

Научная статья

УДК 628.517.2: 534.831.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-20-30

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКОВЫХ ЛАНДШАФТОВ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

✉ **Малыгин Игорь Геннадьевич.**

**Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук;
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.**

Рогозинский Глеб Гендрихович.

**Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук;
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Санкт-Петербург, Россия**

✉ ***malygin_com@mail.ru***

Аннотация. Рассматривается проблема акустической безопасности при проведении аварийно-спасательных работ. Авторами предлагается подход к анализу зоны ликвидации последствий чрезвычайной ситуации как сложного звукового ландшафта, интегрирующего сигналы жизнеобеспечения (биофонию), техногенные шумы (технофонию) и естественные звуки среды (геофонию). На основе аппарата раскрашенных временных сетей Петри разработана формальная модель, описывающая влияние акустической обстановки на своевременность передачи команд и, как следствие, на эффективность управления силами и средствами МЧС России. Показано, что превышение пороговых уровней технофонии приводит к блокировке управляющих переходов в системе, что позволяет интерпретировать риск потери управления как отказ в акустическом канале связи. Предложена концепция проектирования звукового ландшафта зоны ликвидации последствий чрезвычайной ситуации как элемента системы управления при проведении аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: безопасность в чрезвычайных ситуациях, звуковой ландшафт, сети Петри, управление рисками, технофония, биофония, аварийно-спасательные работы

Для цитирования: Малыгин И.Г., Рогозинский Г.Г. Моделирование звуковых ландшафтов в системе управления при проведении аварийно-спасательных работ // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 2 (78). С. 20–30. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-20-30

Scientific article

MODELING OF ACOUSTIC LANDSCAPES IN THE MANAGEMENT SYSTEM FOR EMERGENCY RESPONSE OPERATIONS

✉ Malygin Igor G.

**Solomenko institute of transport problems of Russian academy of sciences;
Saint-Petersburg university of the State fire service of the EMERCOM of Russia,
Saint-Petersburg, Russia.**

Rogozinski Gleb G.

**Solomenko institute of transport problems of Russian academy of sciences;
Herzen Russian state pedagogical university, Saint-Petersburg, Russia**✉ malygin_com@mail.ru

Abstract. The article addresses the issue of acoustic safety during emergency response operations. The authors propose an approach to analyzing an emergency zone as a complex soundscape that integrates life-support signals (biophony), technogenic noise (technophony), and natural environmental sounds (geophony). Based on the apparatus of Coloured Timed Petri Nets, a formal model is developed to describe the influence of the acoustic environment on the timeliness of command transmission and, consequently, on the effectiveness of emergency management. It is shown that exceeding threshold levels of technophony leads to the blocking of control transitions in the system, which allows interpreting the risk of loss of control as a failure in the acoustic communication channel. A concept for designing the acoustic landscape of an emergency zone as an element of the risk management system is proposed.

Keywords: emergency safety, acoustic landscape, soundscape, Petri nets, risk management, technophony, biophony, emergency response operations

For citation: Malygin I.G., Rogozinski G.G. Modeling of acoustic landscapes in the management system for emergency response operations // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 2 (78). P. 20–30. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-2-20-30

Введение

Восприятие чрезвычайной ситуации (ЧС) традиционно строится на визуальных образах: завалы, пожары, разрушения. Однако звуковая картина происходящего может передавать не менее важную информацию. Классическая экология звука, восходящая к работам Р.М. Шафера, рассматривает акустическую среду (АС) не как хаотический шум, но как сложно организованный звуковой ландшафт, в котором каждый элемент занимает свою нишу [1]. Применительно к зоне ликвидации последствий ЧС звуковой ландшафт может быть сегментирован на ряд фундаментальных слоев: биофонию – звуки, источником которых являются живые организмы, включая человека (крики о помощи, команды, дыхание под завалами); геофонию – естественные шумы среды (ветер, вода); и технофонию – звуки, порождаемые работой аварийно-спасательной техники (двигатели, генераторы, гидравлика, средства малой механизации).

Проблема безопасности потенциально возникает в точке дисбаланса этих слоев. В современных условиях ликвидации последствий ЧС технофония, как правило, доминирует. Высокий уровень шума от работающей техники (экскаваторов, подъемных кранов, компрессорных станций, бензорезов и т.д.) не только оказывает вредное воздействие на органы слуха спасателей, что является предметом медицины труда, но и в некоторых случаях критически искажает управляющие команды и сигналы. Команда руководителя, не услышанная в шуме, или крик пострадавшего, растворенный в низкочастотном гуле генератора, представляют собой прямой риск перехода ситуации в неконтролируемую фазу.

Целью настоящей работы является построение формальной модели, описывающей влияние звукового ландшафта (ЗЛ) на процесс управления силами и средствами при ликвидации последствий ЧС, а также разработка концептуальных основ для включения акустических факторов в общую систему управления проведением аварийно-спасательных работ (ПАСР).

Теоретические основы и методы расчета

Современное состояние исследований звуковых ландшафтов

Понятие ЗЛ (soundscape) в его современном научном понимании было введено канадским исследователем-акустиком Р.М. Шафером в конце 1960-х гг. Его фундаментальный труд «Настройка мира» (The Tuning of the World, 1977) [1] заложил основы акустической экологии – дисциплины, изучающей сложные взаимосвязи между живыми организмами и их акустическим окружением. Дальнейшее развитие – это направление получило в работах Б. Краузе, который, исследуя акустику дикой природы, ввел понятие биофонии и впервые указал на феномен акустической ниши, где каждый вид занимает свой частотный диапазон для эффективной коммуникации [2]. Параллельно Б. Труа развивал теорию акустической коммуникации, акцентируя внимание на роли контекста и слухового восприятия в интерпретации звуковых событий [3].

В последние десятилетия произошла экспансия идей акустической экологии в прикладные области. Исследования ЗЛ вышли за рамки музыковедения и экологии, интегрировавшись в градостроительство, архитектуру [4, 5], транспорт [6] и общественное здоровье. Сформировалось направление «акустического урбанизма», рассматривающее звуковую среду как ресурс, требующий управления и оптимизации наравне с визуальными и планировочными аспектами. Ключевым выводом современных исследований является признание того факта, что восприятие звука глубоко субъективно и контекстуально: один и тот же акустический сигнал может оцениваться как нежелательный шум или как значимый, комфортный элемент среды в зависимости от обстоятельств и культурных установок слушателя.

Определенный интерес для задач управления рисками при ликвидации последствий ЧС представляют работы, посвященные проектированию естественных (природных) звуковых ландшафтов в урбанизированной среде [7, 8]. В них обосновывается, что включение элементов биофонии и создание «зон тишины» способно не только повышать качество жизни городского населения, но и выполнять восстановительную функцию, снижая уровень стресса и улучшая когнитивные показатели человека [9, 10]. Сам по себе этот вывод относится, прежде всего, к условиям нормальной жизнедеятельности, однако он побуждает обратить внимание на проблему акустической реабилитации личного состава МЧС России, работающего в экстремальных условиях. Можно предположить, что для спасателей, подвергающихся в зоне ЧС значительным акустическим нагрузкам, возможность кратковременного пребывания в акустически комфортной среде (например, в специально организованных зонах отдыха) могла бы стать значимым фактором сохранения профессиональной работоспособности и психоэмоциональной устойчивости. Разумеется, проверка данной гипотезы требует отдельных физиологических и психологических исследований, выходящих за рамки настоящей работы, однако само ее существование указывает на широту потенциального применения концепции ЗЛ.

Таким образом, современное состояние исследований ЗЛ предоставляет богатый концептуальный аппарат для анализа акустических условий в зонах ЧС. Однако, как показывает анализ литературы, существующие работы сосредоточены либо на проблемах городского шума и его влияния на здоровье населения, либо на эстетических и экологических аспектах природных ЗЛ. Применение методологии акустической экологии к задачам обеспечения безопасности при ликвидации последствий ЧС, а именно к анализу влияния дисбаланса биофонии и технофонии на управляемость силами и средствами, до настоящего времени не получило должного развития, что определяет актуальность настоящего исследования.

Методология. Сегментация акустического ландшафта

В основе методологии лежит представление о зоне ликвидации последствий ЧС как о полисенсорной среде, где акустическая составляющая выполняет две ключевые функции: сигнальную (предупреждение об опасности, локализация последствий ЧС, спасение и эвакуация пострадавших) и коммуникационную (передача команд и донесений). Исходя из классификации Шафера, адаптированной к задачам безопасности, мы выделяем следующие классы акустических событий, определяющих ЗЛ ЧС:

– биофония (В). Звуки, продуцируемые живыми организмами, включая человека. Данный класс является целевым – ради его восприятия и выстраивается система акустической безопасности. Данный класс включает вербальные команды, а также невербальные сигналы (стоны, стуки), например, позволяющие обнаружить пострадавших в завалах;

– геофония (Г). Звуки небиологического природного происхождения. В зависимости от характера ЧС (наводнение, ураган, землетрясение) могут выступать как в роли фоновых, так и создавать существенную помеху;

– технофония (Т). Звуки, генерируемые техническими устройствами и механизмами, задействованными в ликвидации ЧС. Именно этот класс является основным дестабилизирующим фактором в силу высокой интенсивности и широкополосности спектра относящихся к нему звуковых объектов.

Доминирование технофонии над остальными компонентами характеризует экстремальные акустические условия зон ЧС. Результирующий ЗЛ L в каждый момент времени может быть описан как суперпозиция уровней, обозначенных выше трех компонент. Критическим для безопасности является состояние, при котором уровень технофонии L_T превышает суммарный уровень биофонии L_B и геофонии L_G настолько, что отношение «сигнал-шум» для речевого сигнала оказывается ниже порога разборчивости $SNR_{кр}$:

$$SNR = L_B - 10 \log_{10}(10^{0.1L_T} + 10^{0.1L_G}) < SNR_{кр}.$$

Очевидно, что простой констатации этого факта недостаточно для моделирования процессов управления. Необходимо понять, как именно акустический дисбаланс влияет на логику спасательной операции, что требует перехода к динамическому моделированию.

*Разработка формальной модели акустически-зависимого управления
на основе раскрашенных временных сетей Петри*

Постановка проблемы и обоснование выбора математического аппарата

Классические подходы к нормированию шума в ЧС, регламентируемые преимущественно санитарно-гигиеническими требованиями (СП 51.13330.2011¹, ГОСТ 12.1.003–2014²), рассматривают акустическую нагрузку исключительно как вредный производственный фактор. Однако ЗЛ зоны ЧС представляет собой сложную динамическую систему, где технофония способна непосредственно вмешиваться в контуры управления, блокируя передачу критически значимой биофонической информации.

¹ СП 51.13330.2011. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (утв. приказом Министерства регионального развития Рос. Федерации от 28 дек. 2010 г. № 825) (с изм. и доп.). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант»

² ГОСТ 12.1.003–2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 дек. 2014 г. № 2146-ст). Доступ из справ.-правовой системы «Гарант»

Для формализации данного процесса необходим математический аппарат, способный отразить реальную сложность ПАСР. Работающее на ликвидации последствий ЧС подразделение не является однородным: это множество различных групп (пожарные, спасатели-кинологи, операторы тяжелой техники и т.д.), каждая из которых обладает своими функциональными задачами, средствами связи и порогами чувствительности к шуму. Команды, поступающие от руководителя, также разнородны – они могут требовать немедленного реагирования (сигнал тревоги), планового выполнения (начало разбора завала, «режим тишины» и т.д.) или быть адресованы конкретному звену (группе).

Классические сети Петри позволяют моделировать параллельные и асинхронные процессы, что является шагом вперед по сравнению со статическими схемами. Однако в классическом варианте сетей Петри все ресурсы (маркеры) неразличимы. В нашем исследуемом случае важно различать, находится ли в точке принятия решения спасатель-химик-дозиметрист или спасатель-альпинист либо пожарный-ствольщик, а также поступила ли команда на эвакуацию или команда на запуск генератора. Соответствующую возможность предоставляют раскрашенные сети Петри. Благодаря наличию у маркера цветового признака можно задавать условия срабатывания переходов не только по факту наличия ресурса, но и по его типу.

Дополнительное усложнение происходит из-за наличия фактора времени. В реальной ситуации ПАСР важна не только последовательность событий, но и их длительность. Сколько секунд есть у спасателя, кинолога или пожарного, чтобы услышать команду, прежде чем шум работающей техники заглушит всё? Через какое время после запуска генератора наступает критический уровень технофонии? Ответы на эти вопросы требуют введения временных параметров, что приводит нас к временным раскрашенным сетям Петри (*Coloured Timed Petri Nets – CTPN*) [11, 12]. Таким образом, выбор данного аппарата продиктован необходимостью адекватно отразить три ключевые характеристики процесса ликвидации ЧС: параллельность работы множества групп, разнородность задействованных ресурсов и критическую зависимость от времени протекания процессов.

Формальное определение модели

Определим кортеж Σ , описывающий процесс ликвидации последствий ЧС как акустически-зависимую систему:

$$\Sigma = (P, T, A, C, G_a, E, I, M_0),$$

где P – множество позиций (примеры возможных состояний: p_{com} – «канал связи свободен», p_{order} – «команда отдана», p_{noise} – «источник шума активен»); T – множество переходов; A – множество дуг, соединяющих переходы между собой; C – множество цветов (типов фишек); G_a – предикаты разрешения перехода; E – выражения на дугах; I – функция временных задержек; M_0 – начальная разметка.

Ключевой особенностью предлагаемой модели является введение предиката разрешения $G_a(t_k)$ для переходов, связанных со звуковой коммуникацией. Данная функция ставит разрешение на срабатывание перехода в зависимость от текущего уровня технофонии $L_T(t)$. Пусть $L_{Th}(t_k)$ — пороговое значение уровня звука, при превышении которого коммуникация становится невозможной. Тогда:

$$G_{ac}(t_k) = \begin{cases} \text{Истина, если } L_T(t) < L_{th}(t_k) \\ \text{Ложь, если } L_T(t) \geq L_{th}(t_k) \end{cases}$$

Уровень технофонии $L_T(t)$ зависит от состояния позиций сети Петри, соответствующих работающей технике. Для учета пространственной неоднородности акустического поля введем

понятие акустического веса позиции. Каждой позиции p_i , связанной с источником технофонии, ставится в соответствие кортеж $(r_i, W_i(f))$, где r_i – радиус влияния, а $W_i(f)$ – спектральная весовая функция. В упрощенном виде результирующий уровень технофонии для перехода t_k вычисляется как суперпозиция вкладов всех активных источников:

$$L_T(t_k) = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i \in I_{\text{актив}}} 10^{0.1 \cdot (L_{Ti} - \Delta L(r_{ik}))} \right),$$

где $\Delta L(r_{ik}) = 20 \log_{10}(r_{ik}) + 11$ – затухание с расстоянием до точечного источника сферических волн [13].

Анализ динамических свойств модели

Введение акустических предикатов позволяет выделить следующие критические режимы:

1. Акустический коллапс управления, проявляющийся в виде блокировки всех акустических коммуникационных переходов T_{comm} и ведущий к состоянию полной потери управляемости по звуковому каналу.

2. Частичная деградация связности, приводящая к фрагментации сети и формированию изолированных групп, работающих без координации.

3. Акустически индуцированные задержки, проявляющиеся как увеличение времени срабатывания переходов при превышении порога (моделируется функцией $d(t_k) = f(L_T(t))$).

Имитационное моделирование

Для верификации подхода выполнен имитационный эксперимент на сценарии ликвидации последствий обрушения здания в условиях плотной городской застройки. При определении исходных параметров модели использовались консервативные оценки, основанные на анализе литературных источников [14, 15]³ и материалов с мест реальных ЧС. В модель введены три источника технофонии с характерными уровнями звука в зоне проведения работ (на удалении 6–12 м от источника): тяжелый экскаватор (95–100 дБА на расстоянии 1 м), дизельная компрессорная станция (90 дБА на расстоянии 1 м) и бензорез (110 дБА на расстоянии 1 м).

Коммуникационные переходы заданы двумя типами: передача вербальной команды от руководителя тушения пожара (РТП) к звену спасателей (пороговый уровень $L_{th1}=80$ дБА) и акустический контакт с пострадавшим, находящимся в завале (пороговый уровень $L_{th2}=60$ дБА). Имитация методом Монте-Карло (1 000 циклов) с варьированием последовательности включения источников технофонии показывает, что вероятность блокировки канала связи «РТП-звено» превышает 0,65 при одновременной работе экскаватора и компрессора, а вероятность акустического обнаружения пострадавшего падает ниже 0,2 при работе любого из источников в радиусе 20 м от эпицентра завала. Полученные результаты, безусловно, требуют натурной валидации, однако на данном этапе они наглядно демонстрируют нелинейный характер влияния технофонии на эффективность АСР и чувствительность модели к изменению входных параметров.

На рисунке представлена соответствующая сеть Петри, в которой множество позиций $P = \{p_1, \dots, p_9\}$:

p_1 – работающий экскаватор с заданным уровнем шума по шкале А и расстоянием до исследуемой точки;

p_2 – работающий компрессор с заданным уровнем шума по шкале А и расстоянием до исследуемой точки;

³ ГОСТ 31295.2–2005 (ИСО 9613-2:1996). Шум. Затухание звука при распространении на местности. Ч. 2. Общий метод расчета. М.: Стандартинформ, 2006. 28 с.

p_3 – работающий бензорез с заданным уровнем шума по шкале А и расстоянием до исследуемой точки;

p_4 – текущий суммарный уровень шума;

p_5 – звено спасателей (для примера взято три спасателя одной специализации (синие маркеры);

p_6 – штаб, передающий команды управления (красные маркеры);

p_7 – пострадавший;

p_8 – команда выполнена;

p_9 – пострадавший обнаружен.

Для случая, представленного на рисунке, начальная разметка $M_0 = \{(95,10), (100, 12), (110, 6), 0, (3, \text{синий}), (1, \text{красный}), 1, 0, 0\}$. Спустя одну временную единицу ($@ + 1$) значение позиции p_3 будет обновлено и для трех источников составит около 83 дБ. Пунктирные соединительные линии в расширенных сетях Петри обозначают так называемые информационные (тестовые) дуги. Они не требуют отправки маркеров и просто передают информацию.

Для данной сети задано множество переходов $T = \{t_1, t_2, t_3\}$:

t_1 – переход, обновляющий суммарное значение уровня шума;

t_2 – переход, требующий для открытия 1 фишки красного цвета (команды из штаба), 1 фишки синего цвета (спасателя) и выполнения условия $L_{th} < 80$ дБ;

t_3 – переход, требующий для открытия 1 фишки (наличия потерпевшего, подающего крики о помощи) и выполнения условия $L_{th} < 60$ дБ.

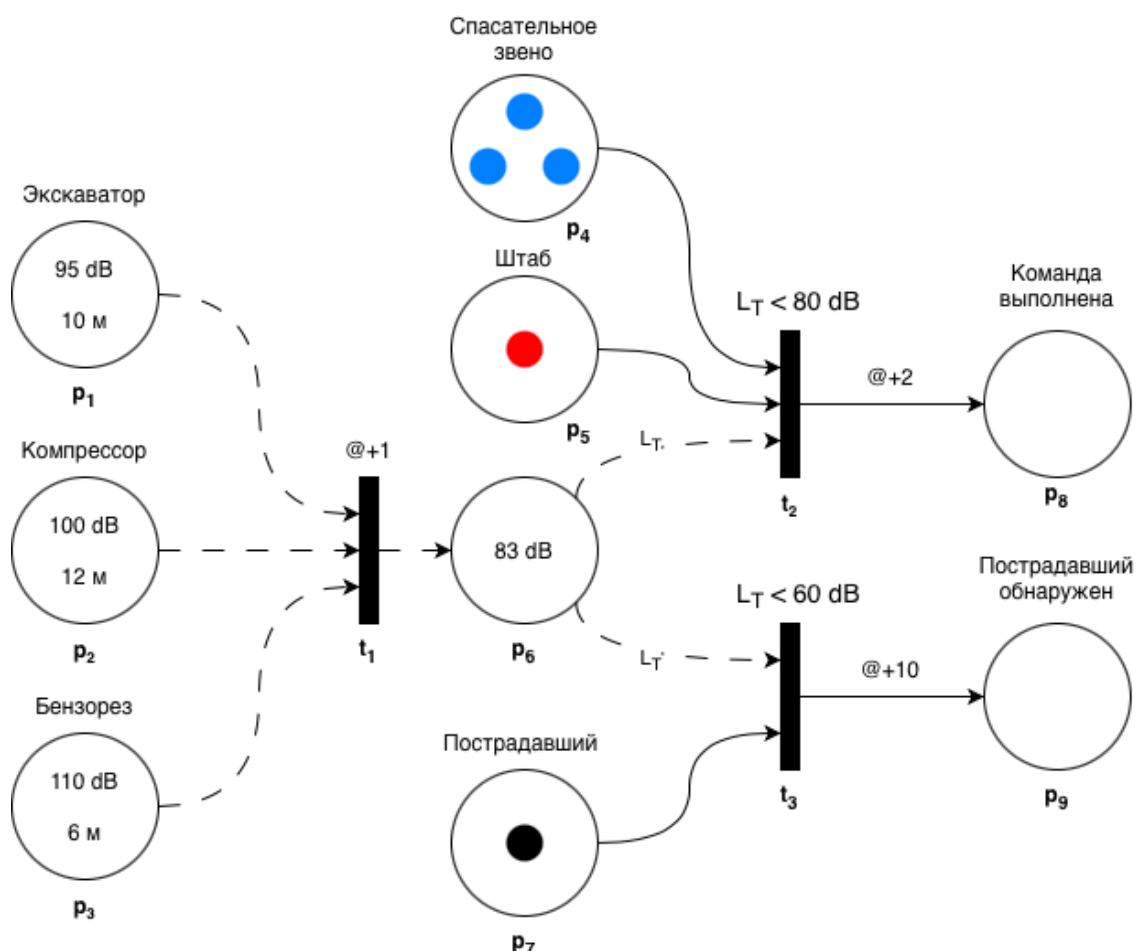


Рис. Пример рассматриваемой модели на основе раскрашенных сетей Петри

Развитие модели: нечеткие сети Петри и учет неопределенности

Предложенная выше модель на основе раскрашенных временных сетей Петри предполагает, что все параметры (уровни шума, расстояния, пороги срабатывания) известны точно либо могут быть заданы детерминированно. В реальных условиях ПАСР это допущение часто нарушается. Уровень технофонии может флуктуировать в зависимости от режима работы двигателя, расстояние до источника – изменяться в процессе перемещения техники, а порог разборчивости речи L_{th} – варьировать в зависимости от утомления конкретного спасателя.

Перспективным направлением развития модели представляется использование аппарата нечетких сетей Петри (*Fuzzy Petri Nets*). В этом случае уровни звука, расстояния и пороговые значения могут быть заданы нечеткими числами с соответствующими функциями принадлежности. Например, порог разборчивости может быть описан треугольным нечетким числом $L_{th} = (75, 80, 85)$, что отражает диапазон, в котором коммуникация возможна с той или иной степенью уверенности.

Предикат разрешения в этом случае приобретает вид функции степени разрешения $\mu_{ac}(t_k) \in [0,1]$, определяющей, насколько переход разрешен в текущей нечеткой акустической обстановке. Переход считается сработавшим, если $\mu_{ac}(t_k) \geq \lambda$, где λ – заданный порог уверенности. Такой подход позволяет моделировать плавную деградацию качества управления, а не только катастрофические отказы, что более адекватно отражает реальность. Введение нечеткости также открывает путь к использованию лингвистических переменных (например, «шумно», «очень шумно», «критично») при описании акустической обстановки, что может быть полезно при разработке систем поддержки принятия решений для РТП, для других руководителей ликвидации последствий ЧС.

Обсуждение и практическая значимость

Предложенный подход позволяет переосмыслить роль акустики в техносферной безопасности. Шум перестает быть только гигиеническим фактором и становится фактором эргатическим, влияющим на надежность системы «человек-техника». Моделирование на основе сетей Петри дает возможность на этапе планирования ПАСР выявлять уязвимости ЗЛ. Это открывает дорогу к концепции проектирования ЗЛ зоны ЧС, включающей следующие три фактора:

1. Пространственное размещение. Вынос шумных агрегатов за пределы «акустического коридора» между штабом и активной зоной.
2. Временное разделение. Планирование циклов работы техники в периоды наименьшей интенсивности речевого обмена.
3. Активная акустическая защита. Применение гарнитур с активным шумоподавлением и костной проводимостью, селективно подавляющих технофонию.

Любое управленческое решение, направленное на снижение акустического риска, должно быть обосновано не только с позиций безопасности, но и экономически. Стоимость потери управления, вызванной акустическим коллапсом, складывается из прямых и косвенных составляющих. К прямым потерям могут быть отнесены затраты на лечение профессиональных заболеваний органов слуха (нейросенсорная тугоухость), компенсации за вред, причиненный здоровью спасателей. Косвенные потери, как правило, значительно превышают прямые и включают: снижение скорости ПАСР, что увеличивает общее время операции и стоимость привлечения техники; вероятность повторного обрушения или иного вторичного поражения из-за несвоевременной подачи команды об отходе; а также репутационные издержки и снижение доверия населения к действиям экстренных служб МЧС России.

Предложенная модель позволяет оценить вероятность блокировки ключевых переходов, что дает возможность перейти к расчету предотвращенного ущерба. Сравнивая затраты на внедрение организационных мер (вынос техники, графики работы и сеансов связи) и технических средств (активные наушники, системы дублирования команд) с математическим ожиданием потерь от акустически-индуцированных сбоев, можно получить экономическое обоснование для включения вопросов акустической безопасности в общий контур системы управления при ПАСР. В зарубежной практике подобные расчеты выполняются в рамках методологии ALARP (As Low As Reasonably Practicable) [16], адаптация которой к условиям ликвидации последствий ЧС в России представляет собой отдельную научную задачу.

Заключение

ЗЛ ЧС представляет собой не фоновый шум, а активный элемент системы управления рисками. Предложенная модель на основе раскрашенных временных сетей Петри позволяет формализовать влияние акустической среды на процессы передачи управляющих сигналов. Дальнейшее развитие направления представляется в разработке методов расчета критических уровней технофонии для типовых сценариев ликвидации последствий ЧС и создании рекомендаций по акустической эргономике зон проведения АСР. Управление звуком в зоне ЧС становится таким же значимым, как управление светом и доступом, что позволяет говорить о формировании нового направления для исследований.

Список источников

1. Schafer R.M. The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. 1994. NY: Destiny Books. 322 p.
2. Krause B.L. The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places. 2012. Little, Brown and Company. 278 p.
3. Truax B. Acoustic Communication (2nd edition). New Jersey: Ablex Publishing, 2001. 266 p.
4. Music Literacy and Soundscape Perception: A Study based on the Sound Walk Method of Soundscapes / B. Song [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. № 19 (14). P. 8471. DOI: 10.3390/ijerph19148471
5. Classifying urban public spaces according to their soundscape / K. Sun [et al.] // International Congress in Acoustics – ICA 2019. Aachen.
6. Рогозинский Г.Г. Математическая модель искусственного звукового ландшафта как средства психологической адаптации в условиях длительных морских рейсов // Морские интеллектуальные технологии. 2025. № 3-1 (69). С. 164–170. EDN UQOWOE. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.034
7. Raimbault M., Dubois D. Urban soundscapes: Experiences and knowledge // Cities. 2005. № 22 (5). P. 339–350. DOI: 10.1016/j.cities.2005.05.003
8. Cerwen G., Mossberg F. Implementation of quiet areas in Sweden // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. № 16 (1). P. 134. DOI: 10.3390/ijerph16010134
9. Berto R. Exposure to restorative environments helps restore attentional capacity // Journal of Environmental Psychology. 2005. № 25 (3). P. 249–259.
10. Aletta F., Oberman T., Kang J. Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. № 15 (11). P. 2392. DOI: 10.3390/ijerph15112392
11. Timed Coloured Petri Net Simulation Model for Reinforcement Learning in the Context of Production Systems / S. Riedmann [et al.] // Production at the Leading Edge of Technology, Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). Dresden. 2021. P. 457–465. DOI: 10.1007/978-3-030-78424-9_51
12. Somsak V.A. A Train Rescheduling System Using Timed Coloured Petri Nets // Urban Rail Transit. 2021. P. 245–256. DOI: 10.1007/978-981-15-5979-2_14

13. Смагин В.А. Эвристическая модель ликвидации нештатных ситуаций в эргатических системах управления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 1.
14. Рожкова Н.В., Страхолис А.А. Математическая модель информационной поддержки оперативных групп пожарно-спасательного гарнизона // T-Comm. 2021. № 1.
15. Буторина М.В., Донцов С.А. Шум и вибрация как приоритетные факторы безопасности труда при строительстве транспортно-пересадочных кластеров // Noise Theory and Practice. 2025. № 3.
16. A summary of the 'ALARP' principle and associated thinking / J. Hurst [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. 2019. № 56 (2). P. 241–253. DOI: 10.1080/00223131.2018.1551814

References

1. Schafer R.M. The Soundscape: Our Sonic Environment and the Tuning of the World. 1994. NY: Destiny Books. 322 p.
2. Krause B.L. The Great Animal Orchestra: Finding the Origins of Music in the World's Wild Places. 2012. Little, Brown and Company. 278 p.
3. Truax B. Acoustic Communication (2nd edition). New Jersey: Ablex Publishing, 2001. 266 p.
4. Music Literacy and Soundscape Perception: A Study based on the Sound Walk Method of Soundscapes / B. Song [et al.] // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. № 19 (14). P. 8471. DOI: 10.3390/ijerph19148471
5. Classifying urban public spaces according to their soundscape / K. Sun [et al.] // International Congress in Acoustics – ICA 2019. Aachen.
6. Rogozinskij G.G. Matematicheskaya model' iskusstvennogo zvukovogo landshafta kak sredstva psihologicheskoy adaptatsii v usloviyah dlitel'nyh morskikh rejsov // Morskie intellektual'nye tekhnologii. 2025. № 3-1 (69). S. 164–170. EDN UQOWOE. DOI: 10.37220/MIT.2025.69.3.034
7. Raimbault M., Dubois D. Urban soundscapes: Experiences and knowledge // Cities. 2005. № 22 (5). P. 339–350. DOI: 10.1016/j.cities.2005.05.003
8. Cerwen G., Mossberg F. Implementation of quiet areas in Sweden // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019. № 16 (1). P. 134. DOI: 10.3390/ijerph16010134
9. Berto R. Exposure to restorative environments helps restore attentional capacity // Journal of Environmental Psychology. 2005. № 25 (3). P. 249–259.
10. Aletta F., Oberman T., Kang J. Associations between positive health-related effects and soundscapes perceptual constructs: A systematic review // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018. № 15 (11). P. 2392. DOI: 10.3390/ijerph15112392
11. Timed Coloured Petri Net Simulation Model for Reinforcement Learning in the Context of Production Systems / S. Riedmann [et al.] // Production at the Leading Edge of Technology, Proceedings of the 11th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP). Dresden. 2021. P. 457–465. DOI: 10.1007/978-3-030-78424-9_51
12. Somsak V.A. A Train Rescheduling System Using Timed Coloured Petri Nets // Urban Rail Transit. 2021. P. 245–256. DOI: 10.1007/978-981-15-5979-2_14
13. Смагин В.А. Эвристическая модель ликвидации нештатных ситуаций в эргатических системах управления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 1.
14. Рожкова Н.В., Страхолис А.А. Математическая модель информационной поддержки оперативных групп пожарно-спасательного гарнизона // T-Comm. 2021. № 1.
15. Буторина М.В., Донцов С.А. Шум и вибрация как приоритетные факторы безопасности труда при строительстве транспортно-пересадочных кластеров // Noise Theory and Practice. 2025. № 3.
16. A summary of the 'ALARP' principle and associated thinking / J. Hurst [et al.] // Journal of Nuclear Science and Technology. 2019. № 56 (2). P. 241–253. DOI: 10.1080/00223131.2018.1551814

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 08.02.2026; одобрена после рецензирования: 04.03.2026; принята к публикации: 31.03.2026

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 08.02.2026; approved after review: 04.03.2026; accepted for publication: 31.03.2026

Информация об авторах:

Малыгин Игорь Геннадьевич, директор Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (199178, Санкт-Петербург, 12-я Линия В.О., д. 13); профессор кафедры организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, e-mail: malygin_com@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0403-8095>, SPIN-код: 7602-1628

Рогозинский Глеб Гендрихович, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем экологии транспортных систем Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук (199178, Санкт-Петербург, 12-я линия В.О., д. 13); старший научный сотрудник научно-методической лаборатории «Музыкально-компьютерные технологии» РГПУ им. А.И. Герцена (191186, Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 48), доктор технических наук, e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5698-2347>, SPIN-код: 5421-5387

Information about the authors:

Malygin Igor G., director of the N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences (199178, Saint-Petersburg, 12th Line V.O., 13); professor of the department of fire fighting and emergency rescue operations of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, e-mail: malygin_com@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0403-8095>, SPIN: 7602-1628

Rogozinski Gleb G., leading researcher at the laboratory for problems of ecology of transport systems of the N.S. Solomenko institute of transport problems of the Russian academy of sciences (199178, Saint-Petersburg, 12th Line V.O., 13); senior researcher at the research and methodology laboratory «Music and computer technologies» at the Herzen state pedagogical university of Russia (191186, Saint-Petersburg, Moika River emb. 48), doctor of technical sciences, e-mail: gleb.rogozinsky@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5698-2347>, SPIN: 5421-5387