

# 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, настигающих 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: тилационных установок, отдельные транспортные экипажи, трансформаторы, самолёты). Линейный источник создаёт цилиндрические

$$L_{\text{д}} = 72 + 10 \lg \frac{I}{1000}$$

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-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:

где  $l$  - длина линейного источника, м.

Скорость звука зависит от температуры

$$v_{\text{зв}} = \frac{l}{\pi}$$

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

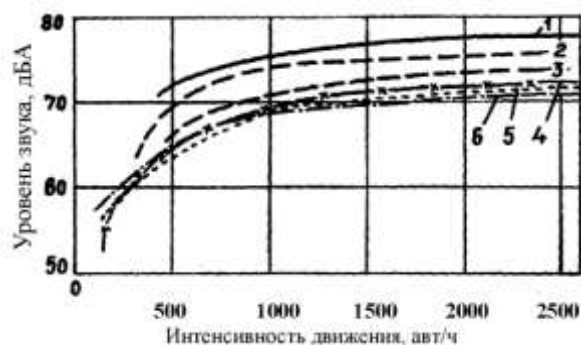


Рис. 1. Зависимость среднего уровня звука от интенсивности движения и состава потока:

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



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

Дифференциальное уравнение распространения таких волн имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \left[ \frac{1}{r^n} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} r^n \frac{\partial p}{\partial r} \right\} \right]$$

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:

$$S = 2\pi r^n$$

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:

Для математического описания улично-дорожных транспортных сетей наиболее удобно

$$p^2 = W \rho c / 2\pi r.$$

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

$$L_p = L_w - 10 \lg 2\pi r.$$

использовать методы теории графов. Носителем информации о геометрии уличнодорожной 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.

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 назначения 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  $y$ ;

$\pi \in \pi$  — функция принадлежности лингвистической 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);

$P$  — вектор мер возможности или вероятности переходов между  $i$  и  $j$ ;

$T$  — 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 кортежем:

$$\langle U, V, \Omega, F, \pi \rangle$$

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:

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

Геометрия двухстороннего графа  $G$  определяется матрицей инцидентий (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  $A$  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 примагистральной 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.

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

- “Улица”;

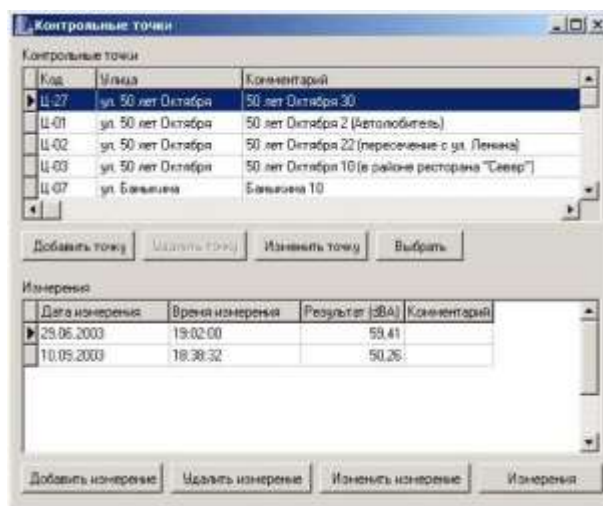


Рис. 3. Окно “Контрольные точки”

- “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”. 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.

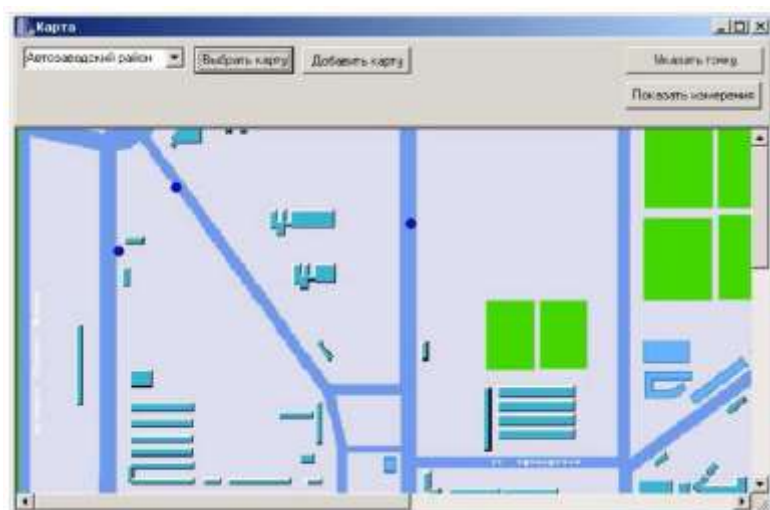


Рис. 5. Загрузка карты выбранного участка селитебной территории в окно



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”, СПб., 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 “InterNoise 2000” International Congress, Nice, France, August 2000. Vol.1.