АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2012, том 58, № 6, с. 762–769

## АКУСТИЧЕСКАЯ ЭКОЛОГИЯ. ШУМЫ И ВИБРАЦИЯ

УДК 534.6.08

# ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СПЕКТРА ТРАНСПОРТНЫХ ШУМОВ г. ТОМСКА

© 2012 г. А. А. Бочаров, А. Г. Колесник, А. В. Соловьев

*Томский государственный университет*

*634050 Томск, пр. Ленина 36*

*E-mail: andrio@mail.tsu.ru*

Поступила в редакцию 12.12.2011 г.

Предложена методика построения карты шума города на основе двухпараметрической модели спектра акустических шумов. Построены карты акустических шумов и пространственного распределения показателя спада в г. Томске. Описаны факторы, влияющие на формирование акустических шумов транспортного потока. Проведен анализ влияния различных режимов работы двигателя внутреннего сгорания автомобиля на фоновый уровень акустических шумов.

*Ключевые слова:* акустические измерения, карты акустических шумов, техногенные источники акустических шумов, транспортные шумы.

Акустический шум является важным экологическим фактором в окружающей среде. В городских условиях акустические шумы характеризуются большим многообразием источников техногенного происхождения, связанных с деятельностью человека. Наиболее распространенными источниками являются энергетические подстанции, тяжелая строительная техника и движение транспорта.

Технологическое, промышленное и социальное развитие населенных пунктов сопровождается ростом шумового загрязнения их окружающей среды. В последнее десятилетие уровень шума в больших городах вырос в 10...15 раз. Влияя на психику человека, он вызывает рассеянность, усталость и другие симптомы. Длительное пребывание под воздействием шума может привести к различным психическим заболеваниям и расстройствам, а также может оказывать влияние на сердечно-сосудистую систему человека. Поэтому в городах остро встает необходимость выявления районов с повышенной шумовой загрязненностью, так как именно в них наиболее часто происходят ДТП и другие аварии на строительных и монтажных работах [1, 3].

Целью данной работы является анализ транспортных шумов урбанизированных территорий на примере города Томска. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: анализ спектральных характеристик акустических шумов в городских условиях, картирование территории г. Томска по спектральным характеристикам акустических шумов, анализ влияния транспортных шумов на общий уровень акустического фона в городе, а также анализ влияния различных режимов работы двигателя на уровень транспортных шумов.

Для выявления мест с наиболее высоким уровнем акустических шумов используют карты шумовой загрязненности. Карта шумовой загрязненности – это удобный инструмент для изучения, прогнозирования и контроля шума в окружающей среде. Основная цель карты шумовой загрязненности – создание визуального представления шума в окружающей среде на определенной географической территории.

Существуют различные методики определения уровня акустических шумов в городских условиях. Различие заключается в выборе измерительных пунктов, а также измеряемых величин. Например, при построении шумовой карты г. Тайнан (Тайвань) территория города была разделена на 8 зон: жилая зона; культурная и образовательная, включая все культурные или образовательные учреждения; коммерческая; сельскохозяйственная; индустриальная; так называемый синий пояс, включая водные системы; зеленый пояс, включая парки; и другие. Для этих зон рассчитывались усредненные значения уровня акустических шумов [4]. В г. Вальдивии (Бразилия) для определения измерительных пунктов на географическую карту города была нанесена сетка с размером ячейки 400 × 400 м. Измерения уровня акустических шумов проводились в узлах этой сетки независимо от архитектурной планировки города [5]. В г. Саппоро (Япония) при построении карты шумовой загрязненности территория города была разделена на восемь кольцевых зон на расстоянии 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 км от центра города [6]. В этих городах при измерении уровня акустических шу-

мов измеряемой величиной являлся эквивалентный по энергии уровень звука $L_{A_{экв}}$, который определяется по формуле:

$$L_{A_{экв}} = 10\lg\left[\frac{1}{T}\int_0^T\left(\frac{p(t)}{p_0}\right)^2 dt\right],$$

где $p(t)$ – текущее значение звукового давления, Па; $p_0 = 2\times10^{-5}$ Па – порог слышимости; $T$ – время действия шума в ч.

Эквивалентный по энергии уровень звука $L_{A_{экв}}$ непостоянного шума соответствует уровню такого постоянного шума, энергия которого равна энергии непостоянного шума за промежуток времени $T$. В Российской Федерации в качестве основной характеристики шума транспортных потоков принят эквивалентный уровень звука – $L_{A_{экв}}$. Нормативными документами, определяющими эту характеристику и методы ее измерения, являются ГОСТ 20444-85, ГОСТ 12.1.003-83 и ГОСТ Р 53187-2008.

Эквивалентный уровень шума, как характеристика, отвечает физической природе шума, создаваемого автомобильным транспортом. Шуму транспортных потоков присущи такие характерные особенности, как резкие колебания уровня по амплитуде, отсутствие временных зависимостей, неопределенность динамического диапазона. Такие особенности определяются стохастическим характером изменения интенсивности и состава движения, скоростных режимов и режимов работы двигателей автомобилей, разбросом шумовых характеристик автомобилей в зависимости от их технического состояния и др. [7]. Однако использование в качестве шумовой характеристики $L_{A_{экв}}$ не дает полного представления о спектральном составе и распределении энергии в исследуемом диапазоне частот.

Предлагаемая методика отличается от описанных выбором измерительных пунктов и измеряемых параметров. В городских условиях наибольшее акустическое загрязнение находится в местах повышенной деловой активности населения. Поскольку Кировский и Советский районы являются деловым центром г. Томска, то измерения проводились в этих районах. Измерительные пункты размещались в местах наибольшего скопления транспорта и населения. Число измерительных пунктов в общей сложности составило 118 ед. На рис. 1 представлено расположение измерительных пунктов.

Спектр акустических шумов может иметь сложную структуру, но в общем случае с достаточно хорошей точностью описывается степенной зависимостью интенсивности шума от частоты (рис. 2) [1, 8].

Форма спектра акустических шумов описывается функциональной зависимостью:

$$I = I_s f^{-\alpha}, \quad (1)$$

где $I_s$ – уровень звукового давления на частоте 1 кГц, что соответствует уровню звукового давления в фонах; $f$ – частота, $\alpha$ – показатель спада спектральной интенсивности [1, 2]. Показатель спада характеризует уменьшение амплитуды спектра с увеличением частоты и используется для определения структуры спектра.

При увеличении показателя спада в спектре будет наблюдаться увеличение крутизны уменьшения интенсивности спектральных составляющих с ростом частоты. Если показатель спада стремится к нулю, то спектр будет приближаться к равномерному. Показатель спада позволяет проводить оценку соотношения интенсивности низко- и высокочастотной частей спектра. Данный подход к выбору измеряемых параметров дает возможность анализировать спектр акустических шумов.

На основе предложенной методики проведено картирование Кировского и Советского районов г. Томска по спектральным характеристикам акустических шумов. Измерения проводились с помощью шумомера – анализатора спектра "ОКТАВА-101 АМ" в один и тот же интервал местного времени – с 12:00 до 14:00 ч, что соответствует повышенной деловой активности города. Измерения проводились в осенний период времени в сухую погоду без сильного ветра.

В деловой части г. Томска очень плотная застройка. Здания расположены вблизи автодорог, как правило, разделенных только тротуарными дорожками шириной 2–3 м. Ввиду этого измерения по ГОСТу 20444-85, согласно которому измерительные пункты должны располагаться на расстоянии 7.5 м от оси ближней к точке измерения полосы или пути движения транспортных средств, провести не представлялось возможным. Однако ГОСТ 20444-85 регламентирует проведение измерений в таких случаях на расстоянии более 1 м от экранирующих элементов зданий и оградительных сооружений. Таким образом, измерения уровня акустических шумов проводились согласно вышеописанному регламенту.

В измерительном пункте микрофон располагался на высоте 1.5 м над поверхностью земли. В каждом пункте измерения проводились по 3 раза через 5-минутный интервал времени. Полученные данные усреднялись, затем рассчитывались усредненные энергетические спектры акустических шумов. Из полученных спектров определяли уровень звукового давления на частоте 1 кГц, далее по формуле (1) рассчитывали показатель спада. При необходимости из полученных спектров измеренных за 5-минутный интервал времени можно получить эквивалентные уровни акустических шумов.

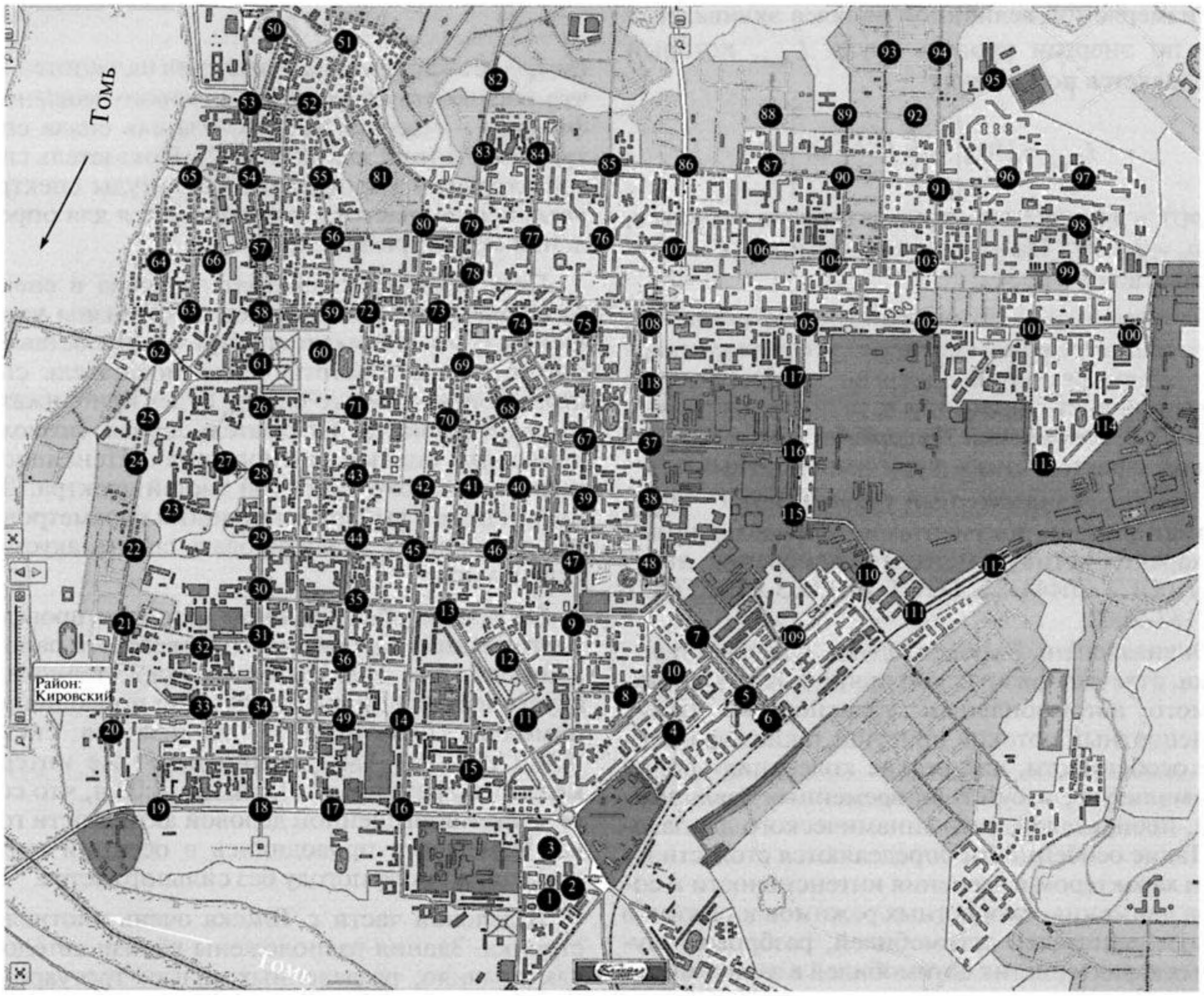


**Рис. 1.** Расположение измерительных пунктов по карте г. Томска (на основе 2ГИС Томск).

В звуковом диапазоне частот (рис. 3) наиболее высокий уровень шума наблюдается в окрестности крупных дорог, магистралей, таких как пр. Ленина, Фрунзе, ул. Красноармейская и т.д., и достигает величин порядка 70 дБ. В жилых районах, вдали от крупных дорог, во дворах уровень шума гораздо ниже, уровень звукового давления находится в пределах 40 дБ.

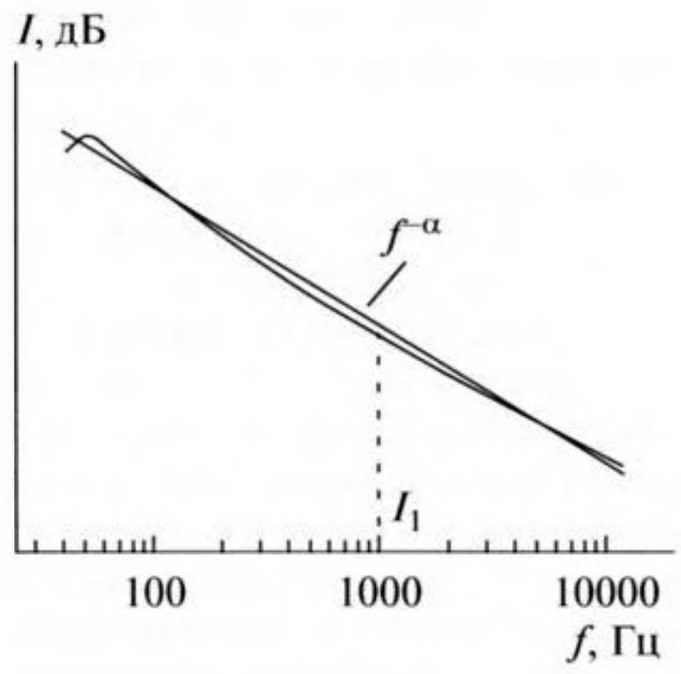


**Рис. 2.** Форма спектра акустических шумов и его модельное представление.

Вдоль крупных дорог и проспектов показатель спада находится в пределах от 3 до 7, т.е. форма спектра стремится к более пологой (рис. 4). В жилых районах, где уровень акустических шумов невелик, показатель спада достигает величин порядка 20, т.е. с увеличением частоты от 0.5 и до 15 кГц амплитуда акустических шумов уменьшается приблизительно на 30 дБ, общая энергия спектра перетекает в низкочастотную область.

Статистический анализ шумового загрязнения г. Томска показал, что в деловой части города преобладают значения уровня акустических шумов в звуковом диапазоне частот порядка 60...65 дБ (рис. 5а) с показателем спада 10...12 (рис. 5б).

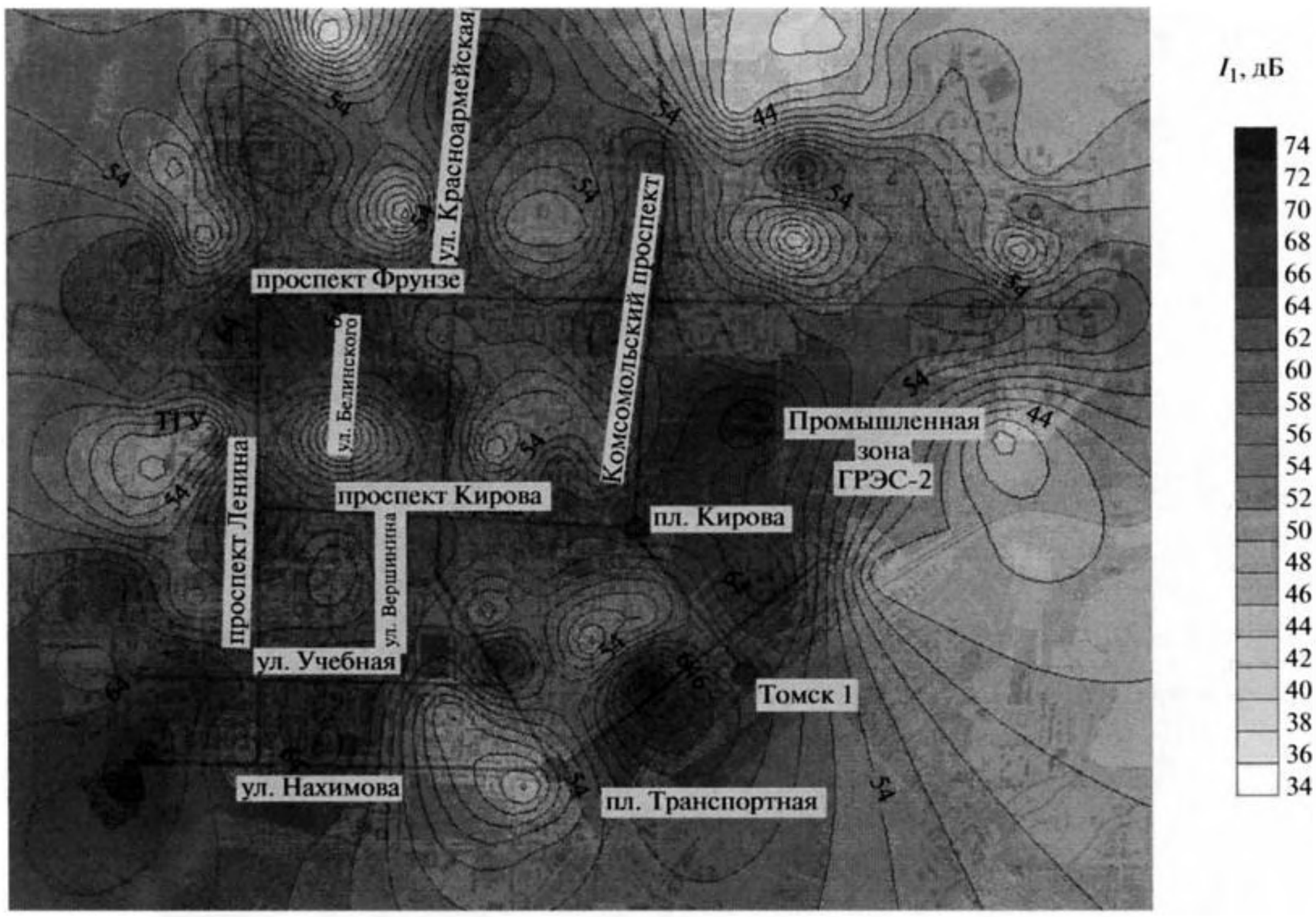


**Рис. 3.** Уровень шума на частоте 1 кГц в г. Томске.

Анализ распределения акустических шумов показал, что наибольшие величины уровня звукового давления и показателя спада в городе наблюдаются на перекрестках и проспектах, где наблюдается наибольшее сосредоточение транспортных средств. В жилых зонах, во дворах, на территории парков уровень шума заметно ниже. Логично предположить, что основным источником техногенных шумов в городских условиях является транспорт [9]. Во время проведения измерений уровня акустических шумов был проведен подсчет плотности транспортного потока в каждом измерительном пункте (рис. 6). Характеристика плотности транспортного потока выраженная в количестве автомобилей в час (авт/ч) принята для сопоставления в различных городах и различных участках трасс [10].

Вдоль крупных дорог, проспектов и на больших перекрестках наблюдается повышенный транспортный поток. По проспектам Ленина, Фрунзе, Кирова, Комсомольскому проходит около 4000 автомобилей в час. На небольших улицах, таких как Белинского, Вершинина, а также в жилых районах количество автомобилей в час не превышает 1000. Скорость потока ограничена максимальной разрешенной скоростью для городских условий и не превышает величину 60 км/ч.

Существуют различные модели формирования шума транспортных потоков. Для описания этих моделей помимо эквивалентного уровня звука для оценки шума используются такие статистические характеристики, как: $L_{10}$, $L_{50}$, $L_{90}$ и $L_{99}$ – уровни, не превышаемые в течении 10, 50, 90 и 99% времени наблюдения шумового воздействия [10]. Здесь для определения уровня акустических шумов транспортных потоков используют табличные значения. Модельное представление распределения транспортных шумов не определяется.

При моделировании шумов транспортных потоков в г. Санкт-Петербурге [11] использовали следующее соотношение:

$$L_W^* = L_{WVL} + \\ + 10\lg((\mathrm{flow} + \mathrm{flow} \times \%PL \times (EQ - 1)/100)/V50) - 30, \quad (2)$$

где $L_W^*$ – звуковая мощность транспортного потока на метр дороги, дБ; $L_{WVL}$ – средняя звуковая мощность легкового автомобиля, дБ; flow – количество машин в час; $\%PL$ – процент тяжелых машин в транспортном потоке, %; $V50$ – скорость транспортного потока (км/ч); $EQ$ – коэффициент эквивалентности, характеризующий, насколько уровень звуковой мощности тяжелого автомобиля превышает уровень звуковой мощности легкового [11].

Константы, используемые в формуле (2), известны для европейских автомобилей. Поэтому для правильного использования формулы (2) не-

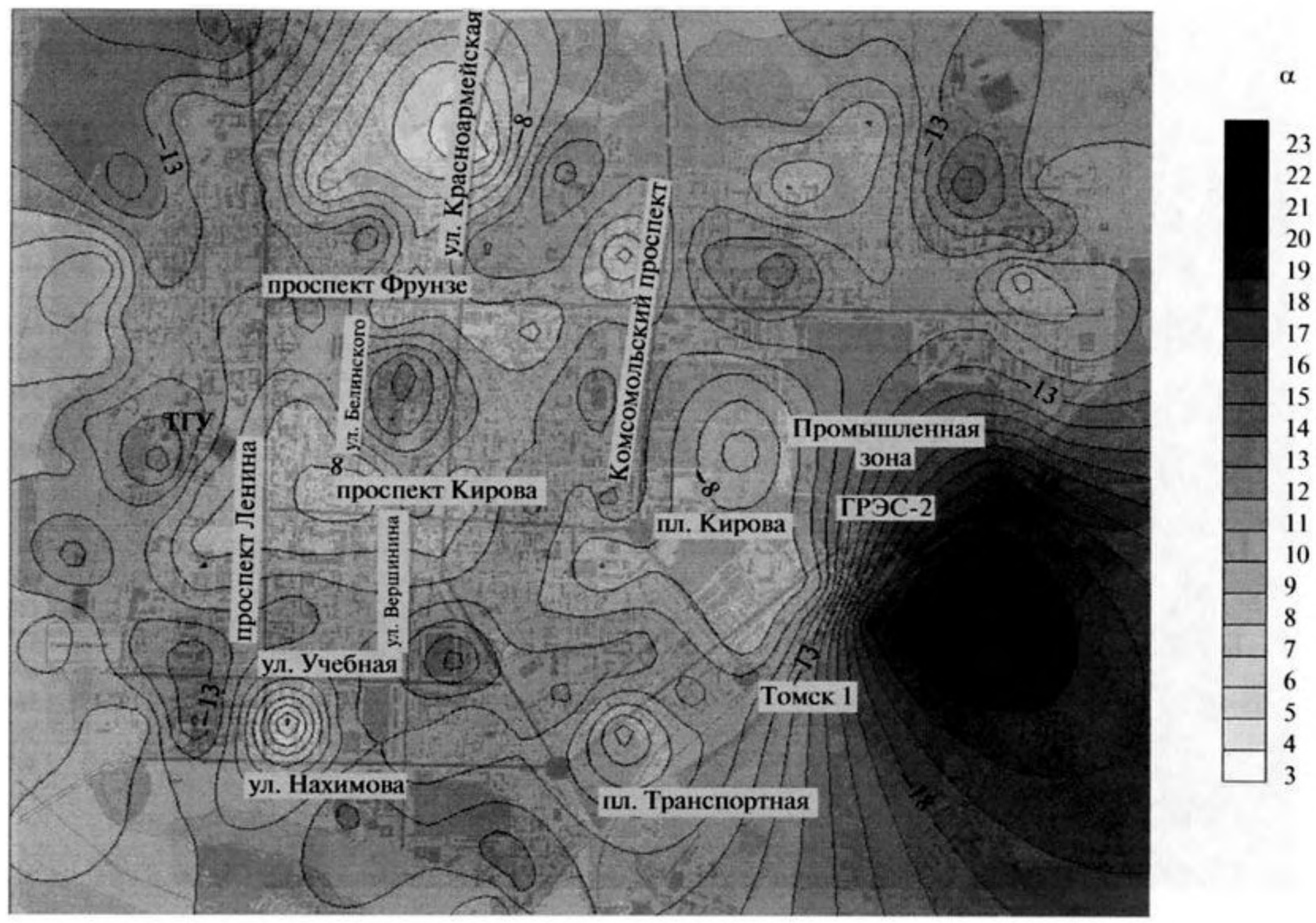


**Рис. 4.** Пространственное распределение показателя спада в спектре акустических шумов для звукового диапазона частот.

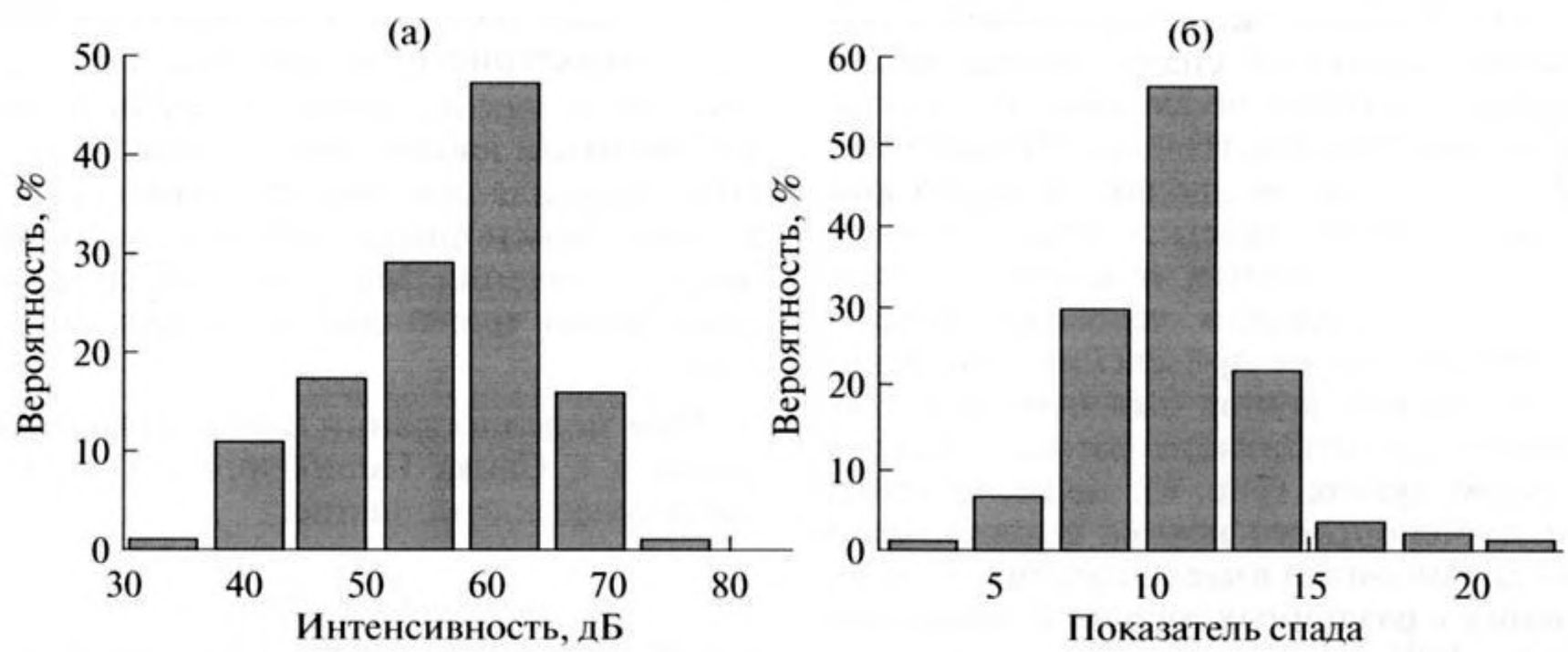


**Рис. 5.** Вероятность величины (а) интенсивности акустических шумов, (б) показателя спада спектральной интенсивности.

обходимо проверить корректность выбора константы $L_{WVL}$.

Анализ пространственного распределения транспортных средств и уровня акустических шумов показал, что наибольший уровень шумовой загрязненности наблюдается в местах, где интенсивность транспортного потока наиболее велика. При построении регрессионной модели зависимости уровня акустических шумов от количества автомобилей в час в качестве шумовой характеристики транспортного потока был выбран уровень звукового давления в Па.

Выбор шумовых характеристик транспортных потоков, выраженный в дБ, осложняет процесс аппроксимации зависимости уровня акустических шумов от транспортной нагрузки. Если перевести уровни акустических шумов в амплитудные значения, то зависимость указанных параметров принимает линейный вид, что упрощает проведение расчетов для оценок акустических

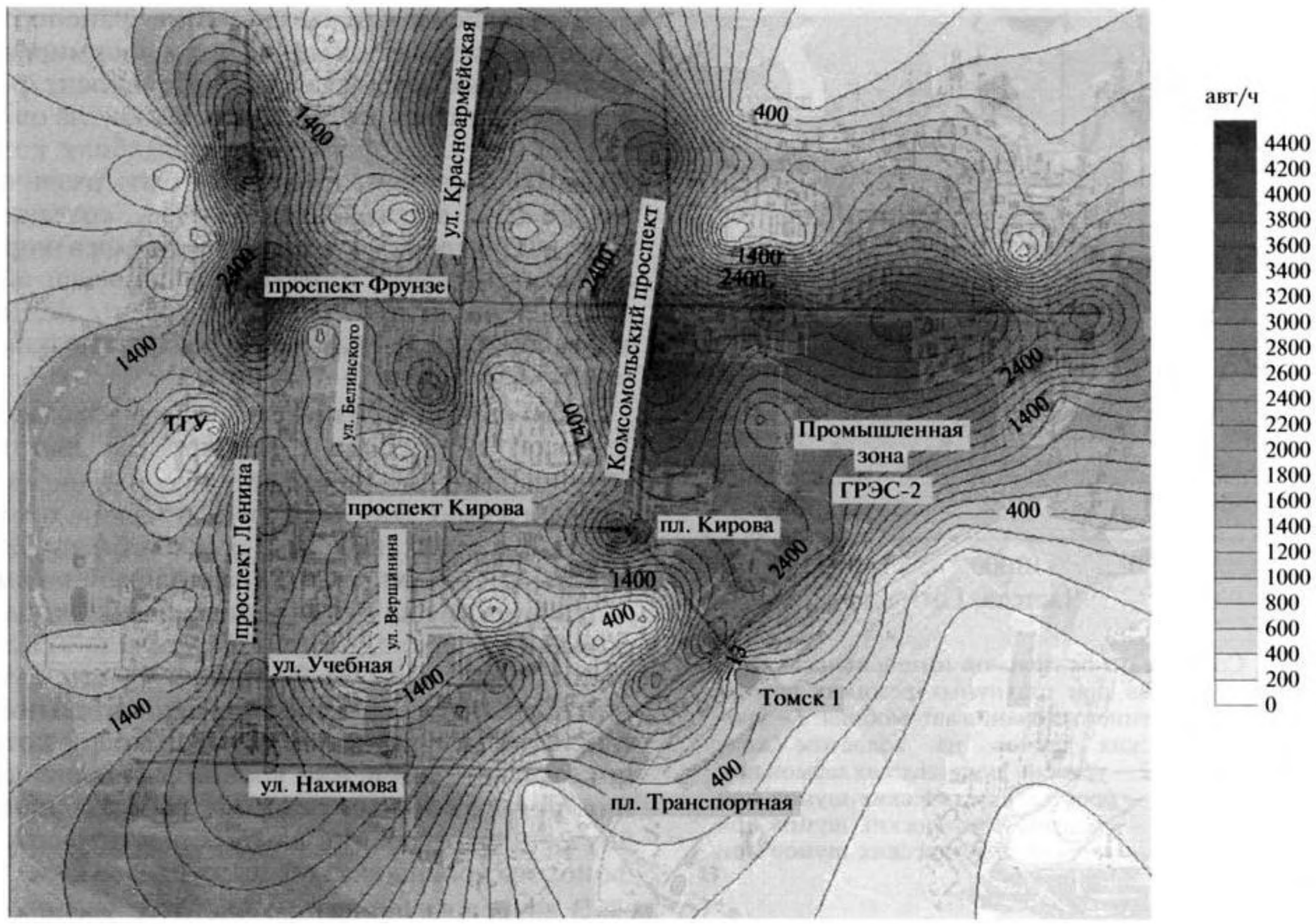


**Рис. 6.** Транспортная нагрузка в г. Томске.

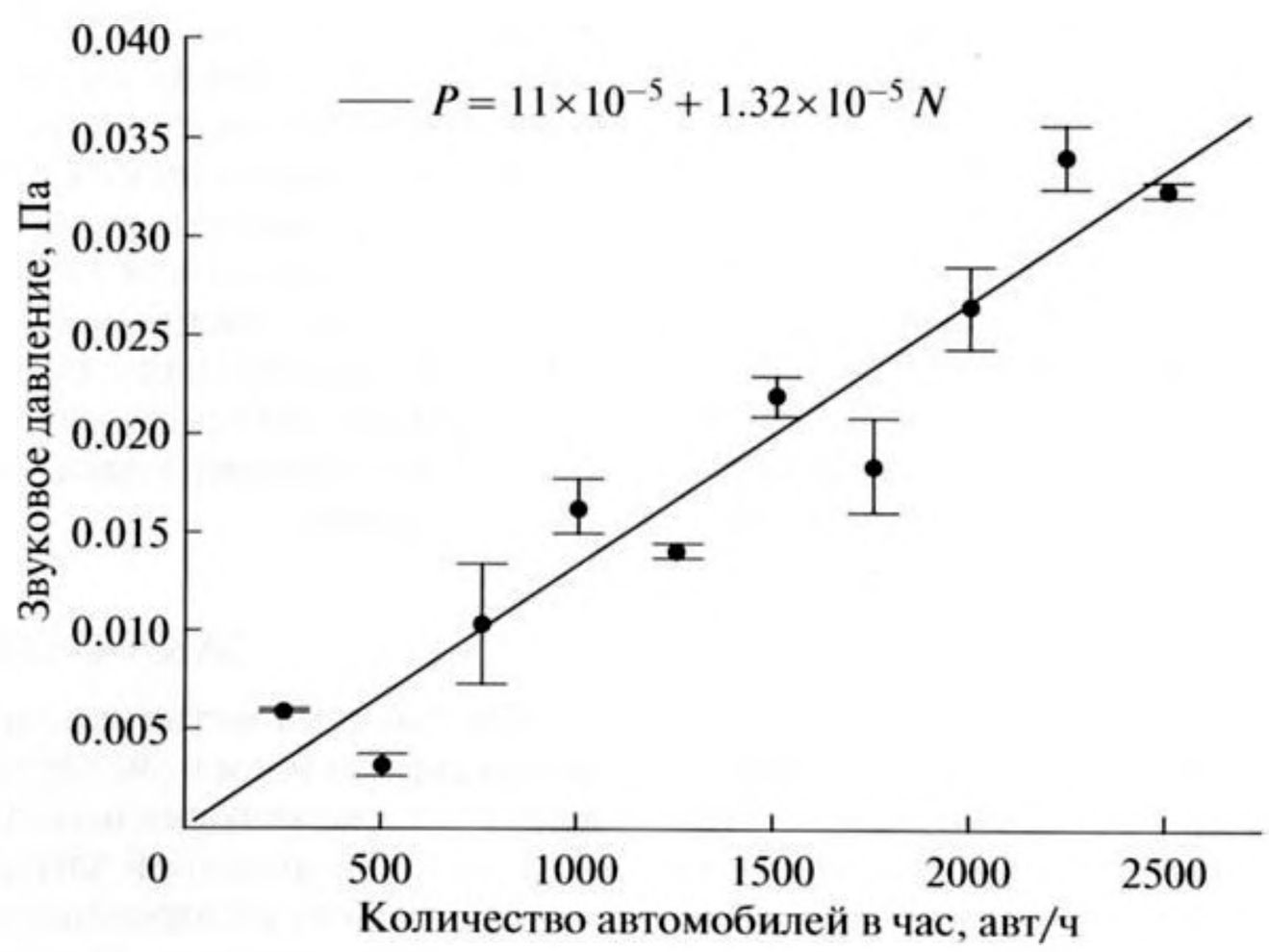


**Рис. 7.** Уровень акустических шумов в зависимости от транспортной нагрузки.

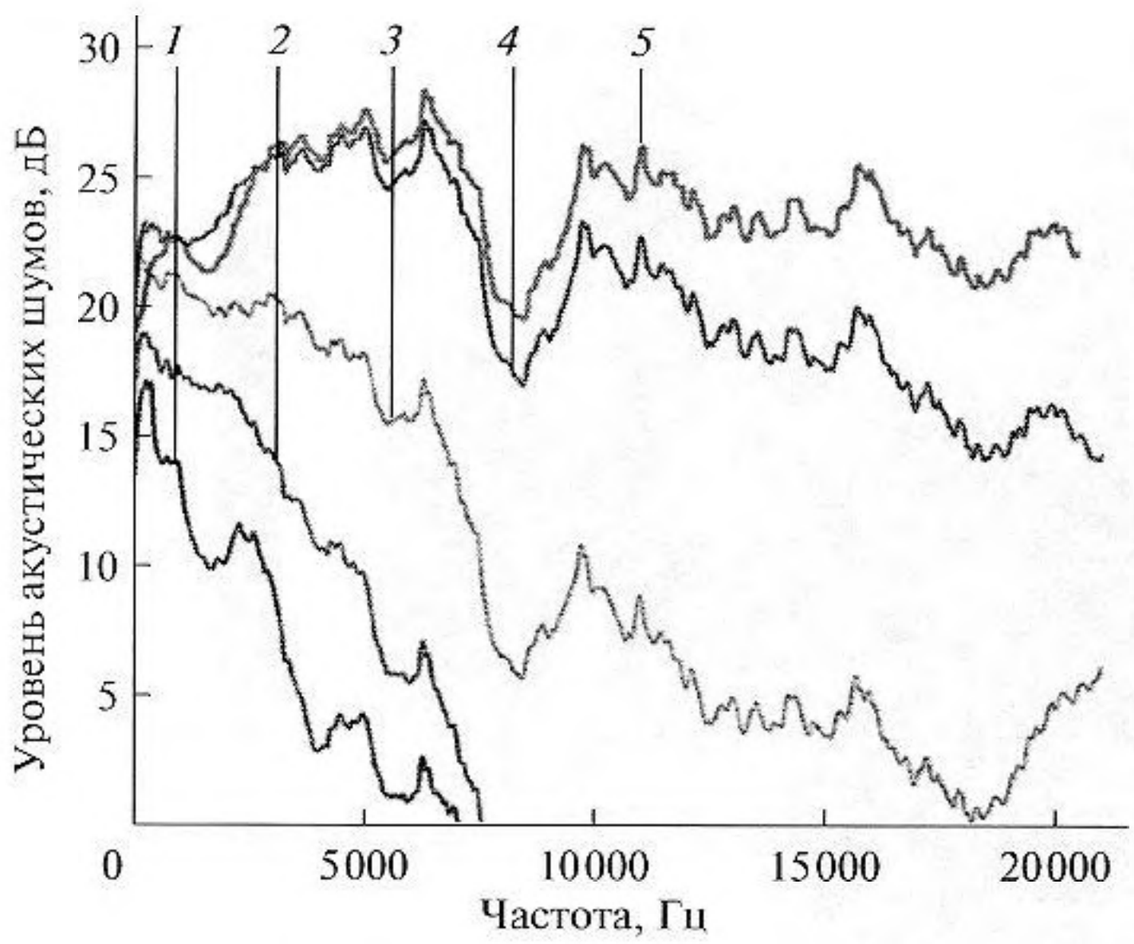


**Рис. 8.** Спектры относительной интенсивности акустических шумов при различных режимах работы двигателя внутреннего сгорания автомобиля: *1* – уровень акустических шумов на холостом ходу (~700 об/мин); *2* – уровень акустических шумов при 1000 об/мин; *3* – уровень акустических шумов при 2000 об/мин; *4* – уровень акустических шумов при 3000 об/мин; *5* – уровень акустических шумов при 4000 об/мин.

шумов транспортных потоков. Таким образом, регрессионная модель зависимости уровня акустических шумов от величины транспортного потока имеет линейный характер (рис. 7). Величины уровня акустических шумов при данной транспортной нагрузке в Па при необходимости можно перевести в дБ по известным формулам.

Эмпирическая зависимость указанных параметров имеет вид:

$$P = 11\times10^{-5} + 1.32\times10^{-5}N, \qquad (3)$$

где $P$ – уровень акустических шумов (Па), $N$ – количество автомобилей в час (авт/ч). Минимальный уровень звукового давления, который человек ощущает, называют порогом слышимости. За порог слышимости принято звуковое давление, равное $2\times10^{-5}$ Па. Данное модельное представление показало, что уровень фоновых шумов в городе превышает этот порог более чем в 5 раз.

Разброс значений при построении регрессионной модели обусловлен тем, что измерения уровня акустических шумов при одной и той же величине транспортного потока проводились в разных местах города, при различном состоянии дорожного покрытия, составе и скорости транспортного потока и других факторов, влияющих на формирование акустического фона, которые необходимо учитывать для построения более точной модели распространения транспортных акустических шумов в городе.

В независимости от скорости транспортного средства существенный вклад в формирование акустических шумов транспорта вносит режим работы двигателя автомобиля. Так как на одной и той же скорости движения автомобиля количество оборотов двигателя может быть различным, то уровень акустических шумов, создаваемых этим двигателем, может варьироваться в широких пределах. В связи с этим был проведен анализ влияния различных режимов работы двигателя автомобиля на формирование акустических шумов транспорта.

Источником акустических шумов был выбран легковой автомобиль с бензиновым двигателем объемом 1600 см$^3$. Измерения проводились в 5 рабочих режимах двигателя автомобиля: на холостом ходу ~700, 1000, 2000, 3000 и 4000 об/мин. Измерительный микрофон был расположен на высоте выпускной трубы глушителя автомобиля, на расстоянии 0.5 м и под углом 45° от ее оси, в соответствии с ГОСТ Р 52231-2004. В результате измерений были построены спектры относительной интенсивности акустических шумов, которые показывают изменение уровня звукового давления при различных режимах работы двигателя внутреннего сгорания автомобиля относительно фонового уровня акустических шумов (рис. 8).

В звуковом диапазоне частот с увеличением числа оборотов двигателя автомобиля увеличивается общий уровень акустических шумов. Однако увеличение уровня акустических шумов в данном диапазоне частот происходит неравномерно. На частотах, лежащих ниже 7 кГц, повышение уровня акустических шумов относительно фонового уровня происходит при любом режиме работы двигателя автомобиля. На частотах выше 7 кГц при малых оборотах двигателя автомобиля (до 2000 об/мин) уровень акустических шумов сравним с фоновым. С увеличением числа оборотов с 2000 об/мин и выше уровень акустических шумов в данном диапазоне частот увеличивается на 25–30 дБ, форма спектра стремится к пологой. Это объясняет пространственное распределение акустических шумов и показателя спада. В местах, где наблюдается повышенная транспортная нагрузка, увеличивается уровень звукового давления и уменьшается показатель спада.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена методика акустического картирования города на основе двухпараметрической модели спектра, которая позволяет не только оценивать уровень шумовой загрязненности, но и проводить анализ распределения энергии в спектре акустических шумов. Построена карта акустических шумов, а также карта пространственного распределения формы спектра, выраженной показателем спада, в г. Томске. Показано, что в де-

ловой части города в звуковом диапазоне частот преобладают значения уровня акустических шумов в пределах от 60 до 65 дБ с показателем спада от 10 до 12.

Анализ уровня акустических шумов от различных режимов работы двигателя автомобиля показал, что с увеличением числа оборотов двигателя автомобиля увеличивается уровень акустических шумов и уменьшается показатель спада, т.е. спектр стремится к равномерному. Это объясняет пространственное распределение акустических шумов и формы спектра в деловой части города Томска, так как в местах, где наблюдается повышенная транспортная нагрузка, происходит увеличение уровня акустических шумов и уменьшение величины показателя спада с 20 до 3.

Предложено модельное описание уровня шума от транспортной нагрузки. В звуковом диапазоне с увеличением количества транспорта уровень шума, выраженный в Па, увеличивается линейно, что дает возможность построения более простой аппроксимационной модели. Функция, описывающая зависимость уровня шума от транспортной нагрузки в звуковом диапазоне частот, имеет вид (3).

Полученные результаты могут быть использованы для оценки уровня транспортных акустических шумов при проектировании автомагистралей, а также городской застройки с целью защиты населения от повышенного воздействия акустических шумов. Полученные результаты могут быть использованы для построения более точной модели шума транспортных потоков и, соответственно, для выработки более качественного подхода к разработке средств и методов для снижения уровня шумов в жилых районах города.

Работа выполнена при поддержке ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 гг.”, ФЦП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 гг.” ГК № 16.518.11.7048 и АВЦП Минобрнауки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Красненко Н.П.* Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. Томск: Водолей, 2001. 278 с.
2. *Красненко Н.П., Одинцов С.Л.* Модель спектра внешних шумов для целей акустического зондирования атмосферы // Акуст. журн. 1979. Т. 25. № 5. С. 749–753.
3. *Тейлор Р.* Шум. Пер. с англ. Д.И. Арнольда / Под ред. Исаковича М.А. М.: Мир, 1978. 308 с.
4. *Kang-Ting Tsai, Min-Der Lin, Yen-Hua Chen.* Noise mapping in urban environments: A Taiwan study // Applied Acoustics. 2009. V. 70. P. 964–972.
5. *Sommerhoff J., Recuero M., Suárez E.* Community noise survey of the city of Valdivia, Chile // Applied Acoustics. 2004. V. 65. P. 643–656.
6. *Kazuo Saito, Tadao Makizuka, Gouichi Tanaka, Shinji Miyake, Tadashi Niioka, Shun Fujimoto, Toshiyuki Hosokawa, Masaharu Kumashiro, Hiroshi Kaji.* An urban noise Survey in Sapporo, Japan // Environ. Sci. Hokkaido. 1986. V. 9. P. 15–26.
7. *Марков С.Б., Пшенин В.Н., Пименов И.К.* Оценка максимальных уровней звука, создаваемых транспортными потоками, на основе экспериментальных исследований // “Защита населения от повышенного шумового воздействия”, II-я Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 17–19 марта 2009. Санкт-Петербург: Красная линия, 2009. С. 467–476.
8. *Бочаров А.А., Соловьев А.В.* Картирование города Томска по спектральным характеристикам акустических шумов // Контроль окружающей среды и климата “КОСК-2010”: Матер. VII-го Всеросс. симп. / Под общ. ред. Кабанова М.В., Тихомирова А.А. Томск, 5–7 июля 2010 г. Томск: Аграф-Пресс, 2010. С. 145–147.
9. *Бочаров А.А., Соловьев А.В.* Влияние интенсивности транспортного потока на общий уровень акустического фона в городе Томске // Известия вузов. Физика. 2010. Т. 53. № 9/3. С. 225–226.
10. *Поспелов П.И.* Борьба с шумом на автомобильных дорогах. М.: Транспорт, 1981. 88 с.
11. *Шуранов Е.В.* Построение карт распределения шумовой нагрузки для районов Санкт-Петербурга // Инновации. 2006. № 7. С.122–124.