлечением пакетов NumPy, SciPy и Matplotlib.

2 Область исследования

Исследование проводилось на территории промышленного района города Ставрополя, который характеризуется высокой плотностью населения, интенсивным автомобильным трафиком (особенно в часы пик) и разнообразием архитектурно-планировочных решений жилой застройки. В качестве объектов выбраны пять наиболее распространённых типов дворовых территорий, различающихся конфигурацией окружающих зданий и степенью замкнутости внутридворового пространства: замкнутый двор-колодец, двор с параллельной застройкой, двор с перпендикулярной застройкой, Г-образный двор, а также двор-колодец, оборудованный четырьмя арочными проёмами, равномерно распределёнными по всем фасадам здания. Все выбранные объекты расположены в пределах однородной транспортно-планировочной зоны, что позволяет корректно сравнивать акустические режимы при сопоставимых внешних источниках шума (близость магистралей, наличие перекрёстков, светофорное регулирование).

Двор-колодец представляет собой замкнутое пространство, образованное пятиэтажными зданиями, расположенными по периметру прямоугольной формы. Высота зданий составляет около 15 м, ширина корпусов – 12 м. Внутренний двор имеет размеры примерно 40×50 м. Точки замеров (рисунок 1) размещены на разном удалении от проезжей части: точка 1 – у въездной арки (на расстоянии 5 м от дороги), точка 2 – у подъезда первого этажа (10 м), точки 3-5 – в центре двора (25-30 м), точки 6-7 – в глубине двора, наиболее удалённой от дороги (более 40 м).

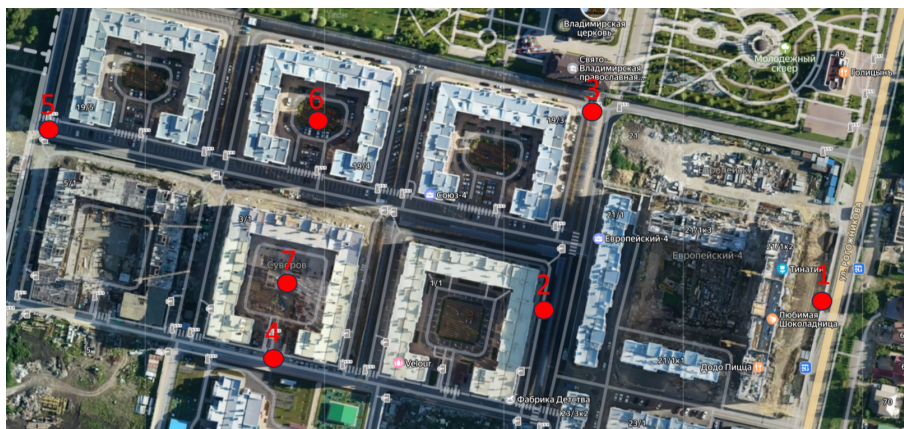


Рисунок 1 – Расположение точек замеров уровня шума на территории двора-колодца

Параллельная застройка представлена двумя протяжёнными пятиэтажными зданиями, расположенными параллельно друг другу на расстоянии 25 м. Между корпусами сформирован сквозной проезд шириной 8 м. Точки замеров (рисунок 2) расставлены вдоль фасадов и внутридворового прохода. Наибольший интерес представляют точки 3, 5 и 7, которые находятся в зоне акустической тени, но подвержены проникновению шума через торцевые разрывы. Расстояние от фасадов до проезжей части варьирует от 8 до 15 м.

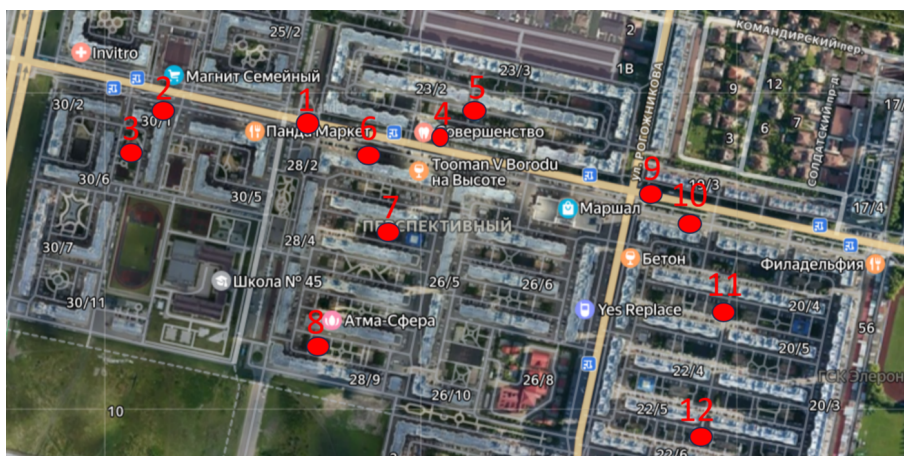


Рисунок 2 – Расположение точек замеров уровня шума на территории двора с параллельной застройкой

Перпендикулярная застройка состоит из пятиэтажных зданий, ориентированных взаимно перпендикулярно. Одно из зданий расположено вдоль магистрали на расстоянии 6 м от бордюра, другое – торцом к дороге, формируя открытый внутренний угол. Точки замеров (рисунок 3) охватывают как прифасадные зоны (точки 1-4, на расстоянии 5-10 м от дороги), так и участки в глубине двора (точки 5-6, на расстоянии 20-25 м). Такая конфигурация создаёт акустические ловушки за счёт переотражений между перпендикулярными фасадами.

Г-образная застройка образована одним Г-образным в плане зданием (5 этажей) с двумя крыльями длиной 45 и 30 м. Внутренний угол двора открыт в сторону регулируемого перекрёстка, расположенного на расстоянии 50 м от ближайшей точки фасада. Точки замеров (рисунок 4) размещены вдоль внешнего периметра (точки 1-2), внутри углового пространства (точки 3-4) и в удалённой от перекрёстка части двора (точки 5-6).



Рисунок 3 – Расположение точек замеров уровня шума на территории двора с перпендикулярной застройкой

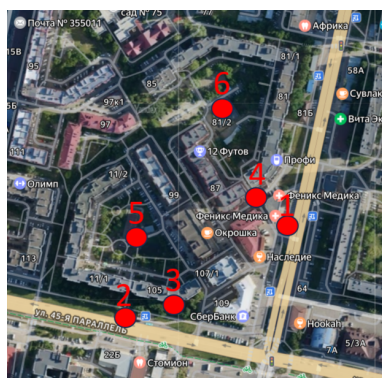


Рисунок 4 – Расположение точек замеров уровня шума на территории двора с Г-образной застройкой

Двор-колодец с четырьмя арочными проёмами – модификация замкнутого двора, в котором на каждом из четырёх фасадов имеется сквозной арочный проезд шириной 4 м и высотой 5 м. Такое решение имитирует современные жилые комплексы с проходными дворами. Точки замеров (рисунок 5) выбраны у каждого проёма (точки 1–3) и в центре двора (точки 4-5).



Рисунок 5 – Расположение точек замеров уровня шума на территории двора-колодца с четырьмя проемами по всем фасадам здания

В период проведения измерений (февраль 2026 года) отсутствовала листва на деревьях, что исключило дополнительное акустическое экранирование растительностью и позволило оценить влияние исключительно архитектурных форм. Расположение точек замеров на рисунках 1–5 выполнено в едином масштабе и с привязкой к фасадам, что обеспечивает воспроизводимость результатов.

3 Результаты и обсуждение

Полученные в ходе натурных измерений уровни шума сопоставлялись с гигиеническими нормативами, установленными СанПиН 1.2.3685-21. Согласно данному документу, для территорий, непосредственно прилегающих к жилым зданиям, эквивалентный уровень звука ($L_{\text{Аэкв.}}$), дБА в дневное время (с 7:00 до 23:00) не должен превышать 55 дБА. Поскольку измерения в выходные дни также выполнялись в утренние и вечерние часы, указанный норматив применялся одинаково для будних и выходных дней.

Средние значения зафиксированных уровней шума для каждого из пяти типов дворовых территорий приведены в таблице 1. Данные демонстрируют выраженную зависимость акустического режима как от объёмно-планировочной конфигурации застройки, так и от дня недели.

Таблица 1 – Эквивалентные уровни шума (дБА) на пяти типах дворовых территорий в будние и выходные дни

Тип двора	Будние дни, утро/вечер				Выходные дни, утро/вечер		
	Номер точки	Эквивалентный уровень звука ($L_{\text{Аэкв.}}$), дБА	Минимальный уровень звука ($L_{\text{Амин.}}$), дБА	Максимальный уровень звука ($L_{\text{Амакс.}}$), дБА	Эквивалентный уровень звука ($L_{\text{Аэкв.}}$), дБА	Минимальный уровень звука ($L_{\text{Амин.}}$), дБА	Максимальный уровень звука ($L_{\text{Амакс.}}$), дБА
Двор-колодец	№1	67,9/67,3	60,1/58,4	75,6/76,1	65,4/65,7	58,6/58,9	72,1/72,4
	№2	60,2/61,2	48,9/49,7	71,4/72,6	56,5/56,3	45,6/44,3	67,4/68,2
	№3	60,3/61,5	49,3/50,1	71,3/72,9	57,7/57,3	46,7/46,2	68,7/68,4
	№4	59,6/60,4	48,6/49,4	70,6/71,4	57,1/57,6	45,9/46,4	68,3/68,7
	№5	58,6/59,1	47,3/47,8	69,8/70,1	56,3/57,1	44,8/45,9	67,7/68,2
	№6	54,4/53,9	43,4/44,4	65,4/60,3	48,5/49,8	41,2/43,2	55,7/56,4
	№7	52,4/51,3	42,1/42,2	62,7/63,4	47,6/48,4	40,2/41,2	54,9/55,6
Параллельная застройка	№1	70,0/64,4	63,2/54,8	76,8/73,9	66,1/66,8	59,5/60,2	72,6/73,4
	№2	64,8/68,7	57,4/63,8	72,1/73,5	64,9/64,75	58,4/57,9	71,4/71,6
	№3	55,6/52,5	48,7/49,9	62,4/55	52,8/52,9	45,5/44,6	60,1/61,2
	№4	61,0/59,0	51,8/52,1	70,1/65,8	64,1/64,2	56,9/56,2	71,2/72,2
	№5	55,5/53,9	49,1/51,1	61,9/56,7	53,3/53,3	46,3/44,2	60,2/62,4
	№6	67,7/65,1	62,7/56,8	72,6/73,4	64,4/65,7	58,3/59,5	70,5/71,8
	№7	55,2/49,9	47,7/46,6	62,7/53,2	52,8/53,8	45,4/43,8	60,1/63,7
	№8	50,6/51,9	45,6/49,4	55,5/54,4	51,2/47,5	44,2/40,1	58,2/54,9
	№9	69,0/65,7	62,1/53,2	75,9/78,2	65,5/66,7	58,9/60,2	72,1/73,1
	№10	61,8/65,9	53,4/61,1	70,2/70,6	62,1/63,6	54,6/56,8	69,5/70,4
	№11	54,9/48,5	48,5/45,1	61,2/51,9	52,9/52,7	44,3/42,9	61,5/62,4
	№12	50,9/49,7	46,8/45,3	54,9/54,1	49,6/49	45,4/41,5	53,7/56,5

Продолжение табл. 1

Тип двора	Будние дни, утро/вечер				Выходные дни, утро/вечер		
	Номер точки	Эквивалентный уровень звука ($L_{Аэкв.}$), дБА	Минимальный уровень звука ($L_{Амин.}$), дБА	Максимальный уровень звука ($L_{Амакс.}$), дБА	Эквивалентный уровень звука ($L_{Аэкв.}$), дБА	Минимальный уровень звука ($L_{Амин.}$), дБА	Максимальный уровень звука ($L_{Амакс.}$), дБА
Перпендикулярная застройка	№1	71,0/72,4	63,2/65,2	78,8/79,5	66,5/67,5	60,1/61,4	72,9/73,5
	№2	69,9/70,3	62,4/62,7	77,4/77,9	65,6/66,1	60,4/60,4	70,7/71,8
	№3	64,9/66,0	57,6/60,2	72,1/71,8	61,5/61,8	54,7/53,7	68,3/69,9
	№4	67,1/67,6	60,3/61,1	73,8/74	61,1/61,4	53,7/52,6	68,5/70,1
	№5	59,0/62,0	53,2/56,8	64,8/67,1	52,9/53,1	45,1/47,2	60,7/58,9
	№6	55,7/56,0	49,7/51,4	61,7/60,6	49,3/48,0	42,4/41,7	56,1/54,3
Г-образная застройка	№1	67,4/66,4	61/58,7	73,7/74,1	60,1/60,7	53,7/54,1	66,4/67,2
	№2	68,5/68,2	61,4/60,2	75,6/76,2	60,2/58,7	54,2/51,7	66,2/65,7
	№3	65,3/65,2	59,4/58,1	71,2/72,2	57,2/55,7	51,1/50,1	63,2/61,3
	№4	63,6/62,7	57,4/56,7	69,7/68,7	56,0/56,9	51,5/52,4	60,4/61,3
	№5	57,0/56,6	49,8/49,3	64,1/63,9	51,1/49,6	43,2/44,3	58,9/54,9
	№6	55,1/52,2	48,5/44,2	61,7/60,2	49,6/48,3	42,4/42	56,8/53,7
Двор-колодец с четырьмя проемами по всем фасадам здания	№1	66,5/65,5	59,7/58,6	73,2/72,4	65,0/63,8	58,4/57,2	71,6/70,3
	№2	59,8/62,0	54,2/57,7	65,3/66,3	60,2/59,6	54,1/53,8	66,2/65,4
	№3	61,8/60,0	55,3/54,2	68,2/65,7	60,8/60,3	54,7/54,4	66,9/66,1
	№4	47,9/49,8	41,1/42,4	54,6/57,1	46,2/46,4	40,3/41,5	52/51,3
	№5	51,4/51,5	44,6/47,6	58,2/55,3	47,6/48,1	41,9/42,7	53,2/53,4

Для выявления системных закономерностей выполнена факторная систематизация первичных данных. В рамках измерительных процедур зафиксированы следующие акустические параметры: эквивалентный уровень звука ($L_{Аэкв.}$), выраженный в дБА; максимальный уровень звука ($L_{Амакс.}$), выраженный в дБА; минимальный уровень звука ($L_{Амин.}$), выраженный в дБА. При этом под минимальным уровнем шума подразумевался уровень, учитывающий воздействие транспортного потока. Несмотря на наличие фонового шума, он изначально принимался в расчёт как неотъемлемый компонент акустической среды. Основной исследовательский фокус был сосредоточен на оценке неравномерности транспортного потока и обусловленной ею вариативности шумовой нагрузки, генерируемой автотранспортными средствами.

В таблице 2 для каждого типа дворовой территории обобщены: наличие и локализация превышений нормативных уровней в будние дни, основные пространственно-архитектурные причины этих превышений (ширина акустических проёмов, этажность, удалённость от проезжей части, наличие регулируемого перекрёстка), а также динамика шумовой нагрузки в выходные дни. Такой подход позволяет не только верифицировать результаты измерений, но и выделить наиболее значимые градостроительные факторы, определяющие акустический комфорт на селитебных территориях.

Как следует из таблицы 2, для параллельной, перпендикулярной и Г-образной конфигураций характерны превышения нормативных уровней шума в будние дни. Выходные дни благодаря снижению транспортной нагрузки обеспечивают акустический комфорт на внутриквартальных территориях для всех типов застройки, за исключением перпендикулярной и Г-образной, где превышения сохраняются в точках, наиболее близких к дороге (точки 1-4). Ниже приведён детальный анализ причин выявленных различий.

Таблица 2 – Характеристика акустического режима по типам застройки в будние и выходные дни

Тип застройки	Превышения в будни	Основные причины	Превышения в выходные
Двор-колодец	нет	экранирование, удалённость от дороги	нет
Параллельная	да (точки 3,5,7)	широкие акустические проёмы, параллельное расположение	нет
Перпендикулярная	да (все точки 1-6)	минимальное расстояние до дороги (менее 10 м), невысокая этажность	да (точки 1-4)
Г-образная	да (точки 1-6)	перекрёсток, Г-образная форма	да (точки 1-4)
Колодец с 4 проёмами	нет	замкнутая конфигурация, массивные фасады	нет

Параллельная застройка. Превышения в будние дни в точках 3, 5 и 7 обусловлены широкими акустическими проёмами между корпусами и параллельным расположением зданий, что ослабляет экранирующий эффект. В выходные дни превышения не фиксируются.

Перпендикулярная застройка. В будние дни превышения зарегистрированы во всех измерительных точках (1-6). Основные факторы: минимальное расстояние до проезжей части (менее 10 м), невысокая этажность (5 этажей) и перпендикулярная ориентация фасадов, формирующая «звуковые ловушки» за счёт многократных отражений. В выходные дни превышения сохраняются в точках 1-4 (прилегающих к дороге), тогда как в глубине двора (точки 5-6) уровни шума снижаются до нормативных значений.

Г-образная застройка. В будние дни превышения отмечены во всех точках (1-6). Причины – близость регулируемого перекрёстка (50 м) и Г-образная форма здания, которая не создаёт замкнутого экрана и способствует проникновению шума. В выходные дни превышения также сохраняются в точках 1-4 (ближайших к перекрёстку и проезжей части), тогда как в точках 5-6 уровни шума соответствуют норме.

Замкнутые дворы-колодцы (обычный и оборудованный четырьмя арочными проёмами) обеспечивают нормативные уровни шума как в будние, так и в выходные дни. Это объясняется выраженным экранирующим эффектом, создаваемым замкнутой конфигурацией зданий, а также значительными геометрическими параметрами (высота, ширина, массивность фасадов), которые затрудняют проникновение звука во внутривдоровое пространство.

На основе выполненного экспериментального исследования предложена математическая модель для прогнозирования эквивалентного уровня шума в расчётной точке внутри дворовых пространств.

Шум автомобильного транспорта, движущегося по магистрали, распространяется в окружающую застройку. Здания, расположенные вдоль дороги, создают акустическую тень и формируют поле переотражений. При определённых конфигурациях возникает эффект «звуковой ловушки» – многократные отражения, которые могут, как увеличивать, так и уменьшать уровни шума внутри двора по сравнению с экранированием одиночным зданием.

Предлагаемая модель позволяет рассчитать эквивалентный уровень шума L в дБА в расчётной точке внутри застройки на основе следующих параметров:

- параметров транспортного потока (интенсивность N , светофорный цикл T и t_{stop});
- геометрических размеров зданий (высота h , ширина a , длина l);
- расстояние от дороги до фасада первого здания r ;
- акустических свойств поверхностей (коэффициент звукопоглощения α).

Модель опирается на данные фактических замеров и на теоретические соотношения, изложенные в диссертации М.В. Буториной [9].

Согласно подходу М.В. Буториной, уровень звука внутри двора, ориентированного в сторону от источника, описывается формулой для цилиндрической или квазичилиндрической волны:

$$L_{двор} = L_{A_k} + 10 \lg \left[\frac{(1 - \alpha_{зд}) h}{2\pi^3 a R} \arctg \frac{l}{2a} \arctg \frac{l}{2R} + \frac{4l(1 - \alpha_{зд})}{\sum_{i=1}^n \alpha_i S_i} \right], \quad (1)$$

где L_{A_k} – уровень звука у верхнего ребра здания (на границе акустической тени) (дБА); α – коэффициент звукопоглощения фасада здания; h, a, l – высота, ширина, длина здания (м); R – расстояние от здания до расчетной точки внутри двора (м); α_i, S_i – коэффициенты звукопоглощения и площади ограждающих поверхностей двора; $\sum \alpha_i S_i$ – эквивалентная площадь звукопоглощения двора (м²).

Дополнительно в ходе акустического моделирования городской среды нами была выведена эмпирическая зависимость [10], позволяющая оценить уровень шума непосредственно от транспортного потока с учётом светофорного регулирования и этажности застройки:

$$L = (6,682 \lg(N + 1) + 48,82) \left(1 + 0,097 \frac{t_{stop}}{T} \right) (1 - 0,016F), \quad (2)$$

где N – количество автотранспорта; T – длительность цикла светофора (с); t_{stop} – время красного сигнала светофора (с); F – этажность зданий.

Принимая полученную величину за опорный уровень $L_{дорога}$, общую модель затухания можно записать в виде:

$$L_{двор} = L_{дорога} - \Delta L_{дифр} - \Delta L_{полг} + 10 \lg \left(\frac{R_0}{R} \right)^n, \quad (3)$$

где $\Delta L_{дифр}$ – снижение за счет дифракции на здании; $\Delta L_{полг}$ – дополнительное снижение за счет звукопоглощения во дворе; $n = 1$ для цилиндрической волны, $n = 2$ для сферической (определяется расстоянием R по таблице).

Используя результаты замеров $L_{дорога}$ (у проезжей части) и $L_{двор}$ (внутри двора), затухание можно выразить через эмпирический коэффициент экранирования $K_{экр}$ и коэффициент поглощения двора $K_{полг}$:

$$L_{двор} = L_{дорога} - K_{экр}(l, a, h) - K_{полг}(\bar{\alpha}, S_{двора}) - \Delta L_{расст.}$$

После преобразований получен калибровочный вид расчётной формулы:

$$L_{двор} = L_{дорога} - 10 \lg \frac{a}{r_0} - 10 \lg \frac{R}{r_0} + 10 \lg \left(\arctg \frac{l}{2a} \arctg \frac{l}{2R} \right) + \\ + 10 \lg \left(1 + \frac{8\pi^2 a R S_{двора} \bar{\alpha}}{lh(1 - \bar{\alpha})} \right) + C, \quad (4)$$

где r_0 – опорное расстояние для нормирования (м); $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения поверхностей двора; $S_{\text{двора}}$ – суммарная площадь ограждающих поверхностей двора (м²); C – константа, определяемая по замерам.

На основе выполненных натурных замеров с помощью нелинейного метода наименьших квадратов (алгоритм Левенберга – Марквардта), реализованного в среде Python с применением библиотеки SciPy, была вычислена константа $C = -6,931$ дБА. Среднеквадратическая ошибка модели составляет $\sigma = 3,5$ дБА.

Итоговая модель имеет следующий вид:

$$L_{\text{двор}} = L_{\text{дорога}} - 10\lg \frac{a}{r_0} - 10\lg \frac{R}{r_0} + 10\lg \left(\arctg \frac{l}{2a} \arctg \frac{l}{2R} \right) + \\ + 10\lg \left(1 + \frac{8\pi^2 a R S_{\text{двора}} \bar{\alpha}}{lh (1 - \bar{\alpha})} \right) - 6,931, \quad (5)$$

Полученная калиброванная модель демонстрирует приемлемую точность (погрешность около 3,5 дБА) и может использоваться для инженерных оценок уровня шума в расчётной точке внутри дворовых пространств на этапе градостроительного проектирования. Основные ограничения модели связаны с допущением о цилиндрическом характере волны на средних расстояниях и необходимостью предварительного определения среднего коэффициента звукопоглощения поверхностей двора. Вместе с тем учёт геометрических параметров зданий, характеристик транспортного потока и светофорного регулирования делает модель применимой для широкого круга типовых ситуаций в условиях городской застройки.

Сопоставление расчётных значений с данными натурных измерений подтверждает адекватность предложенной модели: величина среднеквадратической ошибки (3,5 дБА) находится в пределах, допустимых для инженерных акустических расчётов. Тем не менее, для повышения универсальности модели и распространения её на другие типы застройки и дорожные условия требуется дальнейшая валидация на большем числе объектов с различными объёмно-планировочными характеристиками.

Заключение

В результате проведённого исследования на примере пяти типов дворовых территорий г. Ставрополя установлено, что конфигурация застройки является ключевым фактором, определяющим уровень шумового загрязнения на селитебных территориях. Наиболее благоприятные акустические условия зафиксированы в замкнутых дворах-колодцах (в том числе оборудованных арочными проёмами), где выраженный экранирующий эффект зданий и многократные отражения обеспечивают снижение уровней шума во внутривдоровом пространстве до значений, не превышающих гигиенические нормативы (55 дБА днём). Наибольшие превышения нормативов характерны для перпендикулярной и Г-образной застройки, а также для параллельной застройки при малых расстояниях до проезжей части и широких акустических проёмах.

Разработанная математическая модель, калиброванная по натурным замерам (среднеквадратическая ошибка $\sigma = 3,5$ дБА), позволяет с достаточной для инженерных расчётов точностью прогнозировать эквивалентный уровень шума в расчётной точке внутри застройки с учётом геометрических параметров зданий, акустических свойств поверхностей и характеристик транспортного потока (интенсивности, светофорного цикла, этажности). Сопоставление расчётных значений с экспериментальными данными подтверждает адекватность модели, однако для повышения её универсальности

требуется дальнейшая валидация на большем числе объектов с различными объёмно-планировочными характеристиками.

Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при градостроительном проектировании для выбора оптимальной объёмно-планировочной структуры кварталов, обоснованного размещения акустических проёмов и применения звукопоглощающих фасадных материалов, что позволит снизить шумовую нагрузку и повысить экологическую безопасность городской среды.

Список использованных источников

1. Kang, J. Soundscape in city and built environment: current developments and design potentials. *City Built Enviro* 1, 1 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44213-022-00005-6>
2. Craw Badino E. et al. Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon // *Building and Environment*. – 2019. – Vol. 157. – P. 242-256.
3. Salman M. Y., Hasar H. Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques // *Sustainable Cities and Society*. – 2023. – Vol. 94. – P. 104567.
4. Chen Z. et al. Empirical assessment and development patterns of Smart Cities in China based on evaluation indicators for new-type smart cities (GB/T 33356-2022) // *Information Geography*. – 2026. – С. 100048.
5. Шабарова А. В. Формирование акустического комфорта в различных типах городской застройки / А. В. Шабарова, М. В. Буторина // *Инвестиции, градостроительство, технологии как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения : Материалы XIV Международной научно-практической конференции. В 2-х частях, Томск, 12-14 марта 2024 года. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 465-472. – EDN ATYOUJ.*
6. Feriani S. J., EngsigKarup A. P., Jeong C.H. Impact of building façade design on road and rooftop noises using the discontinuous Galerkin finite element method // *Applied Acoustics*. – 2025. – Vol. 240. – P. 110935. – ISSN 0003682X.
7. ГОСТ 23337-2014. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. – М. : Стандартинформ, 2014.
8. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
9. Буторина М.В. Разработка научных и методических основ картирования шума транспорта на территории городской застройки: автореф. дис. канд. техн. наук: 01.04.06. – Санкт-Петербург, 2020.
10. Ледовской, Р. А. Акустическое моделирование городской среды: исследование влияния транспортно-планировочных решений на шумовую нагрузку / Р. А. Ледовской, И. В. Бегдай, М. Д. Колбин // *Защита от шума и вибрации : Сборник трудов X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 01-03 октября 2025 года. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова, 2025. – С. 104-115. – EDN PBLJWU.*

References

1. Kang, J. Soundscape in city and built environment: current developments and design potentials. *City Built Environ* 1, 1 (2023). <https://doi.org/10.1007/s44213-022-00005-6>
2. Craw Badino E. et al. Effect of façade shape and acoustic cladding on reduction of leisure noise levels in a street canyon // *Building and Environment*. – 2019. – Vol. 157. – P. 242-256.
3. Salman M. Y., Hasar H. Review on environmental aspects in smart city concept: Water, waste, air pollution and transportation smart applications using IoT techniques // *Sustainable Cities and Society*. – 2023. – Vol. 94. – P. 104567.
4. Chen Z. et al. Empirical assessment and development patterns of Smart Cities in China based on evaluation indicators for new-type smart cities (GB/T 33356-2022) // *Information Geography*. – 2026. – P. 100048.
5. Shabarova A. V. Formation of Acoustic Comfort in Various Types of Urban Development / A. V. Shabarova, M. V. Butorina // *Investments, Urban Planning, and Technologies as Drivers of Socio-Economic Development and Improving the Quality of Life: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference*. In 2 parts, Tomsk, March 12-14, 2024. – Tomsk: Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, 2024. – Pp. 465-472. – EDN ATYOUJ.
6. Feriani S. J., Engsig-Karup A. P., Jeong C.H. Impact of building façade design on road and rooftop noises using the discontinuous Galerkin finite element method // *Applied Acoustics*. – 2025. – Vol. 240. – P. 110935. – ISSN 0003682X.
7. GOST 23337-2014. Noise. Methods for measuring noise in residential areas and in rooms of residential and public buildings. – Moscow: Standartinform, 2014.
8. SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic Standards and Requirements for Ensuring the Safety and (or) Harmlessness of Human Habitat Factors".
9. Butorina, M.V. Development of Scientific and Methodological Foundations for Mapping Transport Noise in Urban Areas: Abstract of the Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 01.04.06. – Saint Petersburg, 2020.
10. Ledovskoy, R. A. Acoustic Modeling of the Urban Environment: Study of the Influence of Transport and Planning Solutions on Noise Load / R. A. Ledovskoy, I. V. Begday, and M. D. Kolbin // *Protection from Noise and Vibration: Proceedings of the 10th All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation*, St. Petersburg, October 1-3, 2025. – Saint Petersburg: Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov, 2025. – Pp. 104-115. – EDN PBLJWU.