

УДК: 504.75

DOI: [10.46698/VNC.2023.76.91.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.76.91.011)

Оригинальная статья

Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом

В.Б. Заалишвили , А.С. Кануков , К.В. Корбесова , М.В. Майсурадзе 

Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук, Россия, 362002, РСО-Алания, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Статья поступила: 27.04.2021, доработана: 22.05.2021, принята к публикации: 30.05.2021

Резюме: Актуальность работы. В связи с растущим антропогенным воздействием охрана природной среды превратилась в глобальную проблему. Важнейшей составной частью современной жизни является транспорт. Экономическое развитие всех регионов основано на доступе людей к товарам и услугам, которые обеспечиваются современной транспортной инфраструктурой. Автомобильный транспорт является основным способом транспортировки грузов и населения. В то же время положительные аспекты использования транспорта тесно связаны с загрязнением природной среды. Исследования, проводимые в последние десятилетия, указывают на то, что загрязнение воздуха оказывает значительное негативное влияние на здоровье, и транспорт является при этом одним из важнейших источников загрязнения. Дорожное движение представляет собой крупнейший источник выбросов многих вредных для здоровья загрязнителей воздуха, таких как оксид углерода, оксиды азота, бензол и первичные РМ₁₀. Несмотря на большой объем научных исследований, проводимых в последние десятилетия, все еще открытым остается вопрос интегральной оценки уровня загрязнения природной среды от различных источников. При этом в целях разработки действенных мер по снижению уровня загрязнения необходимым представляется разработка карт загрязнения территории на основе подобного интегрального показателя. Построение карт предполагает использование значительного количества исходных данных, и разработку специальной методики для расчёта уровня загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом. **Методы исследования.** В ходе настоящей работы были проанализированы имеющиеся методики измерения концентраций поллютантов, производимых автотранспортом, в атмосферном воздухе. Установлено, что принятые подходы предполагают проведение длительных наблюдений, сбор и обработку большого количества исходных данных, а также наличие значительного количества специального оборудования. В этой связи разработана собственная методика проведения экспериментальных исследований. **Результаты работы.** В результате проведенных исследований разработана экспресс методика измерения концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, что позволяет в короткий срок и с помощью одного газоанализатора оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом. Данный метод использован при расчёте предложенного авторами показателя загрязнения $Z_{\text{атм}}$.

Ключевые слова: урбанизированная территория, экология, загрязнения, окружающая среда, автомобильный транспорт, вредные выбросы, атмосферный воздух, показатель загрязнения.

Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №20-35-90090.

Для цитирования: Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 133-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.

[DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.76.91.011)

Original paper

Determination of air pollution levels caused by the road transport in urbanized areas

V.B. Zaalishvili^{id}, A.S. Kanukov^{id}, K.V. Korbesova^{id}, M.V. Maisuradze^{id}

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: cgi_ras@mail.ru

Received: 27.04.2021, revised: 22.05.2021, accepted: 30.05.2021

Abstract: Relevance. Due to increasing anthropogenic impact, environmental protection has become a global problem. Transportation is an essential component of modern life. The economic development in all regions is based on people's access to goods and services provided by modern transportation infrastructure. The road transport is the primary means of transporting goods and people, but its positive aspects are closely linked to environmental pollution. Research conducted over the past decade indicates that air pollution has a significant negative impact on health, and transportation is one of the most important sources of pollution. Road traffic is the largest source of emissions of many harmful air pollutants, such as carbon monoxide, nitrogen oxides, benzene, and primary PM10. Despite the large volume of scientific research conducted in recent decades, the question of an integrated assessment of environmental pollution levels from various sources remains open. To develop effective measures to reduce pollution levels, it is necessary to develop pollution maps based on such an integrated indicator. The construction of maps involves the use of a significant amount of data and the development of a special methodology for calculating the level of air pollution caused by automobile transportation. **Research Methods:** In this study, existing methods for measuring pollutant concentrations produced by vehicles in the atmosphere were analyzed. It was found that the adopted approaches involve conducting long-term observations, collecting and processing a large amount of raw data, as well as having a significant amount of specialized equipment. In this regard, our own methodology for conducting experimental research has been developed. **Results:** As a result of the research, an express method for measuring pollutant concentrations in the atmosphere has been developed, which allows for a quick assessment of air pollution levels caused by automobile transportation using only one gas analyzer. This method was used in calculating the proposed pollution indicator *Zatm*.

Keywords: urbanized area, ecology, pollution, environment, road transport, harmful emissions, atmospheric air, pollution indicator.

Acknowledgments: *This research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) under project number 20-35-90090.*

For citation: Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V., Maisuradze M.V. Determination of air pollution levels caused by the road transport in urbanized areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 133-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.

Введение

В связи с растущим антропогенным воздействием охрана природной среды превратилась в глобальную проблему. Важнейшей составной частью современной жизни является транспорт. Экономическое развитие всех регионов основано на доступе людей к товарам и услугам, которые обеспечиваются современной транспортной инфраструктурой. Автомобильный транспорт является основным способом транспортировки грузов и населения. В то же время положительные аспекты использования транспорта тесно связаны с загрязнением природной среды. Исследования, проводимые в последние десятилетия, указывают на то, что загрязне-

ние воздуха оказывает значительное негативное влияние на здоровье, и транспорт является при этом одним из важнейших источников загрязнения. Дорожное движение является крупнейшим источником выбросов многих вредных для здоровья загрязнителей воздуха, таких как оксид углерода, оксиды азота, бензол и первичные PM₁₀ (частицы различных веществ диаметром 10 мкм и менее). Несмотря на большой объем научных исследований, проводимых в последние десятилетия, все еще открытым остается вопрос интегральной оценки уровня загрязнения природной среды от различных источников. При этом в целях разработки действенных мер по снижению уровня загрязнения необходимым представляется разработка карт загрязнения территории на основе подобного интегрального показателя. Построение карт предполагает использование значительного количества исходных данных, и разработку специальной методики для расчёта уровня загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом.

Большое число воздушных загрязнителей различной токсичности поступает в природную среду при движении или работе автомобильного транспорта. Попадают загрязнители в природную среду из транспортных средств, оснащенных двигателями внутреннего сгорания, а также их элементов (тормоза, диски сцепления, шины и топливные баки), и, кроме того, от продуктов износа дорожного покрытия. Исследования влияния движения транспорта на качество природной среды в городских районах начаты за рубежом относительно недавно [Wheeler, Rolfe 1979; Elwood, 1983; Elwood, Gallacher 1984; McClellan 1986]. В большинстве исследований основное внимание уделяется загрязнению воздуха автомобильными выбросами и их воздействию на здоровье человека [Chamberlain, 1983; Elwood, 1986; Schroeder et al., 1987]. Подобные исследования достаточно активно проводятся и в России [Вигдорович и др., 2005; Кобрин, 2016; Каташинская, Суппес, 2016; Сонов и др., 2016; Шулепова, Сидоров, 2018; Сокол, Жердев, 2018].

В связи с тем, что большую часть исследуемой территории Северной Осетии занимают горные и предгорные районы, автомобильный транспорт служит основным видом транспорта во внутрихозяйственных связях Республики. Характерным для Республики является расширение сферы рационального применения автомобильного транспорта. Автотранспорт принял на себя перевозки мелких партий высокоценных и скоропортящихся грузов на дальние расстояния, значительную долю перевозок на средние расстояния (300–1000 км) и практически все перевозки на короткие расстояния (до 100–150 км). В структуре пассажирооборота перевозка пассажиров автомобильным транспортом составляет 64,9%.

Уровень загрязнения воздуха варьируется во времени и пространстве, в зависимости от различных особенностей, таких как близость к дорогам, состав автопарка, транспортного потока и наличия других источников загрязнения. В современных работах исследуется пространственное распределение загрязнения на основе геоинформационных технологий [Zhang, 2006; Sutherland, Tolosa, 2000; Wang et al., 2012], проводится факторный анализ [Zalakeviciute et al., 2020]. Для оценки и моделирования загрязнения воздуха используется видеофиксация транспортных потоков [Ситников, 2016, 2017]. Содержание тяжелых металлов исследуется не только в грунтах, но и в различных растениях [Jankowski et al., 2014; Самолдина и др., 2016; Turkyilmaz et al., 2018; Степанова и др., 2019; Бекузарова и др., 2020]. В силу особенностей корневой системы для оценки загрязнения воздуха может быть использован анализ содержания металлов во мхах и лишайниках [Garty, 2001; Kosta, Liiv,

2011]. Загрязнение природной среды твердыми частицами в отработанных газах может быть самой большой потенциальной угрозой здоровью населения [Hoek et al., 2002]. Многочисленные исследования указывают на то, что некоторые заболевания прямо связаны с уровнем загрязнения воздуха, вызванным влиянием большого числа автомобильного транспорта [Künzli et al., 2000]. Эффекты от воздействия вредных веществ на организм человека могут иметь различные последствия: от краткосрочного ухудшения и появления респираторных симптомов до сокращения продолжительности жизни.

Количество выбросов вредных веществ, а также их химический состав напрямую влияют на уровень загрязнения атмосферы. Кроме того, существенными факторами являются высота, на которой происходят выбросы, а также климатические условия местности, которыми определяется перенос, превращение и рассеивание выбрасываемых вредных веществ. За загрязнением атмосферного воздуха в Республике Северная Осетия-Алания осуществляются регулярные наблюдения, проводимые в рамках части системы государственного мониторинга за атмосферным воздухом в единой системе государственного экологического мониторинга Российской Федерации.

Методы работы

Традиционно моделирование рассеяния выхлопных газов транспортных средств можно разделить на эмпирическую модель Гаусса, статистическую модель и численную модель. Модель Гаусса, основанная на аналитическом решении переноса загрязняющих веществ, широко используется для прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ от транспортных средств. Типичная гауссовская модель включает HIWAY [Zimmerman, Thompson, 1975] и ее обновленную версию HIWAY-2 [Petersen, 1980], GM [Chock, 1978] и серию моделей CALINE [Benson, 1992]. Хотя модель Гаусса можно легко использовать, коэффициенты диффузии необходимо эмпирически сопоставлять с различными местными атмосферными условиями. Кроме того, точность гауссовской модели вызывает сомнения в области ближнего следа за транспортным средством, поскольку постоянная рециркуляция и вихри в этой конкретной области приводят к тому, что дисперсия загрязняющих веществ больше не соответствует гауссовскому распределению. С другой стороны, большинство статистических моделей, по-видимому, связаны с краткосрочными прогнозами загрязняющих веществ в городских районах в режиме реального времени [Sharma, Khare, 2001]. Различные подходы к моделированию, такие как моделирование Монте-Карло [Liu et al., 1994], стохастический метод [Karim et al., 1998] и метод регрессии [Fomunung et al., 1999], использовались для описания изменчивости свойств загрязняющих веществ в процессе диспергирования загрязнителя. Однако применение статистических моделей для рассеивания загрязняющих веществ, выбрасываемых транспортными средствами, особенно в ближней зоне движения транспортных средств, имеет относительно ограниченное применение. Численная модель, которая численно интегрирует уравнения сохранения массы, импульса и энергии потока жидкости, недавно была использована для процесса рассеивания загрязняющих веществ от дорожных транспортных средств вблизи дороги, уличного каньона и городских масштабов. Эскридж и Хант [Eskridge, Hunt, 1979] разработали теорию следа транспортного средства, основанную на подходе пограничного слоя, для изучения дефицита скорости и масштаба длины следа.

Чан и др. [Chan et al., 2002] и Ридл и др. [Riddle et al., 2004] использовали усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS) для моделирования структуры турбулентности, сохранения энергии и переноса частиц для сложного потока жидкости. На сегодняшний день большинство прогнозов рассеивания и переноса загрязняющих веществ из транспортных средств с помощью подхода RANS справились со сложной городской местностью, например, с уличным каньоном [Vardoulakis et al., 2003]. Чан и др. [Chan et al., 2001] разработали двумерную численную модель рассеивания загрязняющих веществ, основанную на объединенном подходе скалярной функции плотности вероятности (PDF) в сочетании с моделью турбулентности *k- ϵ* , для моделирования начального процесса рассеивания оксидов азота, распределения температуры и скорости потока из выхлопного шлейфа транспортного средства. Ким и др. [Kim et al., 2001] разработали трехмерную численную модель в сочетании с турбулентностью для прогнозирования рассеивания углекислого газа из выхлопных газов большегрузных грузовиков. Хотя RANS позволяет рассчитывать сложные геометрии потока и турбулентность, она ограничена стационарными задачами. Моделирование больших вихрей (LES) кажется более привлекательным подходом к пониманию динамики структур потока и нестационарного процесса рассеивания загрязняющих веществ. Точное численное моделирование структур течения и рассеивания загрязняющих веществ (скалярного переноса) в ближней кильватерной зоне транспортного средства должно учитывать эффекты турбулентной диффузии, вихревой рециркуляции, теплопереноса и переноса частиц и т.д. Хотя подход LES также использовался для прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ в каньоне городских улиц [Chabni et al., 1998; Walton et al., 2002; Liu, Barth, 2002; Liu et al., 2005] и на обочинах [Laatar et al., 2002], по всей видимости, подход LES не применяется для рассеивания загрязняющих веществ в зоне ближнего следа транспортных средств.

Крайне важно, что структура потока не только оказывает непосредственное влияние на здоровье человека, особенно на водителей, велосипедистов, пешеходов, людей, работающих поблизости, и пассажиров транспортных средств [Chan et al., 2001], но также составляет основную часть общего рассеивания загрязняющих веществ [Venkatram et al., 1999].

Приказом от 27 ноября 2019 г. N 804 Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации утверждена методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха.

Согласно данной методике для организации натурных обследований потоков автотранспорта производится анализ их территориального распределения, изучаются данные по размерам изучаемой территории, количеству проживающего на ней населения, схемы организации дорожного движения, собирается информация по расположению объектов, которые оказывают отрицательное воздействие на природную среду, а также изучается зависимость интенсивности дорожного движения от времени суток, дней недели, сезонов и годовые изменения в целом.

При проведении натурных обследований по установлению интенсивности движения и его структуры применяются следующие способы:

- фиксация движения автотранспортных средств визуальными методами
- использование видеозаписей для видеофиксации
- использование данных по непрерывному автоматическому учёту для видеофиксации

В качестве визуального способа обследования используется фиксация количества автотранспорта, которые проезжают по исследуемому участку автомобильной дороги.

Использование видеозаписей для видеофиксации осуществляется в два этапа:

- производится видеофиксация с сохранением видеоматериала, по которому можно идентифицировать типы, технические и конструктивные особенности автотранспортных средств, осуществляющих движение в потоке трафика;

- по видеофайлам визуально определяется интенсивность движения

В случае, когда используется способ по использованию видеозаписей для видеофиксации, в точке наблюдения за участком дороги на штативе устанавливается камера. В течение каждого часа от одного до двух раз производится 20-минутная запись.

При использовании данных по непрерывному автоматическому учёту для видеофиксации требуется наличие данных не менее чем за двухлетний период.

Значение удельного пробегового выброса выбросов i -го загрязнителя (г/с) от движущегося потока трафика на обследуемом участке автодороги с установленной протяженностью L (км) определяется согласно следующему выражению (2.1):

$$M_{M,i} = \frac{L}{1200} \sum_1^k M_{k,i}^L * G_k(G_{kn}) * r_{V_{k,j}} \quad (1)$$

где L (км) – протяженность участка автомобильной дороги;

$M_{k,i}^L$ (г/км) – удельный пробеговой выброс i -го загрязнителя для k -го типа автотранспортного средства (определяется по данным таблицы 2.1);

G_k – параметр, определяющий наибольшую интенсивность движения транспортного потока, который определяется как максимальное количество автотранспортных средств для каждой k -ой группы, прошедших через установленное сечение определенного участка автомобильной дороги за 20-минутный интервал времени в обоих направлениях движения и по всем полосам;

G_{kn} – число автотранспортных средств для каждого k типа, которые находились в «пробке» на всём обследуемом участке автомобильной дороги в 20 минутный интервал времени. Данный параметр используется вместо G_k в случае наличия на исследуемом участке «пробки».

k – количество групп всех транспортных средств, движущихся по обследуемому участку;

$r_{V_{k,j}}$ – поправочный коэффициент, с помощью которого учитывается зависимость изменения объема поступающих загрязняющих веществ в зависимости от средней скорости потока трафика ($V_{k,j}$ (км/час) на выбранном участке автодороги (всей автодороги), который определяется по таблице 2.2. Наименьшая скорость движения транспортного потока в «пробке» принимается равной 5 км/час. Для выбросов оксидов азота используется поправочный коэффициент $r_{V_{k,1}}(NO_x)$.

Таким образом, для того, чтобы оценить уровень загрязнения атмосферного воздуха требуются трудоемкие наблюдения, проводимые не один год. Кроме того, в данном подходе используются усредненные значения объемов выбросов автотранспортом, без учёта технического состояния автомобильного парка, без учёта фактического содержания загрязнителей в атмосферном воздухе.

Результаты работы и их обсуждение

Для изучения фактического содержания некоторых вредных веществ (оксид углерода, углеводороды и диоксиды азота и серы) в атмосферном воздухе города Владикавказа нами были проведены измерения с помощью газоанализатора «Эко-лаб».

На рисунке 1 приведена зависимость концентрации оксида углерода и диоксидов азота и серы от удаления до автодороги. На графиках приведены рассчитанные регрессионные выражения связи уровня загрязнения атмосферного воздуха от удаления до дороги. Вычисляя по формуле (1) концентрацию оксида углерода в атмосферном воздухе на расстоянии 10 метров от края дорожного полотна, мы получили среднее значение $C_{CO}=0,0165$ мг/м³. Аналогично при экспериментальных наблюдениях, при удалении от дороги на расстояние 10 метров и более, концентрация CO и SO₂ снижалась практически до нуля.

Кроме того было установлено, что при установке газоанализатора на высоту 1 метр от уровня проезжей части концентрация оксида углерода уменьшается в 1,5 раза, углеводороды на такой высоте не фиксировались, а концентрация диоксида серы снизилась на 2 порядка. Не изменялась лишь концентрация диоксида азота.

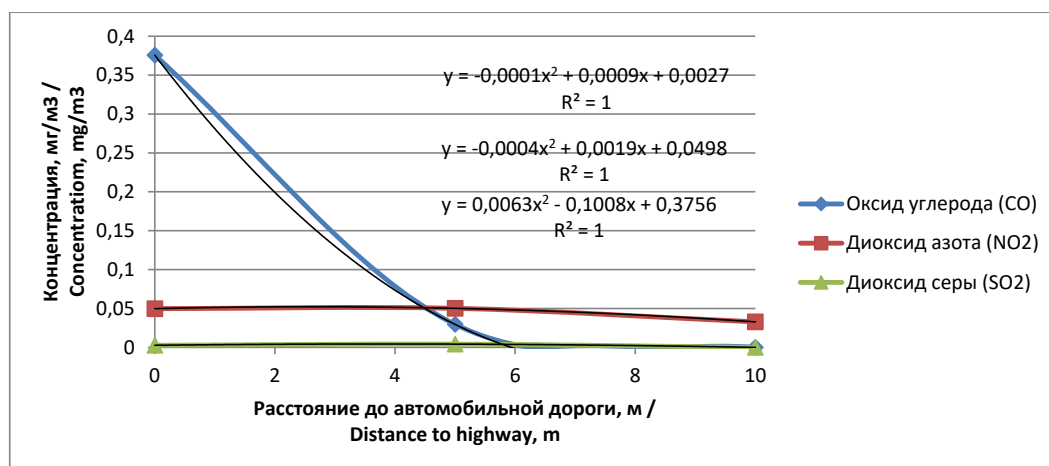


Рис. 1. Зависимость концентрации оксида углерода и диоксидов азота и серы от удаления до автодороги. Точка наблюдений «ул. Московская, Асик» /

Fig. 1. Dependence of the concentration of carbon monoxide and nitrogen and sulfur dioxides on the distance to the road. Observation point «st. Moscovskaya, Asik»

Для изучения влияния остановки и начала движения автотранспорта на уровень выбросов в атмосферу газоанализатор устанавливался непосредственно возле светофора. Пики концентраций изучаемых веществ совпадали со временем включения красного сигнала светофора, при этом ширина данных пиков зависела от количества остановившихся автомашин. В отсутствии автомашин концентрация всех измеряемых газов, за исключением диоксида азота, падала до нуля (рис. 2). При этом во время большей загруженности, когда двигался непрерывный поток автомашин, нулевые значения концентраций загрязнителей практически не регистрировались (рис. 3).

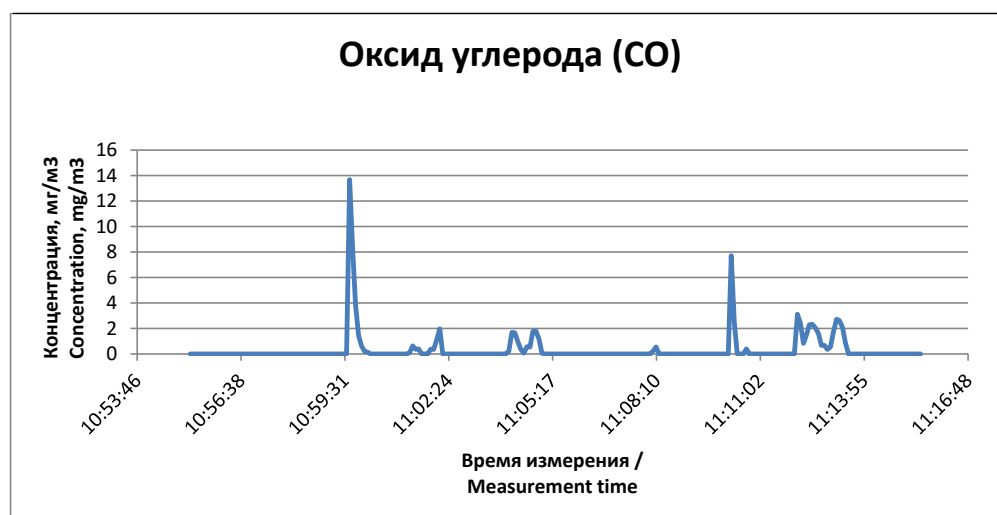


Рис. 2. Измерения концентрации оксида углерода возле светофора. Большая концентрация фиксировалась в моменты остановки большого количества автотранспорта /
Fig. 2. Measurements of carbon monoxide concentration near traffic lights. A greater concentration was recorded at the moments when a larger number of vehicles stopped

Таким образом, можно заключить, что учёт только ненулевых значений при расчёте средних значений концентраций позволяет смоделировать ситуацию полной загруженности автодороги, проводя измерения в любое дневное время и приводить эти значения к моментам максимальной загруженности. Данный подход позволяет получать значения более адекватные в сравнении с максимально измеренными концентрациями, т.к. подобные значения могут быть связаны с единственным транспортным средством, проезжающим мимо точки установки газоанализатора и выбрасывающим в атмосферу большое количество загрязняющих веществ.

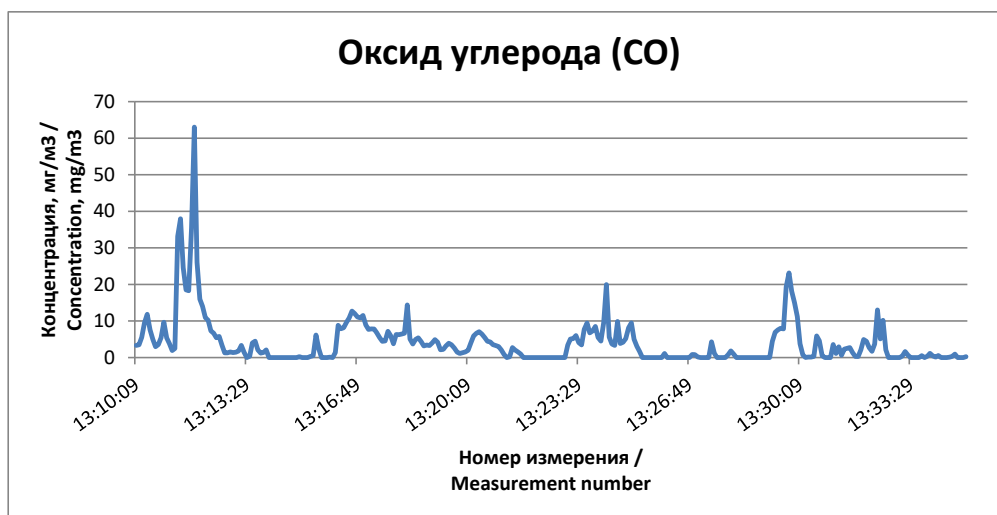


Рис. 3. Измерения концентрации оксида углерода во время большей загруженности автодороги /
Fig. 3. Measurements of carbon monoxide concentration during high traffic congestion

На основе приведенных выше исследований разработана собственная оригинальная методика экспериментальных исследований загрязненности атмосферного воздуха. Помимо определения мест установки прибора и длительности наблюде-

ний, сформирован подход к расчёту средней концентрации изучаемого вещества. Установлено, что в отсутствии автомобильного транспорта концентрации большинства изучаемых веществ снижаются до нуля, максимальные же концентрации достигаются в случае остановки, например при запрещающем сигнале светофора или при создании «пробок» на дороге, работающих транспортных средств вблизи установки прибора. При таком сценарии, когда наблюдается остановка транспортного потока, концентрации изучаемых веществ падают до нуля в единичных случаях, в целом же средний уровень становится ненулевым. Как известно, уровень транспортного потока очень сильно зависит от времени, так, к примеру существуют часы «пик», в которые уровень максимален и связан с перемещением людей с или на места работы, учёбы и т.д. В ночные же часы движение транспорта, как правило, минимально. Таким образом, измеряемые концентрации загрязняющих веществ будут достаточно сильно зависеть от времени экспериментальных наблюдений. В этой связи предлагается при расчётах средних концентраций не учитывать зафиксированные нулевые значения, моделирую ситуацию условного часа «пик» или случай возникновения затора. При таком подходе отпадает необходимость проведения экспериментальных исследований в одно и то же время для различных точек наблюдения. При учете, в том числе, и нулевых значений, сравнивать уровни загрязнения атмосферного воздуха в различных точках не представляется возможным, т.к. может наблюдаться значительная разница между величинами транспортного потока. При этом наиболее информативными являются данные полученные в моменты наибольшей загруженности автодорог. В данном случае величина концентраций вредных веществ будет уже зависеть от таких параметров, как ширина проезжей части и, как следствие, количество автотранспорта на автомобильной дороге, режимы работы светофоров, направление и скорость ветра и др.

Таким образом, разработанная методика проведения измерения концентраций загрязняющих веществ сводится к следующему. Установку прибора необходимо производить непосредственно возле края проезжей части, высота установки прибора не должна превышать 0,5 м от уровня дорожного полотна. Измерения проводятся в течение 25 минут. Для приведения полученных значений к среднему значению, необходимо учитывать только ненулевые концентрации, тем самым моделируя ситуацию измерения во время максимальной загруженности данного участка дороги.

На рисунке 4 приведена карта пространственного распределения значений предложенного авторами [Заалишвили и др., 2021] показателя загрязнения атмосферного воздуха $Z_{\text{атм}}$ для территории г. Владикавказа, расчет которого выполнен по данным, полученным согласно разработанной методике.

Хотя большинство зон представляются допустимыми по уровню воздействия на человека, тем не менее, данный подход позволил выделить наиболее неблагоприятные места. Для уточнения значений суммарного показателя необходимо провести дополнительные исследования по содержанию других загрязняющих веществ в атмосферном воздухе. На построенной карте выделяются следующие участки дорог, подвергающиеся наибольшему загрязнению: основные въезды/выезды с города со стороны ст. Архонская, с. Гизель, Черменского круга, а также центральная (историческая) часть города. Загрязнение центральной части связано, очевидно, с невысокой шириной проезжих частей в исторической части, плохой проветриваемостью и высоким уровнем трафика на дорогах.

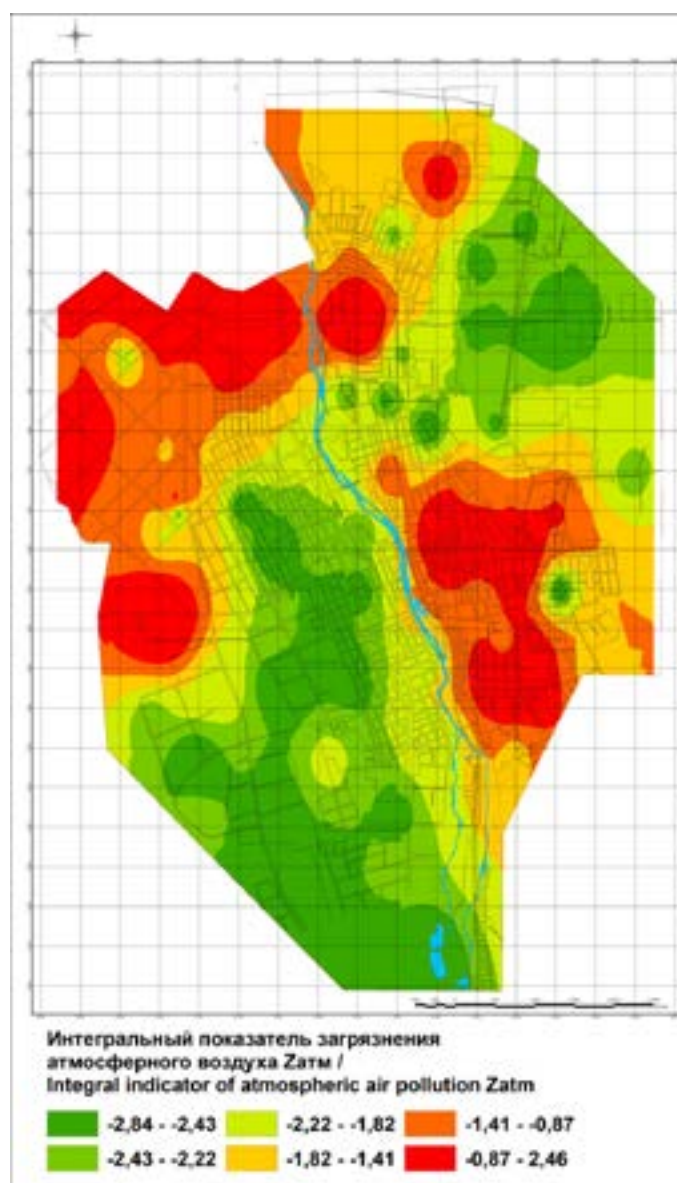


Рис. 4. Карта значений интегрального показателя загрязнения атмосферного воздуха $Z_{атм}$
г. Владикавказ /

Fig. 4. Map of values of the integral indicator of atmospheric air pollution Z_{atm} in Vladikavkaz

Выводы

Экономическое развитие всех регионов основано на доступе людей к товарам и услугам, которые обеспечиваются современной транспортной инфраструктурой. Автомобильный транспорт является основным способом транспортировки грузов и населения. В то же время положительные аспекты использования транспорта тесно связаны с загрязнением природной среды.

Установлено, что существующая методика оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха предполагает проведение многолетних трудоемких наблюдений. Кроме того, в данном подходе используются усредненные значения объемов выбросов автотранспортом, без учёта технического состояния автомобильного парка и без учёта фактического содержания загрязнителей в атмосферном воздухе.

Для изучения фактического содержания некоторых вредных веществ (оксид углерода, углеводороды и диоксиды азота и серы) в атмосферном воздухе города Владикавказа нами были проведены измерения с помощью газоанализатора «Эко-лаб».

Выполнены экспериментальные исследования зависимости концентраций изучаемых веществ в зависимости от таких параметров, как удаление прибора от автодороги, от высоты его установки, величины транспотного потока, режимов работы светодора.

На основе проведенных исследований разработана методика проведения измерения концентраций загрязняющих веществ.

Впервые для территории г. Владикавказа с использованием предложенного показателя $Z_{\text{атм}}$ построены карты загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом с выделением наиболее неблагоприятных зон.

Литература

1. Бекузарова С.А., Тебиева Д.И., Бекмурзов А.Д., Кебалова Л.А., Корбесова К.В. Фиторемедиация токсичности воздуха автомобильных дорог. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. №2. – С. 127–135. DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009
2. Вигдорович В. И., Габелко Н. В., Спасский Р. В. Загрязнение воздуха города Тамбова выхлопными газами. // Вестн. Удм. ун-та. 2005. № 8. С. 79–86.
3. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В. Оценка влияния автомобильного движения транспорта на загрязнение урбанизированных территорий. // Геология и геофизика Юга России. – 2021. – Т. 11. №4. – С. 135–146. DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011
4. Каташинская Л.И., Суппес Н.Е. Анализ источников загрязнения атмосферного воздуха в городе Ишиме и влияние химического загрязнения атмосферы на здоровье населения. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18. №2-3. – С. 697–701.
5. Кобрин Н.В. Системы мониторинга загрязнения окружающей среды автомобильным транспортом. // Экология и промышленность. – 2016. – №2(47). – С. 97–102.
6. Самолдина С.В., Медведева Ж.В., Дорохова Н.Д. Влияние атмосферного загрязнения на состояние хвои сосны обыкновенной села Дмитро-Титово Кытмановского района Алтайского края. // Новое слово в науке: перспективы развития. – 2016. – №1-1(7). – С. 35–39.
7. Ситников А.И., Толстых А.А., Власов В.А. Анализ моделей загрязнения воздуха для построения вычислительной системы мониторинга выбросов автотранспорта. / Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: Сб. ст. по матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2017. – С. 467–468.
8. Ситников А.И., Толстых А.А., Власов В.А. О возможности оценки загрязнения воздуха городской территории выхлопами автотранспорта на основании данных видеофиксации. / Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных обстоятельств: Сб. ст. по матер. Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. уч., 28-29 апр. 2016 г. – Воронеж: ВИ ГПС МЧС России, 2016. – С. 488–489.
9. Сокол П.А., Жердев А.В. Анализ воздействия отработанных газов двигателя внутреннего сгорания на экологическую безопасность. // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2018. – Т. 1. – С. 605–607.
10. Сонов А.А., Ажахова Л.С., Теунова Ф.А. Экспериментальное исследование химического состава атмосферных осадков и определение степени загрязнения атмосферы выхлопными газами. // Современные тенденции развития науки и технологий. – 2016. – №3-1. – С. 27–30.

11. Степанова Л.П. Оценка изменения почвенной биоты в условиях воздействия различных уровней поллютантов. / Степанова Л.П., Писарева А.В., Яковлева Е.В., Раскатов В.А. // Труды Карадагской научной станции им. Т.И.Вяземского – природного заповедника РАН. – 2019. – №2(10). – С. 30–41.
12. Шулепова О.В., Сидоров П.Т. О влиянии автотранспорта на окружающую среду на примере города Тюмени. // Агропродовольственная политика России. – 2018. – №3(75). – С. 45–47.
13. Benson P.E., A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models. // *Atmospheric Environment*. – 1992. – 26B. – pp. 379–390.
14. Chabni A. Modelling of pollutant dispersion in urban street canyons by means of a large-eddy simulation approach. / Chabni A., LeQue' re' P., Tenaud C. Laatar H. // *International Journal Vehicle Design*. – 1998. – Vol. 20. – pp. 88–95.
15. Chamberlain A.C. Effect of airborne lead on blood lead. // *Atmos Environ*. – 1983. – Vol. 17. – pp. 677–692.
16. Chan T.L. Monte Carlo simulation of nitrogen oxides dispersion from a vehicular exhaust plume and its sensitivity studies. / Chan T.L., Dong G., Cheung C.S., Leung C.W., Wong C.P., Hung W.T. // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – pp. 6117–6127.
17. Chan T.L. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. / Chan T.L., Dong G., Leung C.W., Cheung C.S., Hung W.T. // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36. – pp. 861–872.
18. Chock D.P. A simple line-source model for dispersion near roadways. // *Atmospheric Environment*. – 1978. – Vol. 12. – pp. 823–829.
19. Elwood P.C. The sources of lead in blood. // *Sci. Total Environ*. – 1986. – Vol. 52. – pp. 1–23.
20. Elwood P.C., Gallacher J.E.J. Lead in petrol and levels of lead in blood: scientific evidence and social policy. // *J. Epidemiol and Community Health*. – 1984. – Vol. 38. – pp.315–318.
21. Elwood P.C. Blood lead and petrol lead. *Br. Med. j.* – 1983. – Vol. 286. – pp. 1515.
22. Eskridge R.E., Hunt J.C.R. Highway modeling. Part I: prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. // *Journal of Applied Meteorology*. – 1979. – Vol. 18. – pp. 387–400.
23. Fomunung I., Washington S., Guensler R. A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles. // *Transportation Research Part*. – 1999. – D4. – pp. 333–352.
24. Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application [Review]. // *Critical reviews in plant sciences*. – 2001. – Vol. 20(4). – pp. 309–371. DOI: 10.1016/s0735-2689(01)80040-x
25. Hoek G. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the netherlands: a cohort study. // *Lancet*. – 2002. – Vol. 360(9341). – pp. 1203–1209.
26. Jankowski K. Lead and cadmium content in some grasses along expressway areas/ / Jankowski K., Jankowska J., Ciepiela G. A., Sosnowski J., Wisniewska-Kadzajan B., Kolczarek R., Deska J. // *Journal of Elementology*. – 2014. – Vol. 19(1). – pp. 119–128. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.1.591
27. Karim M.M., Mastsui H., Guensler R. A mathematical model of wind flow, vehicle wake, and pollution concentration in urban road microenvironments. Part II: Model results. // *Transportation Research*. – 1998. – Part D 3. – pp. 171–191.
28. Kim D.H., Gautam M., Gera D. On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy-duty truck exhaust plume using k ϵ turbulent closure. // *Atmospheric Environment*. – 2001. – Vol. 35. – pp. 5267–5275.
29. Kosta H., Liiv S. Spatial and temporal trends of heavy metal accumulation in mosses in Estonia. // *Ecosystems and Sustainable Development Viii*. – 2011. – Vol. 133. DOI: 10.2495/eco110121

30. Künzli N et al. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. // *Lancet*. – 2000. – Vol. 356(9232). – pp. 795–801.
31. Laatar A.H. 2D large eddy simulation of pollutant dispersion around a covered roadway. / Laatar A.H., Benahmed M., Belghith A., LeQue're' P. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2002. – Vol. 90. – pp.617–637.
32. Liu C.H., Barth M.C. Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon. // *Journal of Applied Meteorology*. – 2002. – Vol. 41. – pp. 660–673.
33. Liu C.H., Leung D.Y.C., Barth M.C. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. // *Atmospheric Environment*. – 2005. – Vol. 39. – pp. 1567–1574.
34. Liu J.J., Chan C.C., Jeng F.T. Predicting personal exposure levels to carbon monoxide (CO) in Taipei, based on the actual CO measurements in microenvironments and a Monte Carlo simulation methods. // *Atmospheric Environment*. – 1994. – Vol. 28. – pp. 2361–2368.
35. McClellan RO Health effects of diesel exhaust: a case study in risk assessment. // *Am. Ind. Hyg. Assoc.* – 1986. – Vol. 47. – pp. 1-13.
36. Petersen W.B. User's guide for HIWAY-2, highway air pollutant model. / EPA-600/8-80-018. – 1980.
37. Riddle A. Comparisons between the FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling. / Riddle A., Carruthers D., Sharpe A., McHugh C., Stocker J. // *Atmospheric Environment*. – 2004. – Vol. 38. – pp. 1029–1038.
38. Schroeder WH. Toxic trace elements associated with airborne particulate matter: a review. / Schroeder WH., Dobson M., Kane DM., Johnson ND. // *JAPCA*. – 1987. – Vol. 37. – pp. 1267-1285.
39. Sharma P., Khare M. Modelling of vehicular exhausts—a review. // *Transportation Research*. – 2001. – Part D 6. – pp. 179–198.
40. Sutherland R.A., Tolosa C.A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. // *Environmental Pollution*. – 2000. – Vol. 110(3). – pp. 483-495. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00311-5.
41. Turkyilmaz A. Changes in heavy metal accumulation depending on traffic density in some landscape plants. / Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin, M., Saleh E.A.A. // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2018. – Vol. 27(5). – pp. 2277-2284. DOI: 10.15244/pjoes/78620.
42. Venkatram A. Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved road. / Venkatram A., Fitz D., Bumiller K., Du S., Boeck M., Ganguly C. // *Atmospheric Environment*. – 1999. – Vol. 33. – pp. 1093–1102.
43. Walton A., Cheng A.Y.S., Yeung W.C. Large-eddy simulation of pollutant dispersion in an urban street canyon—Part I: comparison with filed data. // *Atmospheric Environment*. – 2002. – Vol. 36. – pp. 3601–3613.
44. Wang M.E. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China. / Wang M.E., Bai Y.Y., Chen W.P., Markert B., Peng C., Ouyang Z.Y. // *Environmental Pollution*. – 2012. – Vol. 161. – pp. 235-242. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.030.
45. Wheeler G.L., Rolfe G.L. The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation. // *Environ. Pollut.* – 1979. – Vol. 18. – pp. 265-274.
46. Zalakeviciute R. Chemical characterization of urban pm10 in the tropical Andes. / Zalakeviciute R., Rybarczyk Y., Granda-Albuja M.G., Suarez M.V.D., Alexandrino K. // *Atmospheric Pollution Research*. – 2020. – Vol. 11(2). – pp. 343-356. DOI: 10.1016/j.apr.2019.11.007.
47. Zhang C.S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. // *Environmental Pollution*. – 2006. – Vol. 142(3). – pp. 501-511. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.10.028.
48. Zimmerman J.R., Thompson R.S. User's guide for HIWAY, a highway air pollutant model. – 1975. – EPA-650/4-74-008.

References

1. Bekuzarova S. A., Tebieva D. I., Bekmurzov A. D., Kebalova L. A., Korbesova K. V. Phytoremediation of air toxicity of roads. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No.2. pp. 127–135. (In Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.47.65.009.
2. Vigdorovich V.I., Gabelko N.V., Spassky R.V. Air pollution in the city of Tambov by exhaust gases. *Bulletin of Udmurt University*. 2005. No.8. pp. 79–86. (In Russ.)
3. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V. Assessment of the Impact of Road Traffic on the Pollution of Urbanized Territories. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No.4. 135–146. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2021.53.63.011.
4. Katashinskaya L.I., Suppes N.E. Analysis of sources of atmospheric pollution in the city of Ishim and the impact of chemical pollution on the health of the population. In: *Proc. of the Samara Scientific Center of RAS*. 2016. Vol. 18. No.2–3. pp. 697–701. (In Russ.)
5. Kobrina N.V. Environmental monitoring systems for road transport pollution. *Ecology and Industry*. 2016. No.2. Issue 47. pp. 97–102. (In Russ.)
6. Samoldina S.V., Medvedeva Zh.V., Dorokhova N.D. Influence of atmospheric pollution on the condition of the needles of ordinary pine in the village of Dmitro-Titovo, Kytmanovsky district, Altai Territory. *New Word in Science, Prospects for Development*. 2016. No.1-1. Issue 7. pp. 35–39. (In Russ.)
7. Sitnikov A.I., Tolstykh A.A., Vlasov V.A. Analysis of air pollution models for building a computational monitoring system for vehicle emissions. In: *Proc. of the All-Russian Scientific Conference Fire Safety, Problems and Prospects. Voronezh. VI GPS EMERCOM of Russia, 2017*. pp. 467–468. (In Russ.)
8. Sitnikov A.I., Tolstykh A.A., Vlasov V.A. On the possibility of assessing air pollution of urban areas by vehicle exhaust emissions based on video recording data. In: *Proc. of the All-Russian Scientific Conference Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response. April 28–29, 2016, Voronezh. VI GPS EMERCOM of Russia. 2016*. pp. 488–489. (In Russ.)
9. Sokol P.A., Zherdev A.V. Analysis of the impact of internal combustion engine exhaust gases on environmental safety. *Problems of Ensuring Safety in Emergency Situations*. 2018. Vol. 1. pp. 605–607. (In Russ.)
10. Sonov A.A., Azhakhova L.S., Teunova F.A. Experimental study of the chemical composition of atmospheric precipitation and determination of the degree of air pollution by exhaust gases. *Modern Trends in Science and Technology*. 2016. No.3–1. pp. 27–30. (In Russ.)
11. Stepanova L.P., Pisareva A.V., Yakovleva E.V., Raskatov V.A. Assessment of changes in soil biota under the influence of various levels of pollutants. In: *Proc. of the Karadag Scientific Station named after T. I. Vyazemsky – Nature Reserve of RAS. 2019. No.2(10)*. pp. 30–41. (In Russ.)
12. Shulepova O.V., Sidorov P.T. On the impact of transportation on the environment using the example of the city of Tyumen. *Agro-Food Policy of Russia*. 2018. No. 3. Issue 75. pp. 45–47. (In Russ.)
13. Benson P.E., A review of the development and application of the CALINE3 and 4 models. *Atmospheric Environment*. 1992. 26B. pp. 379–390.
14. Chabni A. Modelling of pollutant dispersion in urban street canyons by means of a large-eddy simulation approach. Chabni A., LeQue' re' P., Tenaud C. Laatar H. *International Journal Vehicle Design*. 1998. Vol. 20. pp. 88–95.
15. Chamberlain A.C. Effect of airborne lead on blood lead. *Atmos Environ*. 1983. Vol. 17. pp. 677–692.
16. Chan T.L., Dong G., Cheung C.S., Leung C.W., Wong C.P., Hung W.T. Monte Carlo simulation of nitrogen oxides dispersion from a vehicular exhaust plume and its sensitivity studies. *Atmospheric Environment*. 2001. Vol. 35. pp. 6117–6127.
17. Chan T.L. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street

canyon. Chan T.L., Dong G., Leung C.W., Cheung C.S., Hung W.T. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. pp. 861–872.

18. Chock D.P. A simple line-source model for dispersion near roadways. *Atmospheric Environment*. 1978. Vol. 12. pp. 823–829.

19. Elwood P.C. The sources of lead in blood. *Sci. Total Environ*. 1986. Vol. 52. pp. 1–23.

20. Elwood P.C., Gallacher J.E.J. Lead in petrol and levels of lead in blood: scientific evidence and social policy. *J. Epidemiol and Community Health*. 1984. Vol. 38. pp. 315–318.

21. Elwood P.C. Blood lead and petrol lead. *Br. Med. j.* 1983. Vol. 286. pp. 1515.

22. Eskridge R.E., Hunt J.C.R. Highway modeling. Part I: prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. *Journal of Applied Meteorology*. 1979. Vol. 18. pp. 387–400.

23. Fomunung I., Washington S., Guensler R. A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles. *Transportation Research Part*. 1999. D4. pp. 333–352.

24. Garty J. Biomonitoring atmospheric heavy metals with lichens: Theory and application [Review]. *Critical reviews in plant sciences*. 2001. Vol. 20(4). pp. 309–371. DOI: 10.1016/s0735-2689(01)80040-x

25. Hoek G. Association between mortality and indicators of traffic-related air pollution in the Netherlands: a cohort study. *Lancet*. 2002. Vol. 360(9341). pp. 1203–1209.

26. Jankowski K., Jankowska J., Ciepiela G. A., Sosnowski J., Wisniewska-Kadzaj B., Kolczarek R., Deska J. Lead and cadmium content in some grasses along expressway areas. *Journal of Elementology*. 2014. Vol. 19. No. 1. pp. 119–128. DOI: 10.5601/jelem.2014.19.1.591

27. Karim M.M., Mastui H., Guensler R. A mathematical model of wind flow, vehicle wake, and pollution concentration in urban road microenvironments. Part II: Model results. *Transportation Research*. 1998. Part D 3. pp. 171–191.

28. Kim D.H., Gautam M., Gera D. On the prediction of concentration variations in a dispersing heavy-duty truck exhaust plume using k-ε turbulent closure. *Atmospheric Environment*. 2001. Vol. 35. pp. 5267–5275.

29. Kosta H., Liiv S. Spatial and temporal trends of heavy metal accumulation in mosses in Estonia. *Ecosystems and Sustainable Development* VIII. 2011. Vol. 133. DOI: 10.2495/eco110121

30. Künzli N et al. Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*. 2000. Vol. 356(9232). pp. 795–801.

31. Laatar A.H. 2D large eddy simulation of pollutant dispersion around a covered roadway. Laatar A.H., Benahmed M., Belghith A., LeQue' re' P. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2002. Vol. 90. pp. 617–637.

32. Liu C.H., Barth M.C. Large-eddy simulation of flow and scalar transport in a modeled street canyon. *Journal of Applied Meteorology*. 2002. Vol. 41. pp. 660–673.

33. Liu C.H., Leung D.Y.C., Barth M.C. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. *Atmospheric Environment*. 2005. Vol. 39. pp. 1567–1574.

34. Liu J.J., Chan C.C., Jeng F.T. Predicting personal exposure levels to carbon monoxide (CO) in Taipei, based on the actual CO measurements in microenvironments and a Monte Carlo simulation methods. *Atmospheric Environment*. 1994. Vol. 28. pp. 2361–2368.

35. McClellan R.O. Health effects of diesel exhaust: a case study in risk assessment. *Am. Ind. Hyg. Assoc*. 1986. Vol. 47. pp. 1–13.

36. Petersen W.B. User's guide for HIWAY-2, highway air pollutant model. EPA-600/8-80-018. 1980.

37. Riddle A. Comparisons between the FLUENT and ADMS for atmospheric dispersion modeling. Riddle A., Carruthers D., Sharpe A., McHugh C., Stocker J. *Atmospheric Environment*. 2004. Vol. 38. pp. 1029–1038.

38. Schroeder W.H. Toxic trace elements associated with airborne particulate matter: a review. Schroeder W.H., Dobson M., Kane D.M., Johnson N.D. *JAPCA*. 1987. Vol. 37. pp. 1267–1285.

39. Sharma P., Khare M. Modelling of vehicular exhausts - a review. *Transportation Research*. 2001. Part D 6. pp. 179–198.
40. Sutherland R.A., Tolosa C.A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii. *Environmental Pollution*. 2000. Vol. 110(3). pp. 483–495. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00311-5.
41. Turkyilmaz A., Sevik H., Cetin, M., Saleh E.A.A. Changes in heavy metal accumulation depending on traffic density in some landscape plants. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2018. Vol. 27. No. 5. pp. 2277–2284. DOI: 10.15244/pjoes/78620.
42. Venkatram A., Fitz D., Bumiller K., Du S., Boeck M., Ganguly C. Using a dispersion model to estimate emission rates of particulate matter from paved road. *Atmospheric Environment*. 1999. Vol. 33. pp. 1093–1102.
43. Walton A., Cheng A.Y.S., Yeung W.C. Large-eddy simulation of pollutant dispersion in an urban street canyon. Part I: comparison with filed data. *Atmospheric Environment*. 2002. Vol. 36. pp. 3601–3613.
44. Wang M.E., Bai Y.Y., Chen W.P., Markert B., Peng, C., Ouyang Z.Y. A GIS technology based potential eco-risk assessment of metals in urban soils in Beijing, China. *Environmental Pollution*. 2012. Vol. 161. pp. 235–242. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.09.030.
45. Wheeler G.L., Rolfe G.L. The relationship between daily traffic volume and the distribution of lead in roadside soil and vegetation. *Environ. Pollut.* 1979. Vol. 18. pp. 265-274.
46. Zalakeviciute R., Rybarczyk Y., Granda-Albuja M.G., Suarez M.V.D., Alexandrino K. Chemical characterization of urban pm10 in the tropical Andes. *Atmospheric Pollution Research*. 2020. Vol. 11. No. 2. pp. 343-356. DOI: 10.1016/j.apr.2019.11.007.
47. Zhang C.S. Using multivariate analyses and GIS to identify pollutants and their spatial patterns in urban soils in Galway, Ireland. *Environmental Pollution*. 2006. Vol. 142(3). pp. 501-511. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.10.028.
48. Zimmerman J.R., Thompson R.S. User's guide for HIWAY, a highway air pollutant model. 1975. EPA-650/4-74-008.