

## МОДЕЛИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ И МОНИТОРИНГ ШУМА ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ

© 2004 А.В. Васильев, Д.П. Шевченко

Тольяттинский государственный университет

Рассмотрены основные принципы моделирования и расчета шума транспортных потоков. Для моделирования улично-дорожных сетей выбран метод теории графов. Приводится описание программного обеспечения по составлению шумовых карт нового типа, с использованием которого построены шумовые карты г. Тольятти

В условиях современного города шум транспортных потоков воздействует на окружающую среду и человека наиболее интенсивно (60-80% от общей доли шумов, наступающих человека в жилой застройке), поэтому актуальным является его моделирование, расчет и прогнозирование. Необходимо не только пассивно констатировать всё увеличивающееся воздействие транспортного шума, но и грамотно оценить последствия проводимых мероприятий с использованием различных методов прогнозирования и оценки шума.

Шум автотранспортных потоков зависит от интенсивности движения и состава потока. Ориентировочно шум транспортного потока (дБА) в зависимости от интенсивности движения ( $I$ , автомобилей/ч) для больших интенсивностей 1000-5000 автомобилей/ч можно оценить по формуле:

$$L_A = 72 + 10 \lg \frac{I}{1000}. \quad (1)$$

Зависимость уровня звука от интенсивности движения и состава потока [3] показана на рис. 1.

Распространение шума в застройке имеет отличия от распространения звука в свободном звуковом поле. Эти отличия объясняются в первую очередь наличием отражения от строений, звукопоглощением в зелёных насаждениях, дифракцией звука через различные сооружения, а также наличием реальных источников: например, линейных (транспортные потоки), плоских (стенки шумящих сооружений), точечных (заборные шахты вен-

тиляционных установок, отдельные транспортные экипажи, трансформаторы, самолёты). Линейный источник создаёт цилиндрические звуковые волны, точечный – сферические, плоский – плоские звуковые волны. На большом расстоянии все источники звука являются источниками сферических звуковых волн. Граница перехода, например, цилиндрических волн в сферические (м) будет следующей:

$$r_{sp} = \frac{l}{\pi}, \quad (2)$$

где  $l$  - длина линейного источника, м.

Скорость звука зависит от температуры воздуха, при увеличении её на  $1^\circ$  скорость возрастает на 0,5 м/с. При наличии в воздухе слоев с разной температурой звуковые лучи преломляются и характер затухания звука с

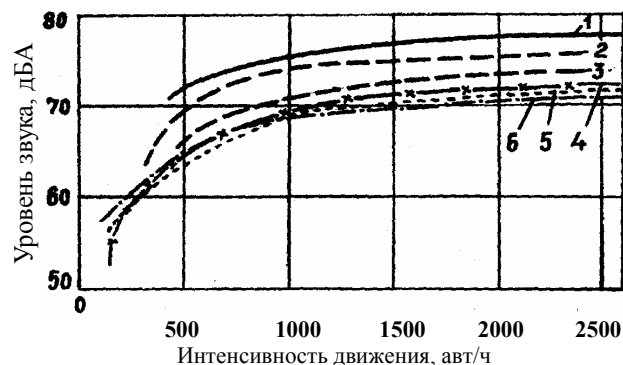


Рис. 1. Зависимость среднего уровня звука от интенсивности движения и состава потока: 1 – свыше 50% состава тяжелых автомобилей; 2 – 33-50%; 3 – 25-33%; 4 – 20-25%; 5 – 15-20%; 6 – до 15 %

расстоянием существенно изменяется. Поэтому в зимние морозные дни или в холодные весенние дни хорошо слышен звук на большие расстояния. Влияние ветра на распространение звука весьма велико, при встречном ветре эффект дополнительного снижения может достигать 20-25 дБ.

На степень затухания при распространении шума влияет состояние отражающей поверхности. Экспериментами показано, что при увеличении высоты распространения звука свыше 5 м это влияние снижается.

Для выполнения расчётов затухания звука от различных источников и в различных условиях можно воспользоваться данными экспериментальных исследований, приведёнными на рис. 2.

Распространение шума на территории жилой застройки - сложный процесс, характеризующийся такими явлениями, как расхождение (дивергенция) звуковых волн, наложение их (интерференция), огибание (дифракция), преломление (рефракция), отражение, рассеяние, поглощение элементами внешней среды и др. Эти явления должны учитываться при расчете звука. Транспортный поток можно представить в виде модели, состоящей из бесконечного числа некогерентных источников шума равной звуковой мощности, расположенных по одной прямой линии на одинаковом расстоянии один от другого. В общем случае, такой источник шума рассматривается как комплексный источник псевдоцилиндрических звуковых волн (уровень звукового давления которых снижается на каждое удвоение расстоя-

ния в пределах от  $> 3$  до  $< 6$  дБ в зависимости от расстояния между источниками шума).

Дифференциальное уравнение распространения таких волн имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left[ \frac{1}{r^n} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} r^n \frac{\partial p}{\partial r} \right\} \right], \quad (3)$$

где  $1 < n < 2$ .

Если  $n = 1$ , то имеем уравнение распространения цилиндрических волн, если  $n = 2$  – уравнение распространения сферических волн.

Площадь псевдоцилиндрической поверхности определяется как:

$$S = 2\pi r^n. \quad (4)$$

Транспортный поток (независимо от его плотности) можно рассматривать и как линейный источник шума (что значительно упрощает расчёты). Однако следует иметь в виду, что это допущение справедливо только для тех случаев, когда шумовой характеристикой потока, лежащей в основе расчета, является эквивалентный уровень звука за период времени, превышающий продолжительность прохождения транспортного средства. Квадрат звукового давления на расстоянии  $r$  от линейного источника записывается в виде:

$$p^2 = W \rho c / 2\pi r. \quad (5)$$

Уровень звукового давления (дБ) при его расположении на акустически жесткой поверхности  $L_p$ , определяется по формуле:

$$L_p = L_w - 10 \lg 2\pi r. \quad (6)$$

Для математического описания улично-дорожных транспортных сетей наиболее удобно использовать методы теории графов. Носителем информации о геометрии улично-дорожной сети города могут быть схемы автомобильных дорог, дорожные атласы, чертежи и др. Однако для построения шумовых карт необходимо преобразовать графическую информацию в аналитическую [4]. Граф представляет собой совокупность вершин и ребер. Информация о структуре графа представляется в виде матрицы.



Рис. 2. Снижение уровня звука над разными поверхностями от транспортного потока длиной 20 м: 1 - над асфальтом; 2 - над грунтом; 3 - над газоном

Для математического описания улично-дорожных транспортных сетей методом теории графов и преобразования графической информации в аналитическую было осуществлено следующее.

Проанализирован математический аппарат описания и разработана математическая модель улично-дорожных транспортных сетей.

Наиболее удовлетворяющими описанию улично-дорожных сетей города являются модели, представляющие моделируемые категории (объекты, процессы, свойства) в виде множества графических символов (узлов, вершин) и отношений – предполагаемых или реальных связей между ними. Самое широкое распространение в настоящее время получили диаграммы в форме потоковых графов (графов состояний и переходов), деревьев событий (целей, свойств) и функциональных сетей различного предназначения и структуры, в том числе стохастической.

Как показывает опыт применения таких диаграмм, их основными достоинствами являются: высокая информативность представления и описания исследуемых категорий, хорошая наглядность и декомпозируемость, доступность и однозначность понимания исследователем и пользователем, удобство интерпретации и обработки на средствах вычислительной техники, возможность применения формализованных процедур анализа и синтеза таких моделей. Они позволяют описывать, а затем и оценивать предикаты первого, второго и высших порядков, являющихся соответственно их свойствами, отношениями между ними и другими категориями. Это достоинство обусловлено возможностью использования различных языков описания, позволяющих переходить от семантических (смысловых) моделей к семиотическим (знаковым) и использовать известные аппараты их исследования.

Из анализа структуры диаграммы влияния следует, что основными ее компонентами служат узлы (вершины) и связи (отношения) между ними. В качестве узлов обычно подразумеваются простейшие элементы моделируемых категорий (переменные или константы) – события, состояния, свойства, а в

качестве связей – активности, работы, ресурсы и другие взаимодействия. Отношения или связи между переменными или константами в узлах диаграммы графически представляются в виде линий, называемых дугами или ребрами.

Каждые два соединенных между собой узла образуют ветвь диаграммы. В тех случаях, когда узлы связаны направленными дугами таким образом, что каждый из них является общим ровно для двух ветвей, возникают циклы или петли. Петли могут характеризоваться порядком, величина которого  $n$  определяется количеством не связанных между собой петель первого порядка. В свою очередь, петля первого порядка не должна содержать внутри себя других петель и обеспечивать достижимость ее любых узлов.

Переменные в узлах характеризуются фреймами данных – множеством выходов (значений, принимаемых переменными, неизменных во времени и между собой не пересекающихся) и условными распределениями вероятностей появления каждого из них. Условные распределения приписываются на диаграмме дугам или ребрам, соединяющим отдельные узлы. В вырожденных случаях вероятностного распределения узел может превращаться в константу, принимающую маргинальное (граничное) значение переменной. Вместо условных распределений допускается использование в диаграммах и отдельных значений, принимаемых переменными.

Однако для осуществления перехода от графических к математическим моделям необходима дополнительная символика.

Переменные и константы, подразумеваемые узлами диаграммы, в последующем будут обозначаться набором символов, объединенных в пять или четыре множества – в зависимости от их набора:

$U = \{1, 2, 3, \dots, j, \dots, u\}$  – множество узлов или вершин диаграммы;

$V = \{v_1, v_2, v_j, \dots, v_u\}$  – множество переменных, им соответствующих;

$\Omega_j = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots\}$  – набор значений, принимаемых  $j$ -ой переменной;

$f_j \in F$  – плотность вероятности распределения переменной  $u$ ;

$\pi \in \pi$  – функция принадлежности линг-

вистической переменной.

Для обозначения отношений между переменными (узлами, вершинами) диаграммы влияния, также будут использоваться соответствующие массивы символов. Эти массивы представлены следующими образом:

$D_{ij} = \{d_1, d_2, d_3, \dots\}$  - множество дуг (ребер), соединяющих узлы  $i$  и  $j$ ;

$A_j$  - вектор дуг-предecessоров (выходящих из узлов, предшествующих данному узлу  $u$  и входящих в него);

$B_j$  - вектор дуг-саксесеров (выходящих из рассматриваемого узла  $u$  и связывающих его с последующими узлами диаграммы);

$P_{ij}$  - вектор мер возможности или вероятности переходов между  $i$  и  $j$ ;

$T_{ij}$  - вектор затрат ресурса (времени) при переходе из узла  $i$  в узел  $j$ .

Введенные обозначения позволяют легко формализовать и однозначно интерпретировать в последующем конкретный процесс или объект, представленный диаграммой влияния. Так, например, основные характеристики ее узлов (вершин) могут быть выражены таким короткежем:

$$\langle U, V, \Omega, F, \pi \rangle \quad (6)$$

а заданные диаграммой отношения или связи между ними –  $\langle D, A, B, P, T \rangle$ .

В свою очередь, математическое представление всей диаграммы влияния в общем случае может быть выражено следующей металингвистической формулой:

$$\langle \text{Диаграмма влияния} \rangle ::= = \langle U \wedge V \wedge \Omega \wedge F \mid \pi \wedge D \wedge A \wedge B \wedge P \mid T \rangle \quad (7)$$

Геометрия двухстороннего графа  $G$  определяется матрицей инциденций (задающей номера вершин) и соответствующей матрицей координат  $\{y^{(i)}\}$ . Каждому ребру  $\{x^{(i1)}, x^{(i2)}\}$  графа  $G$  сопоставляются числовые характеристики, описывающие улично-дорожную сеть:

$n$  - число полос;

$\alpha$  - профиль дороги;

$\beta$  - качество покрытия;

$\gamma$  - директивы по структуре и динамике транспортного потока;

$\delta$  - метеорологические условия;

$\varepsilon$  - окружающий ландшафт;

$\theta$  - другие характеристики (освещённость, наличие распределительных полос, влияющих на диапазон скорости и др.).

Информация о структуре графа представляется в виде матрицы.

С использованием разработанной математической модели построены примерные улично-дорожные транспортные сети г. Тольятти. Транспортные сети состоят из дорог с интенсивной нагрузкой (выделяются в программе чёрной жирной полосой) и паутины местных дорог, дворовых подъездов. Введена нумерация узлов-вершин графа. Предусмотрена процедура очистки графа от несущественных деталей.

Разработаны также алгоритмы кодирования и восстановления информации о структуре графа улично-дорожной транспортной сети.

Можно с уверенностью утверждать, что какими-то одними методами (техническими, организации дорожного движения и др.) не удастся обеспечить нормируемые значения транспортного шума. В этом случае оказываются весьма эффективными методы прогнозирования и оценки шума. Для данных целей наибольшее распространение получил метод составления карт уровней транспортного шума [1-4, 6, 7, 10-14]. При этом рассматривается именно транспортный шум и не включается шум от предприятий, внутриквартальных источников и т. п. Помимо прогнозирования транспортного шума, шумовые карты позволяют более эффективно разработать и внедрить мероприятия по снижению шума.

Карта шума характеризует состояние шумового климата в населенном пункте (городе) в период ее составления и на перспективу от всех видов транспортных средств в городе (населенном пункте). Она констатирует уровень шума на транспортных магистралях, определяет наиболее шумоопасные участки, позволяет рассчитать ожидаемые уровни шума на примагистральной территории и внутри зданий, расположенных на этой территории, а также для определения необходимых мероприятий по снижению шума.

Большим достоинством шумовых карт является их наглядность при оценке величин шума в любой из заданных точек селитебной зоны, возможность цветового и другого представления шумоопасных зон.

Традиционная карта транспортного шума представляет собой нанесенные на картографическом материале города или населенного пункта ожидаемые перспективные эквивалентные уровни звука на основных магистралях для больших городов в дневное и ночное время, для мелких городов — для дневного времени с указанием в характерных точках их номеров и уровней.

Способ обозначения эквивалентных уровней транспортного шума на участках магистралей может быть различным. Наиболее наглядным является варьирование интенсивностью цвета от светлого для низких уровней до более темного — для высоких. При этом ширина цветовой полосы соответствует количеству децибел А на данном участке в выбранном заранее масштабе.

Стремительное развитие вычислительной техники позволило автоматизировать процесс составления шумовых карт. Современные компьютеры с высокой скоростью обрабатывают огромные объемы информации как статистической так и графической. Одними из самых распространенных программных пакетов являются “LIMA”, “SoundPLAN” и др. [9-11, 14]. Эти пакеты интегрировали в себе методы построения графической (карт) информации, обработки баз данных параметров системы и методы визуализации для наглядного представления результатов работы.

В то же время анализ существующих карт транспортного шума показывает, что они отражают лишь текущее положение, существующую в данный момент (а то и в прошедшие периоды) шумовую картину. Она в основном лишь констатирует уровень шума в заданных точках селитебной территории и определяет наиболее шумоопасные участки. А ведь потенциальные возможности использования метода составления шумовых карт гораздо более широкие. Например, анализ шумовой карты может позволить рассчитать ожидаемые уровни шума на примагистраль-

ной территории и внутри зданий, расположенных на этой территории, а также определить целесообразность мероприятий по снижению шума.

Авторами разработано программное обеспечение “Sound City Test”, позволяющее осуществлять расчет и сохранение в базе данных результатов измерения городского шума. Отличительной особенностью программы является возможность добавлять в базу данных карты районов и участков города и отображать на них результаты расчетов. В режиме отображения на карте программа выводит на экран график показывающий изменение шумовой обстановки в данной точке с течением времени. Это позволит строить прогноз улучшения или ухудшения шумовой обстановки.

При запуске программы открывается главное окно, в верхней части которого расположено меню, состоящее из двух пунктов — “Окна” и “Помощь”. Пункт меню “Окна” включает в себя следующие подпункты: “Ввод измерений”; “Карта” (рис. 3).

Выбор подпункта меню “Ввод измерений” приведет к открытию окна “Контрольные точки” (рис. 3). Окно логически разделено на две части — вверху “Ввод и редактирование точек”, внизу “Ввод и редактирование измерений в точках”.

Все точки представлены в специальной форме с сеткой. На экране представлена следующая информация:

- “Код точки”. Присваивается пользователем в соответствии с принятой системой кодировки точек;
- “Улица”. Выбирается из справочника улиц;
- “Комментарий”;
- “Карта”. Отображает название карты, на которой указана точка.

Для выбора нужной точки необходимо мышью указать на точку и нажать кнопку мыши. При этом черный треугольник справа переместится на указанную точку. После выбора нужной точки в нижней части окна отображается информация по измерениям привязанным к указанной точке.

Сразу под формой с сеткой расположены кнопки необходимые для работы с точками.

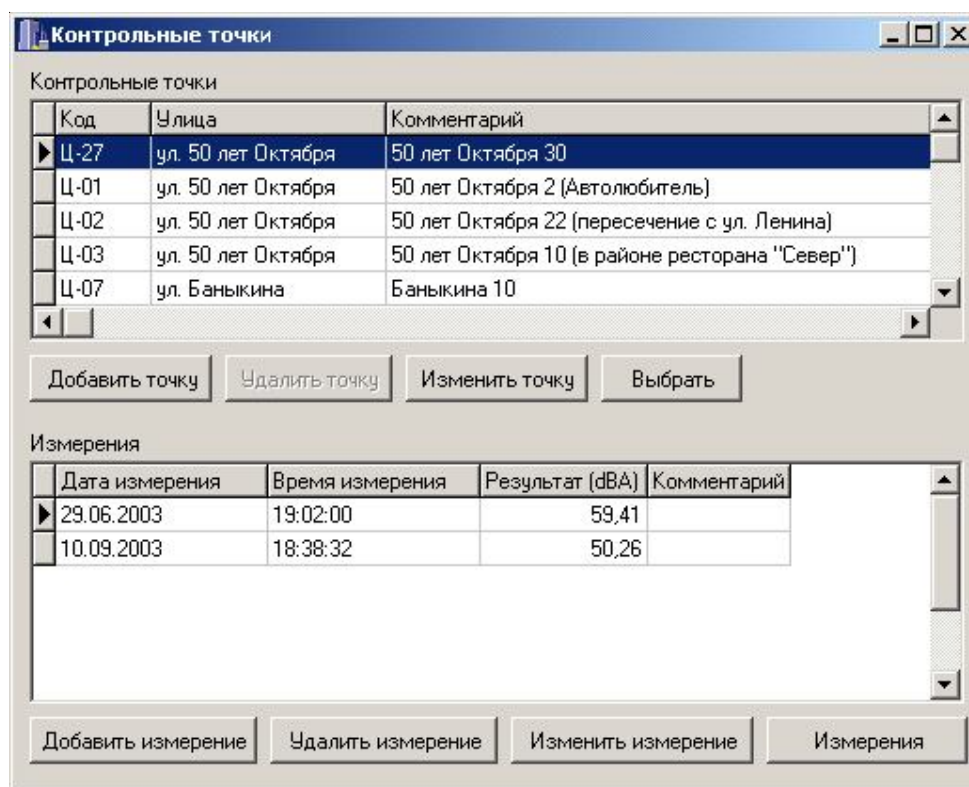


Рис. 3. Окно "Контрольные точки"

Кнопка "Добавить точку" позволяет добавить новую точку в базу данных. При нажатии на кнопку открывается новое окно, содержащее следующие поля для ввода информации:

- "Улица";
- "Код точки";
- "Комментарий".

Окно содержит следующие поля для ввода информации:

- "Дата измерения";
- "Время измерения";
- "Комментарий".

После заполнения полей необходимо нажать на кнопку "ОК". При этом произойдет запись информации в базу данных. При нажатии на кнопку "Cancel" запись не произойдет.

Кнопка "Измерения" предназначена для ввода результатов измерений по существующей методике ГОСТ (рис. 4).

Авторами предложена методика моделирования транспортного шума и составления шумовых карт нового типа, позволяющих с достаточной степенью точности осуществлять прогнозирование изменения шумовой картины в той или иной шумоопасной зоне.

Согласно предложенному авторами методу, карты разрабатываются следующим образом: в определенных точках, расположенных в некоторой шумоопасной зоне (зонах), накапливаются результаты всех предыдущих измерений уровней шума и выдается заключение о динамике изменения уровня шума и ближайшей и долгосрочной перспективе. При этом метод представления результатов может быть различным – видеодецибелы, табличное представление, графики и др. (возможно и спектральное представление результатов измерений). Для карт данного типа авторами предложено название: динамические карты шума.

Составление динамических карт уровней шума в селитебной территории особенно эффективно для последующего прогнозирования и оценки шума селитебной территории, а также выбора тех или иных мероприятий по снижению шума в данной шумоопасной зоне. В настоящее время авторы реализуют идею динамических карт шума для анализа шумоопасных зон г. Тольятти. Так, в программном обеспечении "Sound City Test" имеется подпункт меню "Карта", выбор которого приведет к открытию окна "Карта".

Измерения																				
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	76	66	61	68	60	65	64	60	60	55	63	62	71	63	49	62	64	57	51	64
2	66	61	64	58	63	53	69	60	62	60	64	54	68	62	62	60	68	66	65	63
3	64	72	65	60	67	62	64	66	60	59	67	64	60	74	61	48	61	63	57	50
4	65	69	64	63	59	62	60	69	61	64	64	68	58	64	60	62	58	64	65	63
5	64	63	70	66	64	64	65	63	65	60	57	70	66	58	75	60	54	62	63	55
6	53	68	68	66	64	60	64	61	66	62	60	57	66	60	65	50	60	62	63	65
7	63	60	64	70	67	66	66	66	62	62	59	58	65	66	64	70	62	62	65	64
8	53	56	67	67	65	63	60	65	62	65	62	61	56	67	64	66	51	58	62	64
9	64	64	60	58	69	74	65	66	62	64	60	58	63	66	64	66	65	65	58	66
10	65	52	58	66	68	62	64	61	55	64	66	62	60	54	66	57	70	55	61	61
11	62	61	67	65	64	58	73	65	67	62	63	58	58	53	62	66	67	67	64	60
12	64	66	54	62	61	62	62	67	66	54	62	67	63	68	57	64	56	68	62	60
13	63	60	60	70	62	62	59	70	62	65	64	60	59	57	54	61	65	62	67	63
14	62	68	64	56	63	61	62	64	64	67	57	60	62	58	59	58	66	58	65	62
15	60	59	61	61	68	60	57	58	65	63	63	65	64	62	56	55	64	68	60	66
16	61	62	60	66	64	65	54	62	60	65	64	63	58	63	61	58	59	62	63	65
17	64	64	61	66	61	61	60	56	62	63	66	64	50	65	66	58	52	67	69	62
18	67	60	61	56	68	62	62	58	61	61	66	63	67	62	64	57	61	62	53	

Рис. 4. Окно "Измерения"

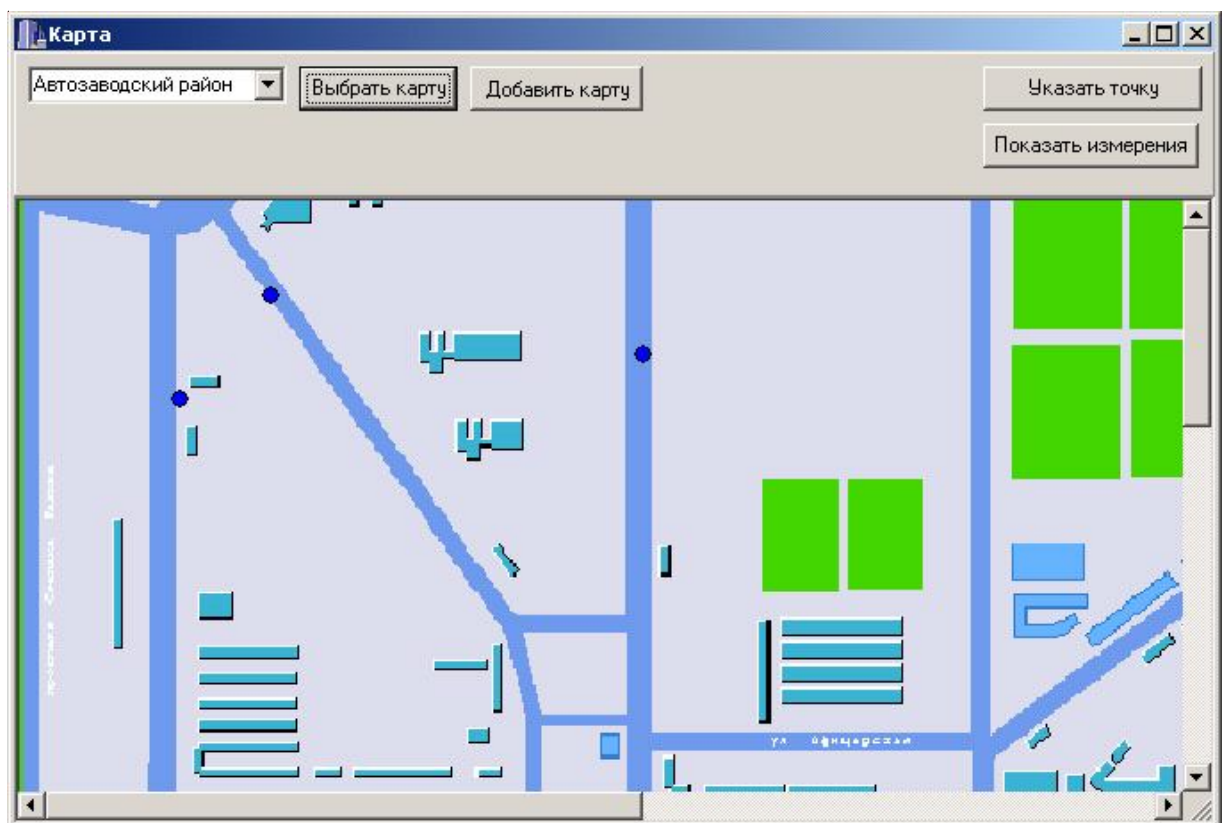


Рис. 5. Загрузка карты выбранного участка селитебной территории в окно



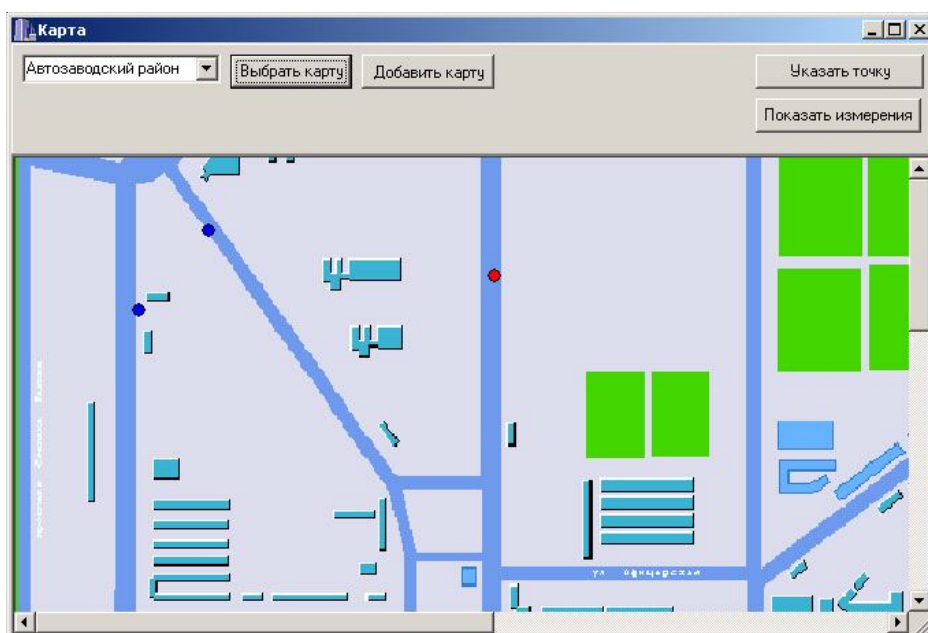


Рис. 6. Указание точки на карте

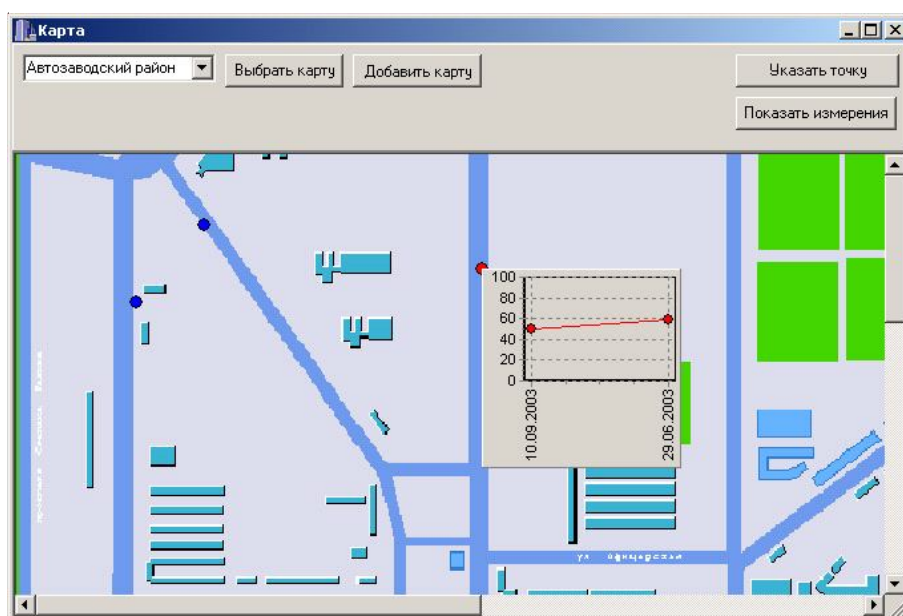


Рис. 7. Отображение измерений в виде графика

Вверху окна расположена панель управления с кнопками необходимыми для работы с картой. Для начала работы необходимо выбрать карту. Для этого в выпадающем списке выберите нужное название карты и нажмите кнопку “Выбрать”. При этом указанная карта загрузится в окно (рис. 5).

Как видно из рис. 5, одновременно с картой отобразились и некоторые контрольные точки. Для этих точек пользователем была задана эта карта и указаны координаты расположения. При выборе другой карты все

точки предыдущей карты с экрана будут удалены и загружены новые.

Для работы с точкой необходимо ее указать (рис. 6). После того как точка выбрана, у нее может быть изменено расположение или отображены введенные измерения в виде графика (рис. 7).

С использованием программного обеспечения авторами построены динамические шумовые карты селитебных зон Центрального, Комсомольского и Автозаводского районов г. Тольятти.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев А.В.* Снижение шума транспортных потоков в условиях современного города // *Экология и промышленность России*. 2004. №6.
2. *Васильев А.В., Шевченко Д.П.* О проблемах снижения шума транспортных потоков урбанизированных комплексов // *Наука, техника, образование г. Тольятти и Волжского региона (часть 2)*. Тольятти, 2001.
3. *Иванов Н.И., Никифоров А.С.* Основы виброакустики: Учебник для вузов. С-Пб.: Политехника, 2000.
4. *В.Н. Луканин, А.П. Буслаев, Ю.В. Трофименко, М.В. Яшина.* Автотранспортные потоки и окружающая среда. Учебное пособие. М.: ИНФРА-М, 1998.
5. Санитарные нормы СН-2.2.4/2.1.8.562-96 "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1997.
6. *Н.И. Смоляр, Л.Б. Миротин.* Шумовое загрязнение городской среды транспортными потоками. Комплексное развитие автомобильного транспорта крупных городов. М.: 1981.
7. *А.А. Факторович, Г.И. Постников.* Защита городов от транспортного шума. Киев: Будівельник, 1982.
8. Экологический атлас г. Тольятти (карта уровней шума). НПО "Мониторинг", С-Пб., 1996.
9. *Luzzi S., Falchi S.* Mapping and Reducing Noise Pollution in Hospitals. Proc. of the First International Scientific-Technical Conference "Ecology and Life Protection of Industrial-Transport Complexes" ELPIT-2003, September 11-14 2003, Togliatti, Russia.
10. *C. Roovers, G. Van Blokland, K. Psychas.* Road Traffic Mapping on an European Scale. Proc. of "Inter-Noise 2000" International Congress, Nice, France, August 2000, Vol.1.
11. *J.S. Santiago, J. Pons.* New acoustic map of Madrid. Proc. of "Inter-Noise 2000" International Congress, Nice, France, August 2000. Vol.1.
12. *Vasiliev A.V.* Transport Noise Influence to the Housing Estates of Togliatti City: History and Recent Results. Proc. of the Italian Scientific-Technical Conference "Rumore nei Trasporti" (Atti e Documenti della III Giornata di Studio sull'Acustica Ambiente), Florence, Italy, February 26, 2004.
13. *A.V. Vasiliev, N.D. Utkin, L.A. Pereshivailov.* Transport Noise Affection to the Housing Estates. Proc. of the 8<sup>th</sup> International Congress on Noise as a Public Health Problem, Rotterdam, The Netherlands, 29 June – 3 July 2003.
14. *C. Vogiatzis.* Noise mapping in Greece and the psychosocial parameters of Mediterranean countries. Proc. of "Inter-Noise 2000" International Congress, Nice, France, August 2000. Vol.1.

**MODELLING, CALCULATION AND MONITORING  
OF TRANSPORT FLOWS NOISE**

© 2004 A.V. Vasiliev, D.P. Shevchenko

Togliatti State University

Main principles of transport flows noise modeling and calculation are considered. For modeling of road streets methods of graphs theory are selected. Program provision for transport noise mapping of new type is described. Using this program provision noise maps of Togliatti city were created.