

АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ.
ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534.75, 612.85

ЗВУКОВЫЕ ЛАНДШАФТЫ В ГОРОДСКОЙ СРЕДЕ:
СУБЪЕКТИВНОЕ ВОСПРИЯТИЕ И ОБЪЕКТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ

© 2024 г. Л. К. Римская-Корсакова^{a,*}, Н. Г. Канев^b, А. И. Комкин^b, С. А. Шуляпов^a

^aАО “Акустический институт имени академика Н.Н. Андреева”, ул. Шверника 4, Москва, 117036 Россия

^bМГТУ имени Н.Э. Баумана, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1, Москва, 105005 Россия

*e-mail: lkrk@mail.ru

Поступила в редакцию 12.06.2024 г.

После доработки 22.09.2024 г.

Принята к публикации 29.10.024 г.

Международная организация по стандартизации (ISO) ввела термин “звуковой ландшафт”, определяющий “акустическую среду, воспринимаемую или понимаемую человеком/людьми в контексте”, а также предложила меры для количественной оценки эмоциональных реакций человека на звуковую среду. Целью данной работы была верификация стандартного метода ISO, в котором эмоциональные реакции человека оценивали координатами точек на плоскости “Приятность-Событийность”, где координата “Приятности” оценивала то, насколько среда была приятной для субъекта, т.е. свойства субъекта, а координата “Событийности” – то, насколько среда была событийной, т.е. свойства среды. Для получения координат точек проводили аудиовизуальную экспертизу среды, вместе с которой измеряли акустические характеристики и используемые в психоакустике показатели субъективных качеств звуковой среды. Характеристики и показатели сопоставляли с координатами “Приятности” и “Событийности”. Показано, что для человека звуковая среда могла быть вполне приятной, когда физические характеристики превышали установленные санитарные нормы или, наоборот, неприятной, когда физические характеристики не превышали такие нормы. Полученные результаты подтвердили обоснованность, информативность и целостность метода оценки звуковых ландшафтов, а также его доступность для непрофессиональных экспертов. Предложенные меры могут быть использованы для инженерного проектирования благоприятной звуковой среды городских территорий.

Ключевые слова: воздействие шума, физические характеристики шума, субъективные показатели качества шума, атрибуты воспринимаемого аффективного качества, модели связи, инженерное проектирование

DOI: 10.31857/S0320791924060103, **EDN:** JTKWMA

1. ВВЕДЕНИЕ

Шумовое загрязнение признают второй по значимости проблемой для здоровья человека и окружающей среды в городах после загрязнения воздуха [1].

В настоящее время можно выделить три подхода к количественной оценке воздействия шума на человека и разработке мер снижения его негативного влияния. Первый классический подход назовем физическим. В рамках этого подхода шумом окружающей среды называют нежелательный или вредный наружный шум, возникающий в результате деятельности человека и имеющий подвижные (транспорт) и стационарные (любые механизмы, промышленные предприятия и т.д.) источники [2, 3]. Шумовое воздействие на человека

оценивают на основании измеряемых физических характеристик: уровней звукового давления, октавных спектров, уровней звука, определенных за определенное время воздействия и др. Для борьбы с шумами разных источников существует система санитарного нормирования, действующая во многих странах мира, в т.ч. в России [4]. Такой подход привел к значительному снижению уровней шумов окружающей среды. Однако не редки случаи, когда раздражающими являются шумы, уровни которых не превышают допустимые нормы.

Второй подход к оценке шумового раздражения и разработке мер по управлению шумом можно назвать психоакустическим. Он подразумевает выявление неприятных субъективных качеств

звуков, связанных с определенными физическими характеристиками звуковой среды. Ощущение звукового давления называют *громкостью*. Громкие шумы крайне неприятны для человека. Громкость является интегральным субъективным качеством. Помимо звукового давления и частоты она зависит от длительности шума, от расположения звуковых источников, возникающих эффектов слуховой суммации и маскировки [5]. Модуляции шума также могут быть неприятны для человека [6]. При частотах модуляции менее 20 Гц человек ощущает *флуктуации громкости* шума, а при частотах в 15–250 Гц – *хриплость* шума. Неприятные слуховые ощущения вызывают шумы с высокочастотными и тональными составляющими. В таком случае говорят о появлении субъективных качеств, названных *резкостью* и *тональностью*. Для перечисленных качеств введены меры оценки и разработаны стандартные методы оценки [7–14]. Поскольку на основании отдельных субъективных качеств нельзя оценить неприятность шума в целом, была введена метрика краткосрочного психоакустического раздражения [6]. Она учитывает разные субъективные качества, но не учитывает мнение людей о звуке, их эмоциональное состояние, эстетические и когнитивные предпочтения. Метрику раздражения применяют для контроля хода мероприятий по улучшению качеств шумов самых разных технических средств от кофемолок до ветряных турбин, в том числе внешних и внутренних шумов автомобильного транспорта [15]. Ее используют при выборе конструкции и материалов проектируемых самолетов [16–18]. В РФ такой подход пока не нашел своего широкого применения [19].

Раздражение человека шумом может быть обусловлено не только его физическими свойствами или особенностями слухового восприятия. Для человека в зависимости от внешних условий, потребностей и внутреннего настроя благоприятной может быть как спокойная деловая, так и празднично-громкая звуковая среда. Третий подход к управлению шумом окружающей среды, который *учитывает мнение людей о среде*, называют “*звуковым ландшафтом*” (*soundscape*) [20–23]. Подход зародился в конце 1960-х гг. и стал в настоящее время самостоятельной областью [24–26]. Когда люди просят свободно описать, как они воспринимают окружающую звуковую среду в ситуациях повседневной жизни, они чаще всего реагируют эмоционально, указывая, насколько среда была приятной или неприятной [27, 28]. Этот факт заставил исследователей искать те свойства звуковой среды, на которые прежде всего обращает внимание человек при ее описании и в которых отражаются *свойства среды* и *свойства субъекта* [29, 30]. В настоящее время проблемы звуковых ландшафтов интересуют специалистов не только в области психологии и акустики, но и экологии, этнологии, географии,

архитектуры, ландшафтного планирования, музыки, теле- и радиовещания и многих других. Поэтому, чтобы иметь основу для общения специалистов разных специальностей, был разработан международный стандарт ISO/TS 12913 “Акустика. Звуковой ландшафт” [31–33].

Стандарт ISO/TS 12913 ввел понятие “*звуковой ландшафт*”, определил количественные меры оценки эмоциональных реакций человека на звуковую среду, предложил методы их оценки. Создавая модели связи мер оценки звуковых ландшафтов с акустическими характеристиками внешнего шума и его психоакустическими показателями качества, можно предсказать как изменится отношение человека к среде при изменении свойств шума [34–37], а также решать задачи инженерного проектирования благоприятной окружающей среды для человека, проживающего в шумных городах и населенных пунктах. В настоящее время подход звукового ландшафта находится в стадии активного внедрения.

В данной работе приводятся результаты верификации одного из стандартных методов оценки звуковых ландшафтов [31–33]. Целью работы было измерение введенных стандартом мер оценки звуковых ландшафтов, сопоставление этих мер с физическими характеристиками и показателями субъективных качеств звуков окружающей среды, с оценками восприятия звуковой человеком.

В работе принята следующая структура изложения материала. Вначале перечисляются акустические характеристики и показатели субъективных качеств звуков окружающей среды, которые были получены в рамках настоящего исследования (раздел 2). Вводится определенное стандартом понятие звуковой ландшафт [30] и приводится описание метода его оценки [31, 32] (раздел 3). Излагаются результаты аудиовизуальной экспертизы звуковых ландшафтов в разных локациях вокруг МГТУ им. Н.Э. Баумана (раздел 4). Проводится сопоставление мер оценки звуковой среды и звуковых ландшафтов (раздел 5).

2. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПОКАЗАТЕЛИ СУБЪЕКТИВНЫХ КАЧЕСТВ ЗВУКОВ

Основные величины и процедуры физических измерений шума на местности изложены в российских стандартах [2, 3], а допустимые уровни звукового давления шумов на различных территориях указаны в санитарных правилах [4].

В данной работе для измерений физических характеристик звуков использовали измеритель шума Экофизика-110А. Измеряли уровень звукового давления L (дБА); максимальный уровень звукового давления L_{max} (дБА); разность уровней процентного превышения ($L_5 - L_{95}$) (дБА), где L_x – уровень

X -процентного превышения, получаемый как корректированный уровень звукового давления, превышенный в течение X -процентов времени на заданном временном интервале.

Наряду с измерениями физических характеристик, производили записи временных профилей звуков, длительностью ~ 60 с, на основании которых рассчитывали показатели субъективных качеств звуков, а также метрику краткосрочного психоакустического раздражения *PAA*. Для расчетов показателей и метрики использовали интегрированный комплекс MATLAB, в котором реализованы стандартные алгоритмы расчетов таких показателей [7–14].

Ниже перечислены оцениваемые нами субъективные качества и метрика раздражения *PAA*, приводятся принятые в психоакустике условные обозначения показателей, единицы их измерений, особенности алгоритмов расчетов.

Громкость звука N (сон), громкости X -процентного превышения, N_X (сон), т.е. громкость, которая превышает в течение X процентов времени на заданном временном интервале, а также разность ($N_{10} - N_{90}$). Громкость в 1 сон соответствует громкости чистого тона частотой 1000 Гц с уровнем $L = 40$ дБ. Стандартный алгоритм расчета громкости N [7–11] предусматривает суммирование удельных громкостей N' в наборе возбужденных звуком слуховых фильтров. N' связана со звуковым давлением степенной функцией. Расчет N' учитывает слуховую чувствительность, эффекты адаптации и маскировки, свойства бинаурального суммирования. Как и реальная [5, 6], расчетная громкость N тем выше, чем больше звуковое давление, длительность и ширина спектра звука.

Резкость звука S (акум) связывают с ощущениями, вызванными присутствием высокочастотных компонент в звуке [6]. Эталонный звук в 1 акум соответствует узкополосному шуму с уровнем $L = 60$ дБ, центральной частотой 1 кГц и шириной полосы ΔF менее 150 Гц. Метод расчета S основан на расчетах удельных громкостей N' [12]. Он предусматривает вычисление отношения интеграла свертки громкостей N' с весовым коэффициентом g к общей громкости звука [6]. Коэффициент g зависит от центральной частоты слухового фильтра f_0 : он равен единице для фильтров, у которых $f_0 < 2900$ Гц и пропорционально возрастает от 1 до 4 для фильтров, у которых $2900 < f_0 < 13500$ Гц. Более раздражающими являются звуки, которые имеют частотные компоненты выше ~ 3000 Гц. Резкость звука также коррелирует с громкостью: чем больше громкость, тем резче звук.

Ощущение *флуктуаций* FS (васил) возникает при низких частотах модуляции ($f_{\text{mod}} < 20$ Гц) [6]. Ощущение FS в 1 васил вызывает амплитудно-модулированный (AM) тон с уровнем $L = 40$ дБ, частотой

несущей $f = 1000$ Гц, частотой и глубиной модуляции 4 Гц и 100%, соответственно. В основе расчета показателя качества FS лежат оценки глубин слуховой маскировки ΔL_m коротких тонов, предъявляемых на фоне АМ звуков с $f_{\text{mod}} = 100\%$ [14]. Наиболее неприятные ощущения *флуктуаций* возникают при f_{mod} в 4 Гц. Для широкополосных звуков расчет FS предполагает суммирование глубин маскировки ΔL_m , полученных в наборе возбужденных слуховых фильтров. Узкополосные шумы вызывают ощущение FS при $f_{\text{mod}} \sim 0.64\Delta F$, где ΔF – ширина полосы шума.

Ощущение *хрипости* R (аспер) вызывают звуки с частотами модуляций f_{mod} в диапазоне частот 15–250 Гц [6]. Максимальную хрипость имеют звуки при $f_{\text{mod}} \approx 70$ Гц. Ощущение в 1 аспер вызывает АМ тон с уровнем $L = 60$ дБ, частотой несущей $f = 1000$ Гц, частотой модуляции $f_{\text{mod}} = 70$ Гц, глубиной модуляции $m = 100\%$. В основе расчета показателя качества R , как и расчета FS [14], лежат оценки глубин маскировки ΔL_m , но, в отличии от FS , значения R пропорциональны произведению частоты модуляции на глубину маскировки, т.е. $R \sim f_{\text{mod}} \Delta L_m$.

На основании полученных оценок N , S , FS , R рассчитывали метрику краткосрочного психоакустического раздражения *PAA*:

$$PAA = N \left(1 + \sqrt{W_S^2 + W_{FSR}^2} \right),$$

$$\text{где } W_{FSR} = \frac{2.18}{N^{0.4}} (0.4FS + 0.6R),$$

$$W_s = \begin{cases} 0.25(S - 1.75) \log_{10}(N + 10), & \text{при } S > 1.75, \\ 0, & \text{при } S \leq 1.75. \end{cases}$$

Метрика раздражения *PAA* была выведена эмпирическим путем в ходе слуховых экспериментов [6]. Наибольший вклад в метрику вносит показатель громкости N .

Другой подход к оценке метрик раздражения *PAA* предусматривает слуховое ранжирование некоторого набора шумов по степени раздражения и построение методом множественной линейной регрессии аналитического уравнения, связывающего ранги шумов с вычисленными для них показателями качества N , S , FS , R (см. [19]).

3. СТАНДАРТНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ЗВУКОВЫХ ЛАНДШАФТОВ

Концепция “звуковой ландшафт” фокусируется на поиске того, как звук воспринимается и понимается отдельными людьми и/или социальными группами. Международная организация по стандартизации определила звуковой ландшафт как “акустическую среду, воспринимаемую или переживаемую и/или понимаемую человеком или



Рис. 1. Элементы концепции звукового ландшафта.

людьми в контексте” [31]. Термин “звуковой ландшафт” отличается от терминов “акустическая среда” или “шум окружающей среды”, так как учитывает перцептивное восприятие среды человеком (рис. 1).

“Контекст” устанавливает связь между человеком и его деятельностью, местом и временем, он может влиять на восприятие звукового ландшафта через “слуховые ощущения”, через “интерпретацию слуховых ощущений”, через “ответы” и реакции человека на звуковую среду. “Слуховые ощущения” учитывают восприятие акустической среды человеком. “Интерпретация слуховых ощущений” – это переживания и ожидания человека, с учетом намерений и причин пребывания в заданном месте. Реакция человека на звуковую среду зависят от эмоционального, психологического, физиологического состояния, способностей контролировать себя под воздействием звуков, времени суток и условий освещения, личной деятельности и деятельности других. “Результаты” представляют собой долгосрочное последствие, обусловленное звуковой средой (например, человек принимает решение посещать или избегать какое-либо место).

Центральное место в изучении звуковых ландшафтов занимает поиск соответствия между выносимыми экспертами оценками среды, отражающими ситуацию и контекст (личный, социальный, культурный и др.), и характеристиками среды, отражающими динамические и временные изменения звуковых ландшафтов в течение дня, месяца, сезона.

В данной работе для оценки звуковых ландшафтов мы использовали стандартный метод А [32, 33]. Метод предусматривает проведение групповой “звуковой прогулки”, в ходе которой эксперты анализируют слышимые звуки реальной или виртуальной среды и заполняют анкету, а организаторы оценивают характеристики звуковой среды.

Вопросы первой части анкеты были направлены на идентификацию экспертами типов слышимых в среде звуков. Приняты три типа звуков. Первый тип – это “Шумы”, т.е. технологические звуки, под которыми понимают звуки разных технических средств, дорожные и строительные шумы, и

звуки от конструкций, заводов и машин и пр. Второй тип – “Звуки присутствия людей”, т.е. голоса, разговор, смех, шаги, пение, играющие дети и пр., и третий тип – “Звуки природы”, т.е. пение птиц, звуки текущей воды, ветра в кустах и деревьях и пр. Как правило, люди считают среду приятной, если в ней преобладают звуки природы; неприятной, если преобладают технологические звуки, и насыщенной событиями, если преобладают звуки присутствия человека.

Каждому типу звуков эксперт должен был присвоить ранг на порядковой шкале, содержащей пять категорий ответов от 1 (совсем нет) до 5 (полностью доминирует). Ответ группы экспертов соответствовал медиане, как мере центральной тенденции, а диапазон шкалы принимали за меру дисперсии.

Вторая часть анкеты была посвящена анализу аффективного или эмоционального воспринимаемого качества звуковой среды. В основе такого анализа лежит разработанная Дж. Расселлом модель эмоций [27, 28], в соответствии с которой эксперты должны были оценить 8 атрибутов воспринимаемого качества среды по пятиранговой порядковой шкале от 5 (“полностью согласен”) до 1 (“полностью не согласен”). Эти атрибуты: “приятная” (мера *pleasant*), “яркая”, “захватывающая”, “динамичная” (мера *vibrant*), “насыщенная событиями” (мера *eventful*), “хаотичная” (мера *chaotic*), “раздражающая” (мера *annoying*), “монотонная” (мера *monotonous*), “лишенная событий” (мера *ineventful*), “спокойная” (мера *calm*) [33]. Групповой ответ экспертов также соответствовал медиане.

Следует указать, что перевод названия атрибутов качеств с английского на другие языки является отдельной научной задачей, в решении которой принимает участие представительная международная коллаборация [38, 39]. Поэтому использованный нами перевод названия атрибутов на русский язык не следует считать окончательным.

На рис. 2а приводится пример отображения 8 атрибутов качества среды двух воображаемых звуковых ландшафтов ЗЛ1 и ЗЛ2 на циркумплексной плоскости. Такая плоскость имеет 8 ортогональных осей для отображения атрибутов и 5 концентрических окружностей для оценки их интенсивности. Два звуковых ландшафта ЗЛ1 и ЗЛ2 характеризуют две фигуры, расположенные почти симметрично относительно оси “хаотичный”–“спокойный”.

Чтобы минимизировать описание звуковых ландшафтов, чтобы иметь количественные меры для их анализа и иметь возможность применять статистические методы анализа распределений ответов экспертов, стандартный метод А [32] вводит тригонометрическое преобразование значений 8 атрибутов качества в пару координат *ISOPleasant* и *ISOEventful* [33] (в дальнейшем *ISOP1* и *ISOEv*)

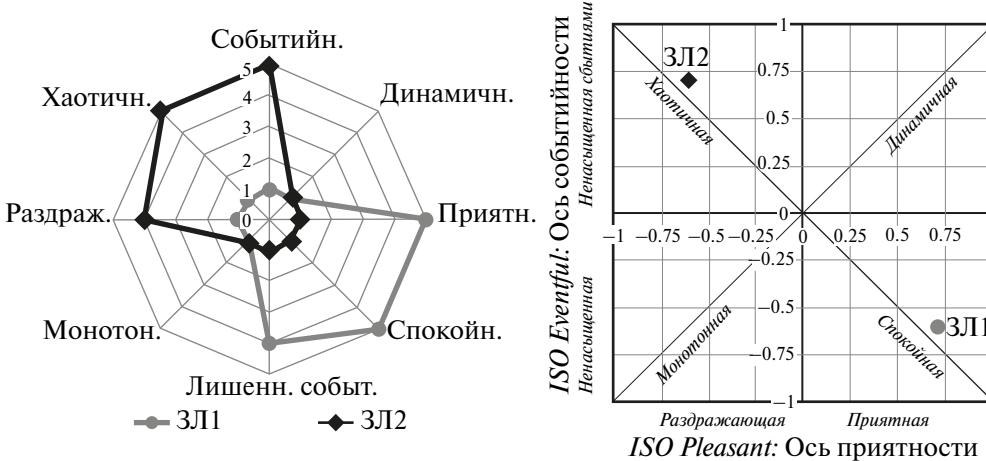


Рис. 2. Представление результатов обследования звуковых ландшафтов на (а) – циркумплексной плоскости и (б) – плоскости “Приятность–Событийность”.

точек на плоскости “Приятность–Событийность”. Такое преобразование имеет вид:

$$\begin{aligned} ISOPl &= k[(pleasant - annoying) + \\ &\quad + \cos(\phi)(calm - chaotic) + \\ &\quad + \cos(\phi)(vibrant - monotonous)]; \\ ISOEv &= k[(eventful - unevenful) + \\ &\quad + \cos(\phi)(chaotic - calm) + \\ &\quad + \cos(\phi)(vibrant - monotonous)]; \end{aligned}$$

где $k = 1 / (4 + \sqrt{32})$ и $\phi = \pi / 4$.

На рис. 2б представлено отображение 8 атрибутов звуковых ландшафтов ЗЛ1 и ЗЛ2 (рис. 2а) точками на плоскости “Приятность–Событийность”. Значения координат $ISOPl$ и $ISOEv$ меняются в диапазоне от -1 до +1. Четыре квадранта на плоскости характеризуют звуковые ландшафты как “оживленный – хаотичный – скучный – спокойный”. “Оживленный” или “яркий, динамичный” звуковой ландшафт аттестуется одновременно как приятный и насыщенный событиями; “хаотичный” – как неприятный и насыщенный событиями, “скучный” или “монотонный” звуковой ландшафт – как неприятный и лишенный событий, а “спокойный” – как приятный и ненасыщенный событиями. По расположению точек (рис. 2б) звуковой ландшафт ЗЛ1 можно описать как очень неприятный, хаотичный и насыщенный событиями, а ландшафт ЗЛ2 – как очень приятный, спокойный и лишенный событий. Таким образом, по значениям координат $ISOPl$ и $ISOEv$ точек на плоскости “Приятность–Событийность” (рис. 2б) стандартный метод А позволяет определить, насколько звуковой ландшафт был приятным и насыщенным событиями. Принято, что координата

$ISOPl$ отражает то, насколько среда была для субъекта приятной (т.е. свойства субъекта), а координата $ISOEv$ – насколько среда была событийной (т.е. свойства среды).

В третьей заключительной части анкеты эксперты дают аудиовизуальную оценку среде, ее громкости, приемлемости и адекватности месту также по ранговой шкале от 1 (нет совсем) до 5 (полностью согласен).

Формирование благоприятных звуковых ландшафтов предполагает определение желаемой формы среды, представляющей либо на циркумплексной плоскости (рис. 2а), либо на плоскости “Приятность–Событийность” (рис. 2б), а также разработку комплекса мер, приближающих существующий звуковой ландшафт к желаемому. Есть указания [40], что раздражающие и хаотичные звуковые ландшафты, подобные ЗЛ2, весьма трудно преобразовать в приятные и спокойные, подобные ЗЛ1.

4. ЭКСПЕРТИЗА РЕАЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ ЛАНДШАФТОВ

Аудиовизуальная экспертиза звуковых ландшафтов в 6 локациях была проведена в середине ноября 2023 г. в период с 17 до 18 часов при участии 14 непрофессиональных экспертов в возрасте чуть более 20 лет. Четыре локации были расположены около МГТУ имени Н. Э. Баумана: Л1 – около входа на факультет ЭМ, Л2 и Л3 – у нового и старого корпусов Главного здания Университета, Л4 – у общежития. Еще две локации располагались в общественных местах: Л5 – в центре пешеходной улицы и Л6 – во дворе жилого дома (рис. 3).

В разных локациях эксперты выявили разные типы звуков (рис. 4). В локациях Л1–Л4 вблизи университета имели место звуки двух типов: “Шум” и “Звуки присутствия людей” (рис. 4).

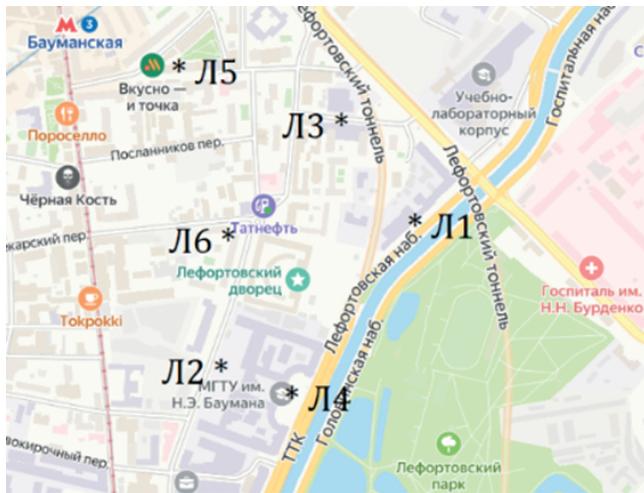


Рис. 3. Расположение локаций. Локации L1-L4 находились около входов в учебные и жилые корпуса МГТУ, а L5 и L6 – на близкорасположенных территориях общего пользования.

Основным источником “Шумов” в L1 был движущийся автотранспорт, а в L2 и L3 – движущийся автотранспорт и строительные работы. Высокие ранги “Шумов” и их превалирование над рангами “Звуков присутствия людей” в L1 и L2 явно указывали на раздражающий характер звуковых ландшафтов. Во время проведения экспертизы “Звуки присутствия людей” в L4 превалировали над “Шумами”. На пешеходной улице L5 эксперты указали только на высоко ранговые “Звуки присутствия людей”, а во дворе жилого дома (L6) – на низко ранговые звуки трех типов.

По типам звуков локации были разделены на две группы (отмечены овалами, см. рис. 4, 6, 7). В первой группе локаций (L1-L4) присутствовали звуки сходных типов, во второй группе (L4-L6) – разных типов.

На рис. 5 отображены индивидуальные и средние оценки звуковых ландшафтов точками на плоскости “Приятность-Событийность” с координатами ISOPI и ISOEv. В первой группе локаций и по положению средней оценки самым неприятным, хаотичным и насыщенным событиями был звуковой ландшафт локации L1, которая непосредственно примыкала к оживленной транспортной магистрали. Локация L2 располагалась в уютном сквере и традиционно считалась приятной, однако, в день экспертизы звуковой ландшафт оказался неприятным и насыщенным событиями из-за громких звуков проводимых рядом строительных работ и яркого освещения строительной площадки. Локация L3 находилась перед входом в общежитие, ее звуковой ландшафт нейтральный по приятности, но насыщенный событиями. В локации L4 экспертизу проводили на ступенях монументального здания

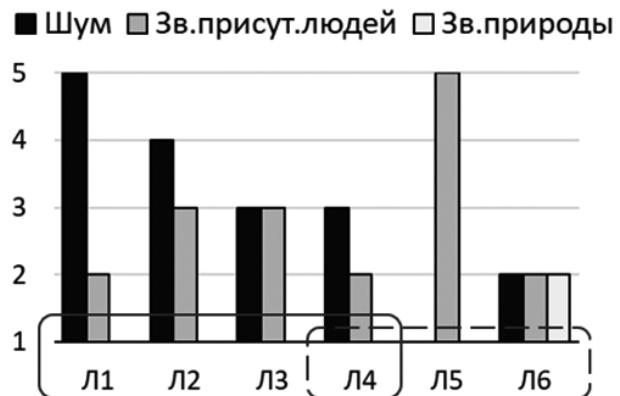


Рис. 4. Медианы ранговых оценок, полученных группой экспертов для звуков разных типов в 6 локациях. Ордината – значения медиан от 1 (не слышу) до 5 (полностью доминирует). Овалы делят локации на 2 группы.

нового Главного корпуса, перед которым была парковка, которая отделяла локацию от оживленной транспортной магистрали. Во время экспертизы локации имело место приятное приглушенное освещение заходящим за горизонт солнцем. По положению координат ISOPI и ISOEv звуковой ландшафт в L4 по сравнению с L1-L3 был наиболее приятным и менее всего насыщенным событиями (рис. 5).

Локации L5 и L6 располагались на общественных территориях вблизи Университета. Звуковой ландшафт пешеходной улицы L5 оказался нейтральным по приятности, как в L3, но насыщенным событиями, как в L2 (рис. 5). Самым спокойным, приятным и ненасыщенным событиями был звуковой ландшафт во дворе жилого дома (L6). Он содержал тихие звуки всех типов, подчеркивающие спокойствие и безопасность окружающей среды.

Средние значения координат ISOPI и ISOEv, характеризующие звуковые ландшафты в 6 локациях, представлены на рис. 6. В первой группе локаций L1-L4 изменения координат обусловлены снижением рангов неприятных звуков типа “Шум” (рис. 4): значения ISOPI повышались от отрицательных до положительных значений, а значения ISOEv снижались от высоких положительных значений почти до нуля. Во второй группе выделялась локация L5. Здесь доминирующим типом был “Звук присутствия людей” (рис. 4). Поэтому оценка ISOPI была несколько ниже, а оценка ISOEv – значительно выше таковых в L4 и L6.

Заключительная часть экспертизы посвящена оценкам контекста восприятия среды: оценка частоты посещения места в настоящем и желания посещать место в будущем, оценка среды в целом, ее громкости и соответствия среды месту.

Эксперты с разной частотой посещали локации L1-L6: очень часто посещали локацию L1,

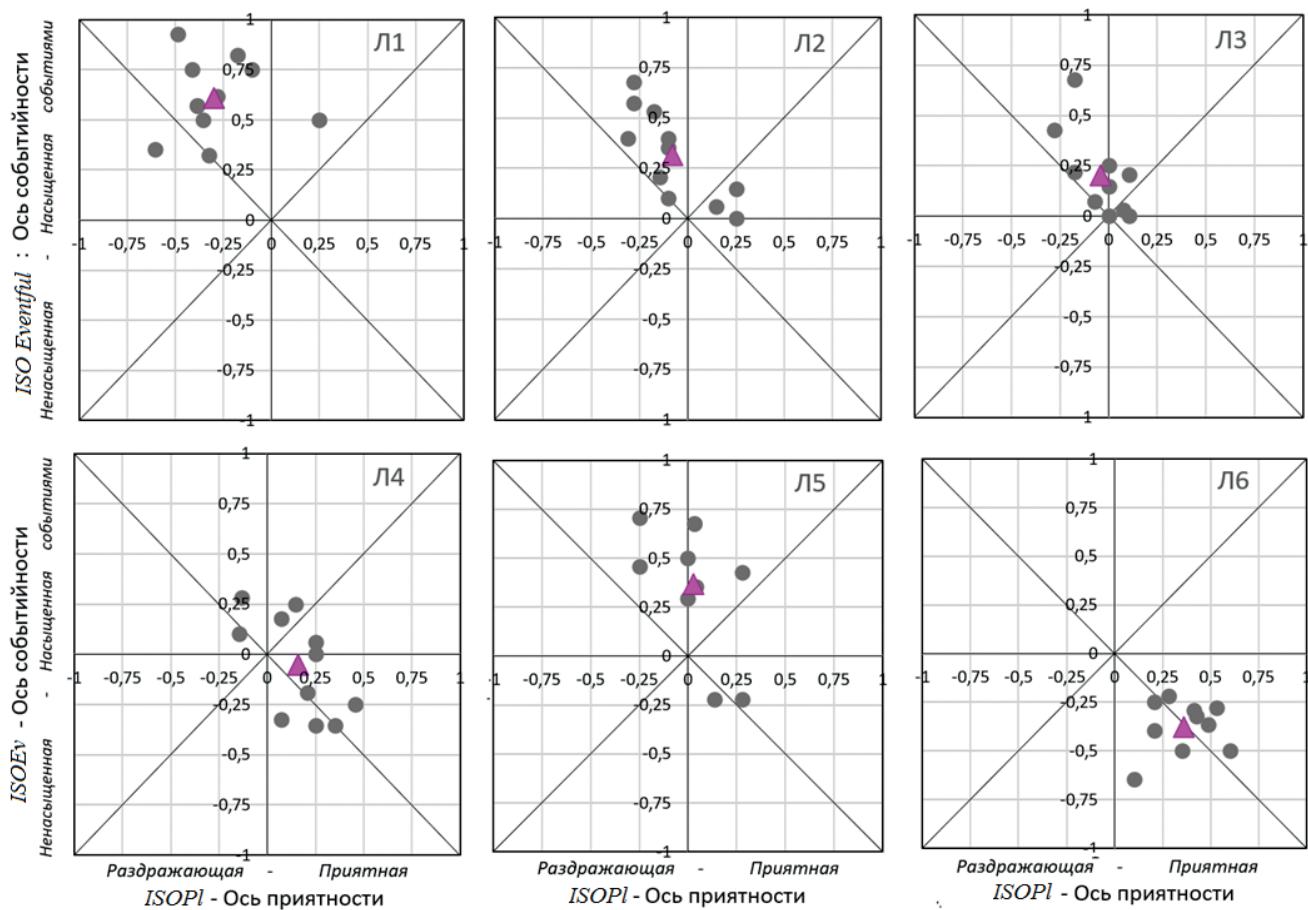


Рис. 5. Экспертные оценки звуковых ландшафтов координатами $ISOPl$ и $ISOEv$ точек на плоскости “Приятность-Событийность” в 6 локациях. Символы ● и ▲ соответствуют индивидуальным и средним оценкам.

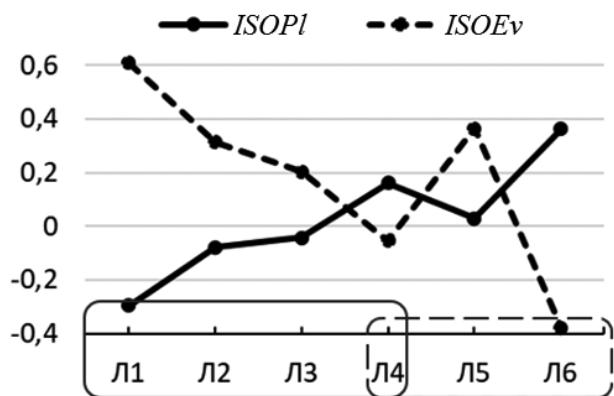


Рис. 6. Значения координат $ISOPl$ и $ISOEv$ точек на плоскости “Приятность-Событийность”, соответствующих средним оценкам звуковых ландшафтов в 6 локациях. Ордината – средние по группе значения координат $ISOPl$ и $ISOEv$.

часто – локации Л3 и Л5, нечасто – локации Л2 и Л5, совсем нет – локацию Л6. Ранги оценок соответствия среды месту варьировали между “нейтральной” и “хорошой” (ранги 3–4). Оценки желания посещать локации в будущем варьировали около “не часто, при случае” (оценка 2–3). Последние

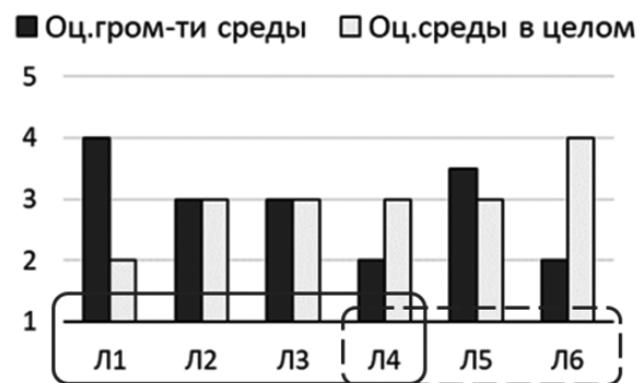


Рис. 7. Медианы ранговых оценок среды в целом и ее громкости в 6 локациях. Ордината – ранговые оценки от 1 (очень плохо / совсем нет) до 5 (очень хорошо / очень громко).

оценки, по-видимому, отражали лояльность экспертов к учебному заведению и учитывали срок обучения.

Показательными были результаты экспертизы громкости среды и восприятия среды в целом (рис. 7): чем выше был ранг оценки громкости

среды, тем ниже был ранг оценки среды в целом. При изменениях ранговых оценок громкости среды соответствовали изменениям средних значений координат $ISOEv$, отражающих свойства среды (рис. 6), а изменения ранговых оценок среды в целом – изменениям средних значений координат $ISOPl$, отражающих свойства субъекта.

5. СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕР ОЦЕНOK ЗВУКОVОЙ СРЕДЫ И ЗVУKOVYХ LANДSHAFTOV

В табл. 1 приведены значения характеристик, используемых в трех подходах к оценке воздействия шума на человека. Это значения координат “Приятности-Событийности” $ISOPl$ и $ISOEv$ (подход звуковой ландшафт), уровней звукового давления (L , L_{max} , $L_{10}-L_{90}$) (физический подход), таких показателей субъективных качеств, как громкость (N , N_5-N_{95}), резкость S , метрика раздражения PAA (психоакустический подход). Показатели FS и R не указаны из-за малости своих значений.

Сравним интегральные характеристики L , N и PAA , используемые для оценки вызываемого у человека раздражения. Для этого на одном графике отобразим изменчивости уровней (ΔL), громкости (ΔN) и метрики раздражения (ΔPAA), вычисленные как разности между значениями L , N и PAA , полученных в локациях Л1–Л6, и значений, полученных в локации Л1 (рис. 8). Как следует из рисунка, точнее изменения громкости среды оценивает линейная шкала громкости N в сон, но не логарифмическая шкала уровней L в дБА. Наибольшую чувствительность к изменениям громкости среды обнаруживает метрика раздражения PAA , так как расчет метрики предусматривает подчеркивание громкости N другими показателями качеств (см. раздел 2), в нашем случае резкостью S (табл. 1).

Сопоставим оценки звуковых ландшафтов с акустическими характеристиками и показателями субъективных качеств звуковой среды (табл. 1).

Таблица 1. Числовые значения мер оценки звуковых ландшафтов и характеристик звуковой среды.

| Локации | I. Характер-ки ЗЛ | | II. Физические характер-ки | | | III. Психоакустические характер-ки | | | |
|---------|---------------------------------|---------|----------------------------|-----------|-----------------|------------------------------------|--------------|------|-------|
| | Расчет по рез-там анкетирования | | Измерение Экофизика-110А | | | Расчет в среде Matlab | | | |
| | $ISOPl$ | $ISOEv$ | L | L_{max} | $L_{10}-L_{90}$ | N | N_5-N_{95} | S | PAA |
| | ед. | ед. | дБА | дБА | дБА | сон | сон | акум | ед. |
| Л1 | -0.30 | 0.61 | 71.1 | 75.2 | 12 | 45.5 | 25.7 | 1.2 | 58.7 |
| Л2 | -0.08 | 0.31 | 70.7 | 73.5 | 3.5 | 43.3 | 7.9 | 1.0 | 49.8 |
| Л3 | -0.04 | 0.20 | 63.7 | 69.1 | 9 | 32.7 | 17.2 | 1.3 | 41.3 |
| Л4 | 0.16 | -0.05 | 61.7 | 65.2 | 3.5 | 30.8 | 11.1 | 1.1 | 36.4 |
| Л5 | 0.03 | 0.37 | 57.3 | 62.7 | 7.5 | 22.1 | 16.5 | 1.1 | 27.2 |
| Л6 | 0.36 | -0.38 | 54.1 | 59.2 | 5.5 | 19.4 | 13.4 | 1.3 | 24.5 |

В первой группе локаций Л1–Л4, расположенных около зданий Университета, изменения оценок звуковых ландшафтов совпадали с изменениями характеристик и показателей звуковой среды из-за присутствия в локациях звуков сходных типов: “Шумов” и “Звуков присутствия людей” (рис. 4). С ростом номера локации в Л1–Л4 ранги звуков первого типа снижались от 5 до 3, а ранги звуков второго типа оставались в пределах 2–3, поэтому значения уровней L , громкостей N и метрик раздражения PAA последовательно снижались на 9.4 дБ, 15 сон и 22 ед. Поэтому значения координат “Приятности” возрастали на 22%, а значения координат “Событийности” снижались на 33%. Во всех локациях уровни L превысили допустимые нормы. По расположению координат $ISOPl$ и $ISOEv$ звуковой ландшафт в Л1 был самым неприятным, хаотичным и насыщенным событиями. Однако звуковой ландшафт в Л4 был приятным, спокойным и

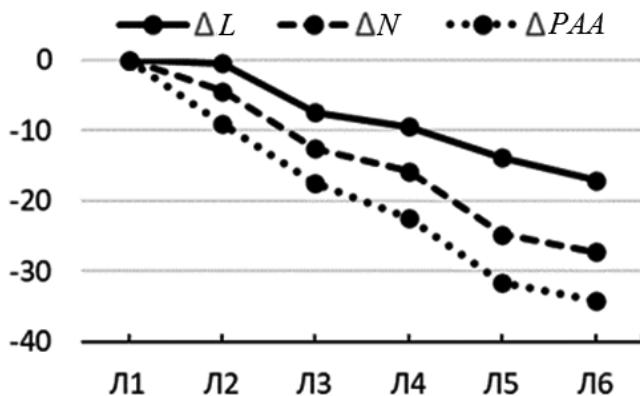


Рис. 8. Изменчивость физических и субъективных оценок громкости, а также метрики раздражения PAA звуковой среды в 6 локациях. Ордината – изменчивости уровней звукового давления ΔL в дБА, громкости ΔN в сон и метрики раздражения ΔPAA в ед.

Таблица 2. Корреляционные связи координат *ISOPl* и *ISOEv* звуковых ландшафтов с физическими и психоакустическими характеристиками звуковой среды в 6 локациях.

| | | I. Хар-ки ЗЛ | | II. Физические хар-ки | | | III. Психоакустические хар-ки | | | | | |
|------|---|---|--|--|--|--|--------------------------------------|--|--|--------------|-----------|----------|
| | | Параметр | <i>ISOPl</i> | <i>ISOEv</i> | <i>L</i> | <i>L_{max}</i> | <i>L₁₀–L₉₀</i> | <i>N</i> | <i>N₅–N₉₅</i> | <i>S</i> | <i>Fs</i> | <i>R</i> |
| I. | <i>ISOPl</i> <i>ISOEv</i> | | | | | | | | | | | |
| II. | <i>L</i> , дБА <i>L_{max}</i> , дБА <i>L₁₀–L₉₀</i> , дБА | -0.86 -0.91 -0.63 | 0.73 0.78 0.60 | | | | | | | | | |
| III. | <i>N</i> , сон <i>N₅–N₉₅</i> , сон <i>S</i> , акум <i>FS</i> , васил <i>R</i> , аспер <i>PAA</i> , ед. | 0.85 -0.82 0.31 — — -0.88 | 0.70 0.71 -0.43 — — 0.72 | 0.99 0.71 -0.43 — — 0.98 | 0.99 0.71 -0.35 0.05 0.63 0.98 | 0.33 0.44 0.44 0.05 0.63 0.41 | | 0.72 -0.32 0.17 -0.60 0.54 0.79 | 0.71 0.54 0.54 0.54 0.39 -0.26 | 0.39 0.01 | | |

Указаны статистически значимые значения коэффициентов корреляции ($p < 0.005$).

Жирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции, превышающие +0.7.

ненасыщенным событиями при том, что уровни *L* были выше санитарных норм на 6 дБ.

Если в сравниваемых локациях присутствуют звуки разных типов, то между изменениями характеристик звуковой среды и звуковых ландшафтов связи могут быть совсем другими. Покажем это на примере группы локаций Л4–Л6.

В локации Л5 интегральные *L*, *N* и *PAA* были ниже на 4.4 дБ, 8.7 сон и 9.2 ед. по сравнению с таковыми в локации Л4, но в Л5 оценка *ISOPl* снизилась на 6.5%, а оценка *ISOEv* возросла на 21%. В Л5 уровень *L* был в пределах санитарной нормы, однако, звуковой ландшафт не был благоприятным для человека. В локации Л5, расположенной на пешеходной улице, звуковой ландшафт формировали высокоранговые “Звуки присутствия людей” (рис. 4). Он был нейтральным по приятности (*ISOPl* ~ 0.0) и имел повышенную событийность (*ISOEv* ~ 0.4). Это указывало, что в Л5 эксперты ощущали не спокойствие и безопасность, но излишнюю подвижность и суетливость.

Локация Л6 находилась во дворе жилого дома. В Л6 по сравнению с Л5 характеристики *L*, *N* и *PAA* снижались на 3.2 дБ, 2.7 сон, 2.7 ед. Такое снижение было меньше, чем в предыдущем случае, однако оценка *ISOPl* повысилась на 16.5%, а оценка *ISOEv* снизилась на 37.5%. Причинами повышения приятности и заметного снижения событийности в Л6 были замкнутое пространство локации, присутствие тихих звуков всех трех типов: “Шумов”, “Звуков присутствия людей”, “Звуков природы”.

Здесь уместно указать на сходство оценок звуковых ландшафтов (*ISOPl* и *ISOEv*) в локациях Л5 и

Л2 (рис. 5, табл. 1). Звуковой ландшафт в локации Л5 формировали только “Звуки присутствия людей”, уровни *L* которых соответствовали санитарным нормам. В то время как в звуковом ландшафте Л2 преобладали звуки типа “Шум” с уровнями *L* заметно превышающими санитарные нормы.

Таким образом, из сравнения пар локаций (Л4–Л5, Л5–Л6, Л5–Л2) следует, что связи между характеристиками звуковой среды и звуковых ландшафтов зависят от состава звуков окружающей среды и их характеристик, от контекста восприятия среды человеком, назначения территории, ее благоустройства, настроя человека и др.

В заключение проследим корреляционные связи между мерами звуковых ландшафтов (*ISOPl* и *ISOEv*), физическими характеристиками звуковой среды (*L*, *L_{max}*, *L₁₀–L₉₀*) и психоакустическими показателями качеств среды (*N*, *N₅–N₉₅*, *S*, *FS*, *R*, *PAA*) (табл. 2). Получить достоверные оценки таких связей для каждой из двух групп локаций из-за малости числа последних было нельзя, но можно для всех 6 локаций сразу.

Самое важное, что расчеты не выявили корреляционных связей между координатами *ISOPl* и *ISOEv*. Это подтверждает взаимную независимость координат. В то же время, корреляционные связи координат *ISOPl* с интегральными характеристиками *L*, *N* и *PAA* были высокими, статистически достоверными и отрицательными, а связи координат *ISOEv* с теми же характеристиками – высокими, статистически достоверными и положительными. Абсолютные значения коэффициентов корреляции для *ISOPl* составляли |0.85–0.88| и были выше таких для *ISOEv*, составлявших |0.7–0.73|. Снижение

абсолютных значений коэффициентов корреляции для $ISOE_v$ обусловлены большей вариабельностью координат $ISOE_v$, чем координат $ISOPl$ (рис. 6), из-за изменения состава слышимых звуков (рис. 4).

В обследованных локациях Л1–Л6 изменчивость координат $ISOPl$ соответствовала изменчивости ранговых оценок среды в целом, а изменчивость координат $ISOE_v$ – изменчивости ранговых оценок громкости среды (рис. 6 и 7). Это подтверждает, что координата $ISOPl$ отражает отношение субъекта к среде, а координата $ISOE_v$ – свойства среды.

6. ВЫВОДЫ

1. Стандартный метод (А) экспертной оценки звуковых ландшафтов [31–33] имеет три части: (а) определение типов звуков (рис. 4); (б) оценку 8 атрибутов воспринимаемого аффективного (эмоционального) качества среды и вычисление по ним двух координат $ISOPl$ и $ISOE_v$ на плоскости с осями “Приятность–Событийность” (рис. 2), характеризующими отношение субъекта к среде и свойства последней, (в) аудиовизуальную оценку среды и контекста ее восприятия. Все части взаимосвязаны и обеспечивают целостность метода. Нельзя предсказать приятность или событийность среды только по типу доминирующих звуков, а оценки приятности и событийности должны быть подтверждены аудиовизуальными оценками среды и свойств ее восприятия (контекст).

2. Полученные результаты подчеркивают обоснованность введения стандарта ISO/TS 12913 “Акустика. Звуковой ландшафт” [31–33], информативность метода оценок звуковых ландшафтов парой координат точек на плоскости “Приятность–Событийность”, доступность способа тестирования среды для непрофессиональных экспертов.

3. Было показано, что характеристики звуковых ландшафтов коррелировали с объективными характеристиками звуковой среды в тех локациях, которые имели сходное назначение и где присутствовали громкие звуки сходных типов. Такая связь нарушалась, если сравниваемые локации имели разное назначение и звуковое разнообразие. Другими словами, связи между характеристиками звуковой среды и звуковых ландшафтов зависели от состава звуков окружающей среды и их характеристик, от контекста восприятия среды человеком, назначения территории, ее благоустройства, настроя человека и др.

4. Большую точность в оценках изменений громкости среды дает линейная шкала громкости N в сон, а не логарифмическая шкала уровней звукового давления L в дБА. Наибольшую чувствительность к изменениям громкости среды обнаруживает метрика раздражения PAI , которая помимо громкости учитывает слуховое восприятие

других субъективных качеств, связанных с наличием модуляций звуков, высокочастотных и тональных компонент.

5. Все три подхода (физический, психоакустический, звуковой ландшафт) к оценке воздействия шума на человека и разработке мер снижения негативного влияния шума актуальны и значимы.

Первый и второй подходы нацелены на определение источников шумов, на снижение уровней их излучения, на устранение физических характеристик звуков, которые приводят к появлению неприятных субъективных качеств шумов. Третий подход учитывает психические особенности аудиовизуального восприятия среды человеком. Такой подход, наряду с мерами снижения неприятных свойств звуковой среды, включает маскирование неприятных типов звуков, таких как “Шум” и громкие “Звуки присутствия людей”, приятными для человека звуками, например, “Звуками природы”.

Комплексное использование всех трех подходов позволяет формировать благоприятную звуковую среду на тех территориях в городах и населенных пунктах, где невозможно полностью исключить присутствие неблагоприятных звуков.

Работы выполнена в рамках договора о сотрудничестве между Акустическим институтом им. акад. Н.Н. Андреева и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по вопросам шума в окружающей среде для Европейского региона. WHO Region Office for Europe, 2018, www.euro.who.int.
2. ГОСТ Р 53187–2008 Акустика. Шумовой мониторинг городских территорий.
3. ГОСТ Р ИСО 1996–1–2019. Акустика. Описание, измерение и оценка шума на местности. Часть 1. Основные величины и процедуры оценки.
4. Санитарные правила и нормы СанПиН 1.2.3685–21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (с изменениями на 30 декабря 2022 года).
5. Слуховая система. Под ред. Альтман Я.А. Л.: Наука, 1990. 620 с.
6. Fastl H., Zwicker E. Psychoacoustics: Facts and Models. Springer Science & Business Media, 2007. 463 p.
7. ISO 532-1/2: 2017. Acoustics—Methods for calculating loudness—Part 1: Zwicker method; Part 2: Moore-Glasberg method.
8. ISO 532-2: 2017. Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 2: Moore-Glasberg method.
9. ANSI/ASA S 3.4:2007. Procedure for the Computation of Loudness of Steady Sounds.
10. DIN 45631. 2010. Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum — Zwicker method.

11. DIN 45631/A1. 2010. Calculation of loudness level and loudness from the sound spectrum — Zwicker method — Amendment 1: Calculation of the loudness of time-variant sound.
12. DIN 45692. 2009. Measurement technique for the simulation of the auditory sensation of sharpness.
13. DIN 45681. 2005. Acoustics — Determination of tonal components of noise and determination of a tone adjustment for the assessment of noise immissions.
14. ECMA-418-2. 2020. Psychoacoustic metrics for ITT-equipment, part 2: models based on human perception. Geneva.
15. *Genuit K.* Sound-Engineering im Automobilbereich. Springer. Berlin. 2010.
https://doi.org/10.1007/978-3-642-01415-4_589
16. *More S.R.* Aircraft noise characteristics and metrics. PhD thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, December 2010.
17. *Greco G., Bertsch L., Ring T., Langer S.* Sound quality assessment of a medium-range air-craft with enhanced fan-noise shielding design // CEAS Aeronautical J. 2021. 12. 481–493.
18. *Huang Y., Lv B., Ni K., Jiang W.* Discomfort estimation for aircraft cabin noise using linear regression and modified psychoacoustic annoyance approaches // J. Acoust. Soc. Am. 2023. V. 154. P. 1963–1976.
<https://doi.org/10.1121/10.0020838>
19. Римская-Корсакова Л.К., Пятаков П.А., Шулянов С.А. Оценки раздражающего действия шума // Акуст. журн. 2022. Т. 68. № 5. С. 550–561.
20. *Kato K.* Soundscape, cultural landscape and connectivity. Sites: New Series. 2009. 6. 2. 80–91.
21. *Kang J., Aletta F.* The Impact and Outreach of Soundscape Research // Environments. 2018. V. 5(5). P. 58.
<https://doi.org/10.3390/environments5050058>
22. *Brown L.A.* A review of progress in soundscapes and an approach to soundscape planning // Int. J. Acoustic and Vibration. 2012. V. 17(2). P. 73–81.
23. Носуленко В.Н. Психофизика восприятия естественной среды. Проблема воспринимаемого качества. М.: Изд-во Институт психологии РАН, 2007. 400 с.
24. *Schafer R.M.* The New Soundscape. Associated Music, New York, NY, 1969. P. 1–65.
25. *Schafer R.M.* The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. Destiny Books. Rochester, 1993. P. 301.
26. *Kang J.* Soundscape: Progress in the past 50 years and challenges in the next 50 years. IN-TER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 2021. 263(6). 132–139.
<https://doi.org/10.3397/IN-2021-1302>
27. *Russell J.A.* A circumplex model of affect // Journal of Personality and Social Psychology, 1980. 39, 1161–1178.
28. *Russell J.A., Ward L.M., Pratt G.* Affective quality attributed to environments: a factor analytic study // Environment and Behavior. 1981. V. 13. P. 259–288.
29. *Russell J.A.* Core affect and the psychological construction of emotion // Psychological Review. 2003. V. 110. № 1. P. 145–172.
30. *Fiebig A., Jordan P., Moshona C.C.* Assessments of acoustic environments by emotions — the application of emotion theory in soundscape // Frontiers in Psychology. 2020.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.573041>
31. ISO/TS 12913-1:2014, “Acoustics—Soundscape—Part 1: Definition and conceptual frame-work” (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland).
32. ISO/TS 12913-2:2018, “Acoustics—Soundscape—Part 2: Data collection and reporting re-quires” (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland).
33. ISO/TS 12913-3:2019, “Acoustics—Soundscape—Part 3: Data analysis” (International Or-ganization for Standardization, Geneva, Switzerland).
34. *Aumond P., Can A., De Coensel B., Botteldooren D., Ribeiro C., Lavandier C.* Modeling soundscape pleasantness using perceptual assessments and acoustic measurements along paths in urban context // Acta Acustica united with Acustica. 2017. V. 103. № 3. P. 430–443.
<https://doi.org/10.3813/aaa.919073>
35. *Gelman A., Hill J.* Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models. New York: Cambridge University Press, 2007.
36. *Axelsson Ö., Nilsson M.E., Berglund B.* A principal component model of soundscape perception // J. Acoust. Soc. Am. 2010. V. 128. P. 2836–2846.
37. *Axelsson Ö., Nilsson M.E., Hellström B., Lundén P.* A field experiment on the impact of sounds from a jet-and-basin fountain on soundscape quality in an urban park // Landsc. Urban Plan. 2014. V. 123. P. 49–60.
38. *Aletta F., Oberman T., Axelsson Ö., Xie H., Zhang Y., Lau S.-K., Tang S.-K., Jambrošić K., De Coensel B., Van den Bosch K.* Soundscape Assessment: Towards a Validated Translation of Perceptual Attributes in Different Languages. Institute of Noise Control Engineering, 2020. V. 261. P. 3137–3146.
39. *Aletta F., Oberman T., Mitchell A., Kang J.* SATP Consortium. Preliminary Results of the Soundscape Attributes Translation Project (SATP): Lessons Learned and next Steps // In Proceedings of the 10th Convention of the European Acoustics Association Forum Acusticum. 2023. P. 701–705.
40. *Mitchell A., Aletta F., Kang J.* How to analyze and represent quantitative sound-scape data // J. Acoust. Soc. Am. Express Letters. 2022. V. 2(3). 037201.
<https://doi.org/10.1121/10.0009794>
41. *Jeon J.Y., Lee P.J., You J.* Acoustical characteristics of water sounds for soundscape enhancement in urban open spaces // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131(3). P. 2101–2109.

SOUNDSCAPES IN THE URBAN ENVIRONMENT: AUDIOVISUAL PERCEPTION AND OBJECTIVE CONTROL

L. K. Rimskaya-Korsakova^{a,*}, N. G. Kanev^b, A. I. Komkin^b, S. A. Shulyapov^a

^aJSC “N.N. Andreev Acoustics Institute” Russia, 117036, Moscow, st. Shverniaka 4

^bBauman Moscow State Technical University Russia, 105005, Moscow, st. 2-ya Baumanskaya, 5, building 1

E-mail: lkrk@mail.ru

The International Organization for Standardization (ISO) introduced the term “soundscape”, which defined the latter as “an acoustic environment perceived or understood by a person/people in context”. It proposed methods for quantitatively assessing human emotional reactions to a sound environment. In one of the methods, such reactions were represented by coordinates on the “Pleasantness-Eventfulness” plane. The pleasantness coordinate assessed how pleasant the environment was for the subject at the time of the examination, i.e. the properties of the subject, and the eventfulness coordinate assessed how eventful the environment was, i.e. the properties of the environment. The purpose of this work was to verify the standard ISO method. Therefore, an audiovisual examination of the environment was carried out in different locations; pleasantness and eventfulness coordinates were calculated; acoustic characteristics and psychoacoustic characteristics of the environment were recorded and calculated, the latter were then compared with the characteristics of sound landscapes (or pleasantness and eventfulness coordinates). It was shown that a sound environment with physical characteristics higher than established sanitary standards may well be pleasant for a person. The obtained results confirmed the validity, informativeness and integrity of the method for assessing soundscapes, its accessibility for non-professional experts. The characteristics of soundscapes can be used for engineering design of the sound environment of urban areas.

Keywords: noise impact, physical characteristics of noise, noise perception, subjective quality indicators, attributes of perceived affective quality, models of the relationship between objective and emotional characteristics