

Научная статья

УДК 504.3.054

doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-105-121

**ФОРМИРОВАНИЕ ОНЛАЙН-КАРТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА  
Г. ИЖЕВСКА, ФОРМИРУЕМОГО ВЫБРОСАМИ ПЕРЕДВИЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ****Алсу Валерьевна Семакина<sup>1✉</sup>, Анастасия Андреевна Коробейникова<sup>2</sup>, Лариса Николаевна Петухова<sup>3</sup>,  
Илья Андреевич Воронов<sup>4</sup>, Глеб Владимирович Ренкез<sup>5</sup>, Альберт Марселевич Зуев<sup>6</sup>**<sup>1, 2, 3</sup>Удмуртский государственный университет, г. Ижевск, Россия<sup>4</sup>Республиканский детский технопарк «Кванториум», г. Ижевск, Россия<sup>5</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, г. Ижевск, Россия<sup>6</sup>Частное учреждение СОШ «Столичный-КИТ» (г. Москва), г. Ижевск, Россия

426067, г. Ижевск

<sup>1</sup>alsen13@list.ru✉<sup>2</sup>korobejnikovanasta3@gmail.com<sup>3</sup>petlar75@mail.ru<sup>4</sup>whitet@bk.ru<sup>5</sup>glebrenkez@gmail.com<sup>6</sup>iamnalinator@yandex.ru

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы, связанные с оценкой пространственно-временной динамики загрязнения атмосферы выбросами загрязняющих веществ от автотранспортных потоков. В рамках данного исследования осуществлялся расчет концентраций диоксида азота в атмосферном воздухе вблизи ул. Удмуртская г. Ижевска. Работа базировалась на создании математической модели расчета выбросов и процесса рассеивания выбросов с учетом динамики транспортных потоков, ветрового режима. В качестве исходных данных были использованы видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета интенсивности транспортного потока в г. Ижевске. В процессе расчета эмиссии поллютантов применялись модель, представленная в Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха (утверждена приказом Минприроды России от 27 ноября 2019 года N 804). Для построения модели расчёта рассеивания использовались «Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе», утвержденные приказом Минприроды России от 06.06.2017 N 273. Для автоматизации процесса расчета рассеивания примесей в атмосферном воздухе был создан программный код с применением языка программирования Go. Данные, полученные в результате реализации программного кода, визуализированы в виде динамической карты распределения концентрации, размещенной на сайте <https://komfortsreda.udsu.ru/> в разделе Ижевск/Атмосферный воздух/Динамика концентраций NO<sub>2</sub>. В рамках проведенного исследования обсуждается новое перспективное направление развития оценки состояния природных сред посредством онлайн – моделирования. Моделирование процессов рассеивания выбросов и оценка текущего состояния атмосферного воздуха являются актуальными в контексте общей характеристики экологического состояния городской территории.

**Ключевые слова:** атмосферный воздух, выбросы автотранспорта, концентрация загрязняющих веществ, моделирование

**Для цитирования:** Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М. Формирование онлайн-карт загрязнения атмосферного воздуха г. Ижевска, формируемого выбросами передвижных источников // Географический вестник = Geographical bulletin. 2023. № 2(65). С. 105–121. doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-105-121.

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-105-121

**FORMATION OF ONLINE MAPS OF IZHEVSK ATMOSPHERIC AIR POLLUTION  
GENERATED BY EMISSIONS FROM MOBILE SOURCES****Alsu V. Semakina<sup>1✉</sup>, Anastasia A. Korobeynikova<sup>2</sup>, Larisa N. Petukhova<sup>3</sup>, Ilya A. Voronov<sup>4</sup>, Gleb V. Reinkez<sup>5</sup>,  
Albert M. Zuev<sup>6</sup>**<sup>1, 2, 3</sup>Udmurt State University, Izhevsk, Russia<sup>4</sup>Republican Children's Technopark 'Quantorium', Izhevsk, Russia<sup>5</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia<sup>6</sup>Private secondary school 'Stolichnyi-KIT' (Moscow), Izhevsk, Russia<sup>1</sup>alsen13@list.ru✉<sup>2</sup>korobejnikovanasta3@gmail.com<sup>3</sup>petlar75@mail.ru<sup>4</sup>whitet@bk.ru<sup>5</sup>glebrenkez@gmail.com<sup>6</sup>iamnalinator@yandex.ru

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

**Abstract.** The study deals with the assessment of spatio-temporal dynamics of atmospheric pollution caused by emissions from road traffic flows. Nitrogen dioxide concentrations were calculated in the atmospheric air near Udmurtskaya street of the city of Izhevsk. The work was based on a mathematical model created for the calculation of emissions and their dispersion taking into account the dynamics of traffic flows, wind conditions. As the initial data, we used video recordings from continuous automatic recording of the traffic flow intensity. When calculating the emission of pollutants, we applied the model presented in the Methodology for Determining Emissions of Pollutants into the Atmospheric Air from Mobile Sources for Performing Summary Calculations of Atmospheric Air Pollution (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 804 of November 27, 2019). To build a scattering calculation model, we used Methods for Calculating Dispersion of Emissions of Harmful (Polluting) Substances in the Atmospheric Air (approved by Order of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation No. 273 of June 6, 2017). To automate the process of calculating the scattering of impurities in the atmospheric air, a program code was created using the Go programming language. The data obtained by means of the implementation of the program code were visualized in the form of a dynamic map of the concentration distribution posted on the website <https://komfortsreda.udsu.ru/> in the section Izhevsk/Atmospheric air/Dynamics of NO<sub>2</sub> concentrations. This study deals with a new promising direction in the assessment of natural environments – assessment performed through online modeling. Emission dispersion modeling and assessment of the current state of atmospheric air are important as contributing to the general characterization of the ecological state of an urban area.

**Keywords:** atmospheric air, vehicle emissions, concentration of pollutants, modeling

**For citation:** Semakina A.V., Korobeynikova A.A., Petukhova L.N., Voronov I.A., Reinkez G.V., Zuev A.M. (2023). Formation of online maps of Izhevsk atmospheric air pollution generated by emissions from mobile sources. *Geographical Bulletin*. No. 2(65). Pp. 105–121. doi: 10.17072/2079-7877-2023-2-105-121.

**Введение**

Федеральный проект «Чистый воздух» национального проекта «Экология» направлен на улучшение экологической обстановки и снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух [18]. В структуре выбросов крупных городов значительная доля приходится на выбросы от сложного для учета источника – автотранспорта (в том числе частный автотранспорт). По данным официальных источников [8] на территории г. Ижевска только на долю автотранспорта предприятий приходится 38% общего объема выбросов. Высокая динамичность, значительная неоднородность транспортных потоков в пространстве и времени [2] затрудняют создание системы мониторинга и регулирования объемов выбросов передвижных источников с целью снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха.

Атмосфера, как наиболее динамичная среда, характеризуется сложной пространственной и временной динамикой уровней загрязнения. В данный момент времени уровень загрязнения атмосферы на конкретной территории формируется приходной (поступление из источников внутри территории, привнос извне, образование в результате вторичных химических процессов) и расходной частями баланса (вынос за пределы территории, осаждение на поверхности, разрушение в атмосфере) [21]. Решением вопроса оценки текущего состояния атмосферного воздуха является создание мониторинговой сети с использованием датчиков автоматического контроля загрязнения атмосферного воздуха городской среды. Профильный комитет Госдумы одобрил законопроект Минприроды России о создании систем автоматического мониторинга выбросов, но, к сожалению, он относится только к установке датчиков автоматического контроля на предприятиях и не затрагивает остальную часть города. При этом, даже на уровне предприятий, высокая стоимость инструментальных систем контроля выбросов (до 80 млн руб. для одного стационарного источника выбросов), значительные расходы на обслуживание стимулируют интерес к предиктивным системам непрерывного автоматического контроля (ПСНАК). ПСНАК – это система прогноза выбросов на основе исходной технологической информации и математического моделирования [22].

Моделирование рассеивания загрязняющих веществ в нашей стране развивается более сорока лет. За этот период времени было разработано значительное количество моделей рассеивания примесей. Исходя из подхода к построению можно выделить четыре основные группы моделей распространения облака загрязняющих веществ: эмпирические, интегральные, лагранжевы и CFD-модели [1].

• Простые эмпирические модели описываются с помощью номограмм или простых зависимостей. При этом влияние метеорологических параметров, рельефа и длительности

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

интервала усреднения обычно не исследуется. Примеры таких моделей содержатся в руководствах: HSE по распространению тяжелых газов 1988 г. [28] и Ассоциации инженеров Германии 1990 г. VDI 3783 [30]. На основе этих моделей созданы такие программные комплексы, как TSCREEN и STOER ([nepis.epa.gov](http://nepis.epa.gov)) [31]. Главный ограничивающий фактор использования таких моделей заключается в том, что они могут применяться для моделирования рассеивания только в условиях, близких к условиям экспериментов, в которых они создавались.

• К интегральным моделям могут быть отнесены следующие: BOX-модели, одномерные модели шлейфа, модели стационарного шлейфа, обобщенные модели стационарного шлейфа. Все эти модели исходят из рассмотрения проинтегрированных по некоторому объему заранее оговоренной формы характеристик, для каждой из которых записывают обыкновенное дифференциальное уравнение, описывающее ее изменение во времени. Детализация распределения заданных характеристик в облаке восстанавливается по этим параметрам. Для BOX-моделей характерно предположение распространения облака по плоскому однородному ландшафту, однако в некоторых случаях описывается и распространение по склонам. BOX-модели используются при оценке воздействия на окружающую природную среду, при оценке риска, при планировании мероприятий во время аварий. BOX-модели были улучшены за счет введения более сложных профилей фокусировки, подобных Гауссовому. На основе этого подхода разработан метод рассеивания тяжелых газов «Токси-2» [15; 16], который включен в руководство по безопасности «Методика моделирования аварийного выброса диффузии вредных веществ» [13]. Одномерные интегральные модели шлейфа используются для описания непрерывных потоков над землей. Состав исходных данных, учитываемых в модели, а также термодинамические эффекты и химические взаимодействия в целом аналогичны другим интегрированным моделям. Модели стационарного шлейфа применяются для моделирования продолжительных выбросов без учета скорости выброса. Такие модели часто называют SLAB-моделями. Эти модели развивались совместно с BOX-моделями и по своей сути аналогичны им. Модели HEGADAS (Heavy Gas Dispersion from Area Sources) [29] и DEGADIS (Dense Gas Dispersion) [6] – наиболее известные примеры обобщенных интегральных моделей стационарного шлейфа. Термодинамика, химические реакции и метеорологические условия учитываются в этих моделях так же, как и в стационарных моделях шлейфа. Их требования к входным данным и компьютерным ресурсам схожи с требованиями к BOX-моделям.

• Современные лагранжевые модели могут использоваться для вычислений как из расширенных, так и из многомерных источников. В этих моделях облако тяжелого газа рассматривается как псевдочастица, движение и распределение которой определяются движением облака. На каждом временном шаге суток участки определяются ветром, атмосферной турбулентностью и дополнительной интенсивностью. Трехмерное поле ветра является начальным входом для моделей [1].

• CFD-модели – трехмерные, нестационарные модели, в которых решается система дифференциальных уравнений динамики выходных газов в частных производных, зависящих от времени и трех пространственных координат. Эти модели могут применяться при моделировании распространения загрязняющих веществ при различных атмосферных характеристиках, а также учитывать условия рельефа местности и застройки. В зависимости от степени детальности моделирования турбулентности существует несколько вариантов CFD-моделей [6].

В зависимости от выбора математической модели концентрации загрязняющих веществ в выбросах могут быть определены на основании выявленной причинно-следственной зависимости (основывается на теоретических моделях, опирающихся на фундаментальные физико-химические принципы) или корреляционной зависимости (базируется

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

на эмпирических моделях, связанных с определением статистических закономерностей между переменными технологического процесса и свойствами выбросов) [22]. В настоящее время при численной оценке рассеивания примеси в приземном слое атмосферы используется лагранжева дисперсионная стохастическая модель или эйлерова модель атмосферной диффузии. В рамках модели Лагранжа перенос примеси в атмосферном воздухе определяется по траекториям движения одиночных частиц, поступающих из источников загрязнений в воздушный бассейн. Эйлерова модель основывается на уравнении «конвекции-диффузии», которое объединяется на конечно-разностной эйлеровой сетке [3; 5; 12].

К программным комплексам, реализующим расчет выбросов и рассеивания выбросов в атмосфере в России, относятся:

- ЭПК «Zone» (математические модели ЭПК ZONE базируются на комбинации трехмерной гидродинамической модели атмосферного пограничного слоя и методах Монте-Карло для расчета турбулентной диффузии и осуществляют расчет рассеивание примеси в атмосферном воздухе) [25].

- Комплекс программных продуктов «Интеграл» (осуществляет расчет выбросов и расчёт рассеивания выбросов ЗВ в атмосферном воздухе) [36].

- Программа для расчета загрязнения атмосферы вредными веществами от автотранспорта (осуществляет расчет рассеивания выбросов и выгрузку данных в виде графиков) [20].

- Программный комплекс «VITECON» (учитывает орографическую неоднородность подстилающей поверхности, химические трансформации примесей, горизонтальную и вертикальную неоднородности турбулентно-диффузных свойств воздуха (слоистость атмосферы), влияние конвективно-стратификационных процессов и влажности на распространение примеси) [5].

- ГИС, учитывающая параметры источников выбросов и подстилающей поверхности. При этом картографическая информация преобразуется из ГИС в формат, требуемый для проведения численного прогноза распространения загрязняющего вещества в окружающей среде [4].

- Программа, позволяющая вычислять концентрацию загрязняющих веществ в точке замера по модели «факела» (для выброса загрязняющих веществ от различных по высоте точечных источников. При этом температура и характер выбросов не учитываются). Результаты, полученные при моделировании, подтверждены экспериментально [24].

В разработке находятся следующие программные продукты:

- «IoT-платформа цифрового экомониторинга для промышленных предприятий» (используется для создания программно-аппаратных систем класса CEMS – Continuous Emissions Monitoring System, предназначенных для непрерывного контроля выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух на производствах с применением машинного зрения) [11].

- Интегральные предиктивные системы непрерывного автоматического контроля стационарных источников на базе ООО «Газпромпереработка» (разрабатывается ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики» и ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт» с целью мониторинга динамики выбросов на предприятии) [9] и др.

Таким образом, проблемой оценки объемов выбросов и их рассеивания в той или иной степени занимаются начиная с 80-х гг. 20-го в. значительное числа исследователей. В то же время на сегодняшний день отсутствует упрощенная математическая модель оценки загрязнения атмосферы на территории крупных городов, не требующая больших временных и трудовых затрат, и длительных расчетов и обладающая возможностью онлайн-визуализации картографических результатов расчета. Практическая полезность математического

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

моделирования такого рода заключается в возможности получения информации о качественных свойствах и количественных характеристиках загрязнения атмосферы города без проведения (часто сложных или дорогостоящих) экспериментов в натуре, что может оправдать затраты на преодоление трудностей, возникающих в процессе разработки или при попытке использования математических моделей.

Значимость разработки такого типа модели подтверждается наличием общественного спроса на актуальную, своевременную, достоверную, в пространственном и временном отношении, информацию о состоянии окружающей среды. Спрос на такого рода данные актуален ввиду появления большого количества общественных и коммерческих сервисов, предлагающих данную информацию. В большинстве случаев такого рода информация основывается на интерполяции данных небольшого количества датчиков государственной или общественной сети мониторинга. Примером таких сервисов могут служить сервисы BreezoMeter [34] и «ЭКОВИЗОР» [35]. Сервис BreezoMeter представляет собой приложение, состоящее из интерактивной карты, обновляющейся в реальном времени. Сервис постоянно анализирует огромное количество данных из тысяч различных источников (в первую очередь, данных государственной сети мониторинга) и формирует отчеты по регионам на основе запатентованного алгоритма. BreezoMeter; кроме мониторинга чистоты воздуха; предлагает персонализированные решения для сохранения здоровья детей, спортсменов, людей, страдающих определенными заболеваниями и некоторых других распространенных целевых групп пользователей. Недостатком данного ресурса являются сложность верификации исходных данных и высокая роль человеческого фактора в ее формировании. Аналогичные задачи пытаются решить красноярские разработчики при помощи цифровой платформы «ЭКОВИЗОР». Она информирует пользователя о текущем уровне загрязнения воздуха в Москве, Санкт-Петербурге, Красноярске, Ачинске, Зеленогорске, Канске и Каменск-Шахтинском и других городах России. В качестве исходной информации служат данные датчиков, установленных эоактивистами и включенных в единую сеть. К основным недостаткам можно отнести низкую чувствительность датчиков и отсутствие пространственной интерпретации данных. Кроме количественных показателей содержания в атмосферном воздухе загрязняющих веществ (главным образом, взвешенных веществ) «Эковизор» выводит на экран рекомендации для пользователя, при выполнении которых можно снизить степень ущерба здоровью в случае формирования высокого уровня загрязнения [35]. Таким образом, применение математического моделирования и основанных на нем программных пакетов в области охраны окружающей природной среды в той или иной степени позволяет решать задачи определения уровня загрязнения атмосферного воздуха на территории населенных пунктов.

При математическом моделировании загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автотранспорта необходимо учитывать ряд особенностей:

- 1) выбросы в атмосферу осуществляются от большого количества взаимно пересекающихся линейных источников (автомобильные дороги);
- 2) выбросы загрязняющих веществ от автотранспортных потоков осуществляются вблизи поверхности земли, что значительно снижает интенсивность рассеивания поллютантов;
- 3) на интенсивность эмиссии и последующий процесс рассеивания загрязняющих веществ (ЗВ) от автотранспорта влияет большое число факторов, учет которых затруднен для большой по площади территории: структура и интенсивность автотранспортных потоков, параметры автомобильных дорог (в том числе локализация в пространстве), наличие препятствий для переноса ЗВ (окружающие здания и прочие объекты), метеорологические условия, орография местности и т.п. Данные факторы обуславливают формирование значительной пространственно-временной неоднородности загрязнения атмосферного воздуха в пределах городской среды [2].

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

Целью данного исследования является отработка методики создания онлайн карт загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автодорог на территории города. Для достижения поставленной цели был сформулированы ряд задач:

- 1) определение текущих характеристик транспортных потоков (интенсивности, структуры и скорости) на тестовом участке дороги;
- 2) указать расчетные значения объемов выбросов загрязняющих веществ от транспортных потоков на тестовом участке дороги;
- 3) определение расчетных значений концентраций загрязняющих веществ вблизи автодороги, формируемых выбросами транспортных потоков;
- 4) визуализация полученных результатов посредством создания серии карт концентраций загрязняющих веществ вблизи автодорог и их выгрузка в web-формате.

Натурные исследования транспортных потоков интенсивности проводились посредством визуальной фиксации, отработывалась методика видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета. Определялись методики:

- автоматического расчета выбросов автотранспортных потоков с учетом текущей интенсивности, структуры и скорости транспортных потоков;
- автоматического расчета рассеивания с учетом динамики поступления загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников и текущих метеорологических условий.
- автоматического процесса интерполяции данных и построения карт загрязнения атмосферного воздуха и выгрузки их в формате html-страниц на сайт <https://komfortsreda.udsu.ru/>.

**Материалы и методы исследования***Определение интенсивности автотранспортных потоков*

Согласно «Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» (далее «Методика...») [14] учет интенсивности транспортных потоков может проводиться посредством визуальной фиксации транспортных средств, видеофиксации по видеофайлам, видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета. При этом в рамках «Методики...» видеофиксация по видеофайлам (видеофиксация видеофайлов с транспортными потоками и последующее визуальное определение интенсивности движения) и видеофиксация по данным непрерывного автоматического учета (осуществляется при условии наличия данных за период не менее двух лет) рассматриваются в контексте автоматизированного подхода к оценке интенсивности транспортных потоков. В то же время развитие технологий в области машинного зрения [7] позволяет рассматривать способ видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета как автоматический подход к оценке интенсивности транспортных потоков (без участия человека-оператора).

В рамках данного исследования применялись два подхода для оценки интенсивности транспортных потоков: учет интенсивности транспортных потоков посредством визуальной фиксации и видеофиксация по данным непрерывного автоматического учета с применением технологий «машинного зрения». В качестве тестового участка автодороги использовался километровый участок ул. Удмуртской г. Ижевска (в непосредственной близости от здания 1 корп. ФГБОУ ВО «УдГУ», ул. Университетская,1). Исследования интенсивности транспортных потоков проводились в период с 12.12.2022 по 18.12.2022 гг. Необходимо отметить, что реализуемая модель позволяет учитывать выбросы от множества линейных источников, однако на данном этапе учет выбросов производился только от одного источника (одной автодороги).

Интенсивность движения посредством *визуальной фиксации транспортных средств* определялась путем учета числа проходящих через контрольную линию транспортных

## Экология и природопользование

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

средств. Подсчет количества проходящих через условный створ транспортных единиц проводился в течение 10 мин в начале каждого часа с 8.00 до 20.00. Подсчет транспортных средств производился согласно «Методике...» [14] по следующим категориям транспортных средств: легковые автомобили, автофургоны и микроавтобусы до 3,5 т, грузовые автомобили от 3,5 до 12 т, грузовые автомобили свыше 12 т, автобусы свыше 3,5 т. Методом визуальной фиксации были определены недельная и полусуточная динамики интенсивности транспортных потоков.



Рис. 1. Фрагмент видеофайла, полученного в ходе видеофиксации транспортного потока ул. Удмуртской г. Ижевска с IP-камеры, расположенной на надземном переходе между корп. 1 и 2 ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»

Fig. 1. A fragment of a video file obtained during the video recording of the traffic flow on Udmurtskaya st., Izhevsk, from an IP camera located on the aboveground crossing between buildings 1 and 2 of Udmurt State University

Для оценки интенсивности транспортного потока посредством видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета на надземном переходе через улицу Удмуртская между 1 и 2 корпусами Удмуртского государственного университета была установлена IP-камера, передающая видеофайлы в режиме онлайн на сервер (рис. 1). В процессе методологической проработки математической модели расчета выбросов от автотранспортных потоков и их рассеивания были использованы данные об интенсивности транспортного потока, полученные при помощи видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета в 9 ч утра для ул. Удмуртской в первый день наблюдений – 12.12.2022.

Для осуществления поиска объектов в видеопотоке были использованы язык программирования Python и его библиотека OpenCV, а также сеть YOLO, на данный момент являющаяся ведущей сетью для распознавания потокового видео [7]. YOLO преобразует задачу распознавания объектов в единую задачу регрессии: от пикселей изображения до координат, содержащих рамки и вероятности классов. Реализация данной задачи включает в себя следующие этапы (рис. 2):

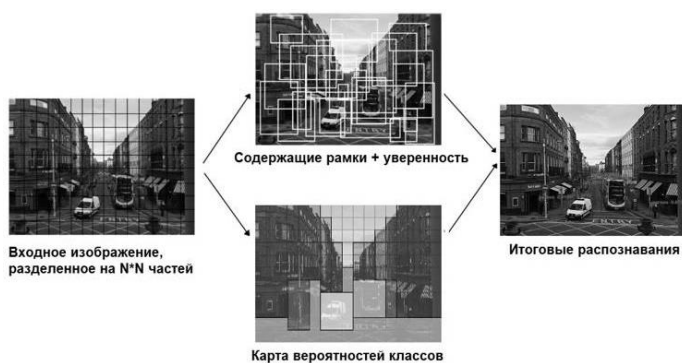


Рис. 2. Схема работы сети YOLO  
Fig. 2. The scheme of the YOLO network

Визуализация предсказаний позволяет получить карту всех объектов и набор содержащих рамок, ранжированных по их confidence.

3. Предсказание в каждой ячейке вероятностей классов, на основании которых определяется вероятность того, что в этой ячейке может быть автомобиль. Необходимо отметить, что если ячейка сети предсказывает автомобиль, это не значит, что он там есть, но это значит, что если там есть какой-то объект, то это автомобиль.

1. Разбивка изображения сетки на ячейки размером  $S \times S$ .
2. Предсказание в каждой ячейке нескольких содержащих рамок и показателя уверенности (confidence) для каждой из них (вероятности того, что данная рамка содержит объект). При этом очень важно, чтобы значения показателя confidence были очень маленькими, если в какой-то ячейке нет объектов.

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

В рамках работы сети YOLO на данный момент технически возможно выделение 4 классов транспортных средств: легковые автомобили и микроавтобусы до 3,5 т; мотоциклы; грузовые автомобили свыше 12 т; автобусы свыше 3,5 т. Необходимо отметить некоторое расхождение выделенных классов с рекомендованной классификацией структуры транспортного потока согласно «Методике...» [14]:

- дополнительно выделен класс «мотоциклы»,
- объединены в один класс легковые автомобили и микроавтобусы до 3,5 т,
- объединены грузовые автомобили от 3,5 до 12 т и грузовые автомобили свыше 12 т.

Класс «мотоциклы» в дальнейших расчетах был учтен в категории легковые автомобили. Объединение в одну категорию грузовых автомобилей более 3,5 т не приведет к значимым отклонениям в расчетных значениях в связи с малыми отклонениями значений удельных выбросов согласно «Методике...» (отклонение составляет 1,2 раза). Объединение в одну категорию легковых автомобилей и микроавтобусов до 3,5 т, с одной стороны, обуславливает занижение расчетных значений выбросов по ряду веществ (оксид углерода, взвешенные частицы  $PM_{2,5}$ , азот оксида и азот диоксида), поскольку согласно «Методики...» [14] удельные пробеговые выбросы для данных категорий отличаются по указанным веществам в 5,4–6,7 раза. С другой стороны, согласно натурным исследованиям, проведенным для данного участка дороги, в объединенном классе «легковые автомобили + микроавтобусы до 3,5 т» и в общей структуре потока категория микроавтобусов до 3,5 т составляет не более 20%, а доля легкового автотранспорта варьирует от 77 до 79% (рис. 1).

В рамках тестовых исследований работы программы по распознаванию потокового видео в автоматическом режиме были получены данные о структуре (по 4 классам транспортных средств), интенсивности и скорости транспортного потока. Учет указанных характеристик транспортного потока осуществлялся в непрерывном режиме, интеграция данных производилась каждые 10 мин. По результатам тестирования, проведенного на основе полученных видеофайлов, ошибка в определении автомобиля составляла менее 2%, ошибка в определении скорости объекта – менее 5%. Таким образом, несмотря на имеющиеся технические ограничения в определении категории транспортных средств, подход к оценке интенсивности транспортных потоков при помощи видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета представляет значительный интерес, связанный со снижением трудозатрат при получении данных, с возможностями получения непрерывного ряда данных и оперативного принятия административных решений.

*Определение объемов выбросов загрязняющих веществ.*

Расчет выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта осуществлялся при помощи программного кода, написанного на языке Go согласно «Методике определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» (далее «Методика...») [14]. В состав отработавших газов двигателей автомобильного транспорта входит ряд компонентов, из которых существенный объем занимают следующие ЗВ: углерод оксид (CO); азот оксид (NO); азот диоксид (NO<sub>2</sub>); взвешенные частицы (PM<sub>2,5</sub>); бензин; керосин; диоксид серы (SO<sub>2</sub>); формальдегид (CH<sub>2</sub>O); бензапирен (C<sub>20</sub>H<sub>12</sub>); метан (CH<sub>4</sub>).

Мощность эмиссии загрязняющих веществ (ЗВ) в отработавших газах отдельно для каждого газообразного вещества согласно «Методике...» определялась по формуле (1) [7]

$$M_{ii} = \frac{L}{1200} \sum_1^K M_{Ki}^n * G_K * r_{Vki}, \quad (1)$$

где L (км) – протяженность автодороги (участка автодороги). В рамках данного исследования был выбран участок дороги протяженностью 1 км;  $M_{Ki}^n$  – удельный пробеговой выброс i-го загрязняющего вещества k-й типы транспортного средства. Значения определялись согласно «Методике...»;  $G_K$  – фактическая интенсивность движения, которая



*Экология и природопользование*

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

определяется как количество транспортных средств каждой из  $k$  групп, проходящих через фиксированное сечение выбранного участка автодороги за единицу времени (20 мин) в двух направлениях по всем полосам движения. Полученные значения интенсивности, интегрированные за период 10 мин, умножались на 2;  $r_{vki}$  – поправочный коэффициент, учитывающий зависимость изменения количества выбрасываемых загрязняющих веществ от средней за период осреднения скорости движения автотранспортного потока (км/час) на выбранном участке автодороги. Минимальная скорость движения, согласно «Методике...», в "пробке" принимается равной 5 км/час;  $k$  – количество групп транспортных средств.

Значения коэффициентов  $r_{vki}$ , учитывающих скорость, представлены в «Методике...» с шагом 5–10 км/ч. Значения коэффициента  $r_{vki}$  скорости потока, попадающие в промежутки данных интервалов, высчитываются автоматически программой при помощи функции, которая пропорционально переносит значения из текущего диапазона значений в новый с заданными параметрами. Математическое выражение функции представлено ниже (2):

$$((x-a_1) * (b_2-b_1)) / ((a_2-a_1) + b_1), \quad (2)$$

где  $x$  – скорость потока, искомая при помощи машинного зрения;

$a_1, a_2$  – значения соседних скоростей, согласно таблице значений коэффициентов  $r_{vki}$ , согласно «Методике...»;  $b_1, b_2$  – значения коэффициента  $r_{vki}$ .

Таким образом, в процессе работы программа каждые 10 мин обращается к файлу, в котором интегрируются данные об интенсивности, структуре и скорости потока, получает информацию об объемах выбросов ЗВ от заданных линейных источников выбросов, рассчитывает объем выбросов, поступающих в атмосферный воздух от автотранспортных потоков.

*Определение концентрации загрязняющих веществ***Оценка влияния удаленности от дороги**

При оценке воздействия автотранспортных потоков на прилегающую территорию для исследуемого участка была создана расчетная сетка с шагом в 10 м (технически максимально возможная на данный момент детальность). Это позволило оценить вклад выбросов автотранспорта в концентрации загрязняющих веществ в каждой точке на расстоянии до 50 м от источника.

Согласно «Методам расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (далее «Методы...») [17] учет выбросов линейных источников осуществляется по формуле

$$c_1(x, y) = \int_L \frac{M(l) \cdot c'(x-\xi, y-\eta)}{V(l)} dl, \quad (3)$$

где  $M(l)$  и  $V(l)$  – значения  $M(t)$  и  $V(t)$ , соответствующие тому моменту времени  $t$ , когда перемещающийся источник выброса находится в точке  $l = (\xi, \eta)$ ,

$c'$  – вычисленная по формулам, приведенным в «Методах...», концентрация в точке  $(x, y)$  от одиночного источника выброса ЗВ единичной мощности, располагающегося в точке  $(\xi, \eta)$ . При этом под линейным источником выброса аппроксимируются выбросы от точечного источника, который за время осреднения перемещается с положительной скоростью вдоль отрезка  $L$ . Таким образом, автодорога была представлена как ряд расположенных на одной линии точечных источников на расстоянии 1 м друг от друга (т.е. километровый участок дороги состоял из 1000 взаимовлияющих друг на друга точечных источников). Географические координаты расчетных точек и точек-источников были получены при помощи программы Qgis.

*Определение значений максимальной приземной разовой концентрации*

Согласно «Методам...» для низких источников выбросов концентрация  $C$  по оси  $x$  всегда будет равна  $C_m$  (максимальной приземной разовой концентрации). Таким образом, определение концентрации по оси  $x$  будет осуществляться по формуле (4)

## Экология и природопользование

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

$$C_m = \frac{A * M * F * m * n * \eta}{H^2 * \sqrt[3]{V_1 * \Delta T}} * I, \quad (4)$$

где  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, определяющий условия горизонтального и вертикального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе ( $=160$ );  $M$  – масса ЗВ, выбрасываемого в атмосферный воздух в единицу времени, г/с; (берется из расчетов, сделанных ранее);  $F$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания ЗВ (газообразных и аэрозолей, в т.ч. твердых частиц) в атмосферном воздухе (равен 1, а для бензапирена и взвешенных веществ  $PM_{2,5} = 3$ );  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности (определяемый в соответствии с гл. 7 «Методов...») (равен 1);  $H$  – высота источника выброса, м (соответствует значению 2 м);  $V_1$  – расход ГВС, определяемый по формуле согласно «Методам...»,  $m^3/c$ . Для расчета используется значение диаметра устья источника выброса (м) и скорость выхода ГВС (м/с). В связи с незначительностью влияния на конечный результат было допущено следующее упрощение: диаметр выхлопной трубы был взят в качестве константы и равен средне-пропорциональному структуре потока значению (0,13 м);  $\Delta T$  – разность между температурой, выбрасываемой ГВС  $T_g$  (равен 450), и температурой атмосферного воздуха  $T_v$ , °C. Обновление данных о текущих метеоусловиях осуществлялось при помощи информации, размещенной на сайте <https://openweathermap.org/> [33];  $I$  – коэффициент, зависящий от наличия осадков (дождь, снег), предложен авторами и получен эмпирическим путем (от 0,62 до 0,3 в зависимости от интенсивности осадков)\*. Показатель о наличии осадков берется в режиме онлайн с сервиса <https://openweathermap.org/>. В то же время на данный момент авторы не учитывали коэффициент в расчетах в связи с непроработанностью методики дифференциации информации об интенсивности осадков, поступающей с сервиса <https://openweathermap.org/> [33];  $m$  и  $n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выброса из устья источника выброса;

\*Влияние наличия атмосферных осадков на процессы самоочищения атмосферного воздуха и, как следствие, на уровень загрязнения, отмечалось многими авторами [10; 23; 27]. В то же время при реализации математической модели рассеяния примеси в атмосферном воздухе, согласно «Методам...» [17], данный фактор не учтен. В рамках эпизодических исследований атмосферного воздуха, проведенных авторами на территории г. Ижевска в период с 2014 по 2020 г. [26], было осуществлено более 50 000 отборов проб воздуха. Коэффициент корреляции показателя КИЗА (комплексного индекса загрязнения атмосферы) и показателя наличия/интенсивности осадков составил  $-0,3$  (отрицательная достоверная связь слабой степени). При исключении из выборки эпизодов, когда фиксировались осадки малой интенсивности, коэффициент корреляции составил  $-0,62$  (отрицательная достоверная связь средней степени). Таким образом, при возможности дифференцированной фиксации интенсивности осадков, с учетом степени влияния данного фактора на уровень загрязнения атмосферного воздуха, авторами предлагается ввести поправочный коэффициент, варьирующий в пределах от 0,3 до 0,62.

Приземная концентрация ЗВ в атмосфере  $C_y$  на расстоянии  $y$  к оси источника выброса определяется по формуле

$$C_y = S_2 * C * \theta, \quad (5)$$

где  $\theta$  – коэффициент, учитывающий «поперечность» направления ветра, принимается равным 0, если разница между дирекционным углом дороги и направлением ветра  $= 270^0$  или  $90^0$ , в остальных случаях  $\theta = 1$ ;  $S_2$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость ветра и расстояние от источника.

**Создание онлайн-карт загрязнения атмосферного воздуха вблизи автодорог города**

Алгоритм создания онлайн-карт на базе полученных расчётных значений концентраций в расчетных точках (для участка дороги протяженностью 1 км количество расчетных точек составило 11000) включает в себя следующие этапы:

## Экология и природопользование

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

- 1) экспорт табличных значений (в формате CSV) концентраций в программу Qgis;
- 2) построение карт концентраций загрязняющих веществ с применением способа картографического изображения изолиний (инструмент Qgis «Интерполяция»);
- 3) выгрузка полученных карт в формате html-страниц при помощи модуля «qgis2web»;
- 4) экспорт полученных html-страниц в структуру сайта <https://komfortsreda.udsu.ru/>, созданного при помощи фреймворка bootstrap.

Автоматическое решение поставленной задачи реализуется посредством написания встроенного модуля, написанного на языке Python. Модули в Qgis — это способ расширить функциональность QGIS, позволяющий как добавить простую кнопку, так и создать сложный набор инструментов.

## Результаты и обсуждение

**Интенсивность автотранспортных потоков**

При анализе структуры транспортного потока в течение недели можно отметить существенный вклад в структуру транспортных потоков легкового автотранспорта (78%)

(рис. 3). В выходной день доля в структуре транспортного потока легковых автомобилей незначительно больше (79%), чем в будние дни (78%). Второе место по численности в структуре транспортного потока занимают автофургоны и микроавтобусы до 3,5 т (17%). На долю грузового транспорта более 3,5 т (включая категории от 3,5т до 12 т и свыше 12 т) и автобусов приходится чуть более 5%.

В выходные дни отмечается снижение интенсивности транспортных потоков в среднем на 27%. При этом интенсивность движения легкового транспорта и микроавтобусов до 3,5 т снижается на 16–17%, а грузового транспорта более 3,5т – 37–39%. В то же время динамика интенсивности движения легкового автотранспорта является типичной для динамики потоков транспортных средств в целом. Наибольшая интенсивность движения транспорта фиксируется в середине недели в период со вторника по четверг (рис. 4).

При анализе полусуточной динамики показателя интенсивности транспортных потоков можно отметить, что в большей степени она определяется динамикой интенсивности движения легкового автотранспорта. Таким образом, в будний день для улицы Удмуртская можно выделить следующие «час пик»: 8:00, 13:00–14:00 и 17:00–18:00 (рис. 5).



Рис. 3. Структура транспортного потока, определенная по результатам визуальной фиксации транспортных средств, ул. Удмуртская г. Ижевск с 12 по 18 декабря 2022 г.

Fig. 3. The traffic flow structure determined based on visual recording of vehicles on Udmurtskaya st., Izhevsk, from 12 to 18 December 2022

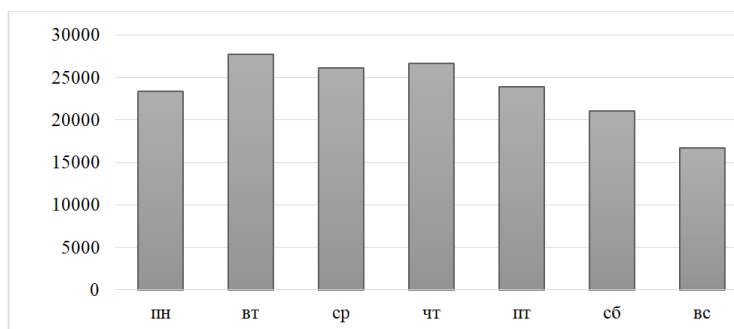


Рис. 4. Суммарное количество транспортных средств, проезжающих через условный створ за период с 8.00 до 20.00, автомобиль/час, ул. Удмуртская г. Ижевск с 12 по 18 декабря 2022 г.

Fig. 4. The total number of vehicles passing through the conditional gate from 8.00 to 20.00, car/hour, Udmurtskaya st., Izhevsk, from 12 to 18 December 2022

## Экология и природопользование

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

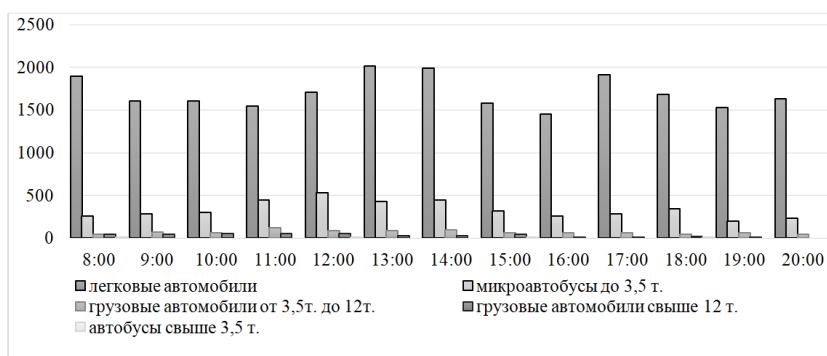


Рис. 5. Интенсивность движения транспортных средств, автомобиль/час, ул. Удмуртская г. Ижевска в будний день в середине недели (14.12.2022)

Fig. 5. Traffic intensity, car/hour, Udmurtskaya st., Izhevsk, on a weekday in the middle of the week (14 December 2022)

Для выходных дней характерно отсутствие ярко выраженных «часов пик». В целом отмечается рост интенсивности движения транспорта (в первую очередь, легкового автотранспорта) в период с 11.00 до 17.00 ч (рис. 6).

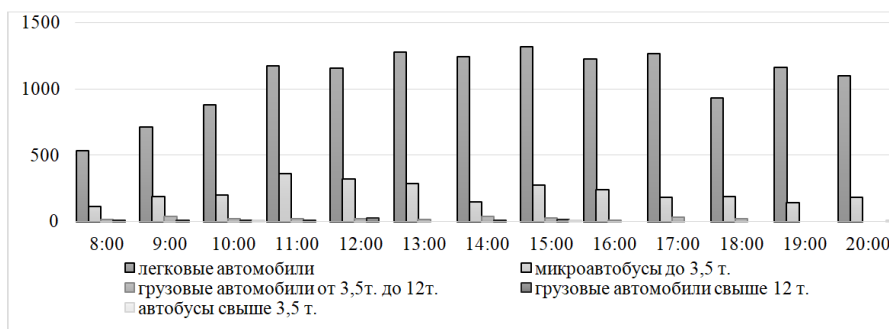


Рис. 6. Интенсивность движения транспортных средств, автомобиль/час, ул. Удмуртская г. Ижевска в выходные дни (17–18.12.2022)

Fig. 6. Traffic intensity, car/hour, Udmurtskaya st., Izhevsk, on weekends (17–18 December 2022)

Результаты, полученные посредством видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета (интенсивность движения и структура транспортного потока) и использованные в дальнейшем для методологической проработки математической модели расчета выбросов от автотранспортных потоков и их рассеяния, представлены на рис. 7. Средняя скорость транспортного потока в указанный период составила 55 км/ч.

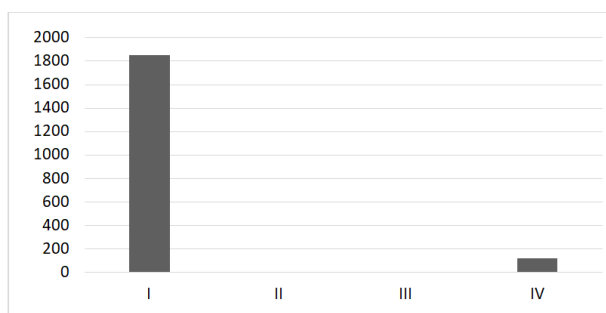


Рис. 7. Интенсивность движения транспортных средств, полученная на основе видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета в 9 ч утра для ул. Удмуртской г. Ижевска 12.12.2022, автомобиль/час

(I – легковые автомобили и микроавтобусы до 3,5 т, II – мотоциклы, III – автобусы, IV – грузовые автомобили свыше 3,5 т)

Fig. 7. The traffic intensity obtained on the basis of continuous automatic video recording at 9.00 for Udmurtskaya st., Izhevsk, 12 December 2022, car/hour (I – passenger cars and minibuses up to 3.5 tons, II – motorcycles, III – buses, IV – trucks over 3.5 tons)

## Объемы выбросов загрязняющих веществ

Расчетные значения объемов выбросов ЗВ, формируемых транспортными потоками на ул. Удмуртской в 9.00 12.12.2022 г., представлены на рис. 8.

*Экология и природопользование*

*Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.*

Наибольший вклад в валовые значения вносят 4 компонента выбросов: оксид углерода (64%), оксид азота (суммарно 23%), бензин (11%). Доля остальных примесей составляет 2%.

Объемы выбросов напрямую зависят от значений удельных выбросов категорий транспортных средств. Согласно «Методике...» [14], удельные выбросы для метана определялись с учетом средней доли автотранспортных средств, работающих на сжатом природном газе (СПГ), а для азота оксида и азота диоксида – с учетом их химических превращений (трансформации).

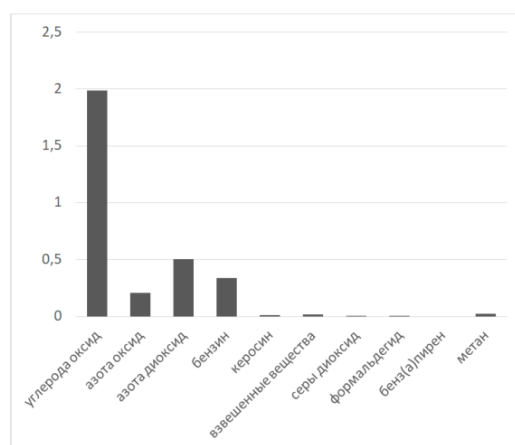


Рис. 8. Объемы выбросов, формируемые выбросами транспортных потоков ул. Удмуртской г. Ижевска, полученные в 9 ч утра 12.12.2022  
Fig. 8. The volumes of emissions generated by traffic flows on Udmurtskaya st., Izhevsk, obtained at 9:00 on 12 December 2022

*Концентрации загрязняющих веществ*

В результате проделанной работы были получены значения концентраций ЗВ в атмосферном воздухе, формируемых выбросами автотранспортных потоков, в непосредственной близости от ул. Удмуртской. При сравнении данных величин с санитарно-гигиеническими нормативами [19] можно сделать вывод о том, что на расстоянии 50 м концентрация двуоксида азота составляет менее 1 значения предельно-допустимой концентрации максимально разовой (ПДК м.р.).

Согласно ранее проведенным исследованиям [21] воздействие от автотранспортного потока прослеживается на прилегающей территории на расстоянии не более 50 м. Проведенные при помощи газоанализатора ГАНК-4 натурные исследования уровня загрязнения атмосферного воздуха диоксидом азота в период с 12.12.2022 по 18.12.2022 г., подтвердили значительное снижение концентраций ЗВ на удалении от дороги (рис. 9).

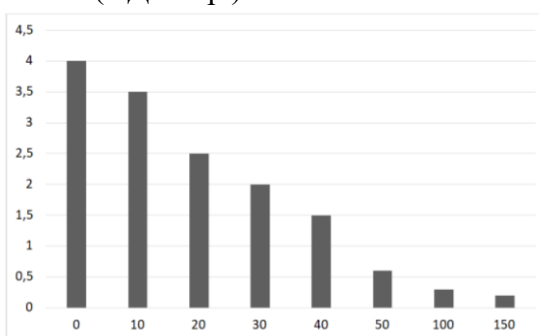


Рис. 9. Значения концентраций диоксида азота в долях ПДК максимально-разовой при удалении от границы дорожного полотна ул. Удмуртской г. Ижевска, полученные в 9 ч утра 12.12.2022  
Fig. 9. Nitrogen dioxide concentrations in fractions of the maximum single MPC at a distance from the border of the roadbed on Udmurtskaya st., Izhevsk, obtained at 9:00 on 12 December 2022

*Визуализация полученных результатов в формате web-карт*

Полученные расчётным путем концентрации диоксида азота были импортированы в программный продукт Qgis и при помощи модуля «Интерполяция» были сформированы поля концентраций диоксида азота для исследуемой территории г. Ижевска. Визуализация полученных результатов представлена на динамических картах, размещенных на сайте <https://komfortsreda.udsu.ru/> в разделе Ижевск/Атмосферный воздух/Динамика концентраций NO<sub>2</sub> [32]. На данный момент на сайте <https://komfortsreda.udsu.ru/> размещены не онлайн-карты (обновляемые каждые 10 мин), а динамические карты, отражающие только полусуточную динамику загрязнения атмосферного воздуха 12.12.2022 г. и только по одному компоненту (диоксиду азота) вблизи ул. Удмуртской. Это связано с процессом доработки модуля автоматического экспорта данных в Qgis.

*Экология и природопользование**Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.***Заключение**

Целью данного исследования являлась отработка методики создания онлайн карт загрязнения атмосферного воздуха выбросами от автодорог на территории г. Ижевска. Авторами были определены характеристики транспортных потоков (интенсивность, структура, скорость) посредством двух подходов: визуальной фиксации транспортных средств и видеофиксации по данным непрерывного автоматического учета. В дальнейших расчетах выбросов ЗВ были использованы данные, полученные в ходе непрерывного автоматического учета.

Полученные расчетные значения объемов выбросов напрямую зависят от следующих параметров: структура и интенсивность, скорость транспортного потока, удельных выбросов по категориям транспортных средств. При этом в структуре выбросов доминируют следующие компоненты: оксиды азота, оксид углерода, бензин. Расчет выбросов и рассеяния ЗВ вблизи автодороги ул. Удмуртской осуществлялся автоматически при помощи программного продукта, написанного на языке GO. Полученные значения расчетных и эмпирических концентраций ЗВ подтвердили отсутствие превышений санитарно-гигиенических нормативов в период исследований на расстоянии 50 м от дорожного полотна.

Картографическая визуализация полученных результатов представлена в виде динамических карт на сайте <https://komfortsreda.udsu.ru/>. Отработка методики выгрузки онлайн-карт находится на завершающей стадии и требует решения доработки модуля автоматического экспорта табличных данных в Qgis.

В рамках проведенного исследования рассмотрено новое перспективное направление развития оценки динамики состояния атмосферного воздуха. При существующих на данный момент финансовых ограничениях пространственного развития государственной мониторинговой сети математическое моделирование (на основе постоянно актуализируемых данных об объемах эмиссии и условиях рассеяния) может выступать дополнительным источником информации, предоставляющим данные о текущем уровне загрязнения атмосферного воздуха в режиме онлайн в конкретной точке города. Данный подход может быть аналогичным образом применен к прочим природным средам с учётом динамики геохимических процессов. Динамические экологические карты, в свою очередь, как средство визуализации являются одним из доступных способов представления информации о состоянии окружающей среды.

Полученные результаты представляют интерес в качестве отработки методики создания онлайн карт загрязнения атмосферного воздуха города. В дальнейшем планируется расширение сети IP-камер для формирования более сложной модели загрязнения атмосферного воздуха выбросами взаимно пересекающихся линейных источников.

**Список источников**

1. Агапова Е.А., Сумской С.И. Аналитический обзор математических моделей распространения облаков тяжелых газов // «Безопасность труда в промышленности». М., 2017. № 5. С. 23–31.
2. Антропов К.М. Математические модели загрязнения атмосферного воздуха мегаполиса и промышленного центра выбросами автотранспорта и промышленных предприятий: автореф. дис. ... к. ф.-м. н. Екатеринбург, 2012. С. 12–20.
3. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 448 с.
4. Бузало Г.А., Бузало Н.С., Коцур С.В., Никифоров А.А. Некоторые задачи оптимизации в проблеме загрязнения атмосферы промышленного региона // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, Новочеркасск. 2010. № 6. С. 107–110.
5. Бузало Н.С. Математическое моделирование переноса примеси в мезометеорологическом пограничном слое атмосферы: дис. ... канд. наук. Новочеркасск, 2003. С. 8–26.
6. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.М. Турбулентные струи – статистические модели и моделирование крупных вихрей. М.: Физматлит, 2014. 360 с.
7. Головкин В.А., Кроценко А.А., Михно Е.В., Войцехович О.Ю. Нейросетевые модели детекции товаров на изображении // Вестник Брестского государственного технического университета. Физика, Математика, Информатика. Брест, 2018. № 5(113). С. 27–30.
8. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Удмуртской республики в 2021 г.» / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды УР, АУ «Управление охраны окружающей среды и природопользования Минприроды Удмуртской республики». Ижевск, 2022. 176 с.

## Экология и природопользование

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

9. Костылева В.М., Скобеле Д.О., Пронин А.Н., Медведевских С.В. Оснащение предприятий промышленности системами автоматического контроля эмиссии // Справочник эколога. М., 2022. № 5. С. 92–98.
10. Короткова Н.В., Семенова Н.В. Влияние осадков на загрязнение атмосферного воздуха в Саратове // Тезисы докл. Всерос. науч. конф. «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития». М., 20–22 марта 2017 г. М.: ФГБУ «ИГКЭ Росгидромета и РАН», 2017. С. 612–614.
11. Кычкин А.В., Горшков О.В., Кукаркин М.А. Интеграция предиктивно-аналитических моделей с IoT-платформой цифрового экомониторинга // Прикладная информатика. Т. 17. № 4(100). Пермь, 2022. С. 5–16.
12. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды, М.: Наука, 1971. 350 с.
13. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ: рук. по безопасности: приказ Ростехнадзора от 20 апр. 2015 г. № 158. Сер. 27. Вып. 11. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. 77 с.
14. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха, утвержденная Приказом Минприроды России от 27.11.2019 № 804. М., 2019. 10 с.
15. Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2) // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сб. документов. Сер. 27. Вып. 2. М.: ГУП «Промышленная безопасность», 2001. С. 121–204.
16. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеивания тяжелого газа / А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин и др. // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 9. С. 46–52.
17. Методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утв. приказом Минприроды России от 06.06.2017. N 273. М., 2017.
18. Паспорт национального проекта «Экология» (период реализации 01.10.2018–31.12.2024). М.: Изд-во Министерства природных ресурсов и экологии РФ, 2018. 10 с.
19. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 года N 2. М., 2021. 496 с.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы ЭВМ №2018611903 от 08.02.2018г. правообладатель: ФГАОУ ВО высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».
21. Семакина А.В. Особенности учета влияния междугородной автотранспортной сети на атмосферное загрязнение // Вестник Удмуртского Университета. Сер. Биология. Науки о земле. 2008. Вып. 1. С. 25–30.
22. Сорокин Н.Д. Проект программы создания системы автоматического контроля выбросов загрязняющих веществ // Справочник эколога. № 11(119). М., 2022. С. 65–74.
23. Стулов Е.А., Плауде Н.О., Монахова Н.А. Влияние условий погоды на характеристики аэрозоля в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. М., 2010. № 2. С. 26–34.
24. Хаширова Т.Ю., Акбаева Г.А., Шакова О.А., Акбаева Е.А. Моделирование загрязненности атмосферного воздуха // Фундаментальные исследования. М., 2017. № 8–2. С. 325–330.
25. Экологический программный комплекс для персональных ЭВМ : Теорет. основы и руководство пользователя ЭПК "Zone": Разраб. "Ленэкософт". СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 165с.
26. Экология и природопользование на территории города Ижевска: монография / под ред. И.И. Рысина, О.Г. Барановой. Ижевск: Изд-во Института компьютерных исследований, 2018. С. 27–35.
27. Akhmetshina F., Osadchaya L., Dyachenko Y. The impact of meteorological factors on pollutant dispersion in the city area // сб. мат. III Всерос. молодежной науч.-практ. конф. с межд. участием. Севастополь, 2021. С. 81–85.
28. Britter R.E., McQuaid J. Workbook on the dispersion of dense gases // HSE Contract Research Report. 1988. № 17/88. 128 с.
29. Spicer T.O., Havens J.A. User's Guide For The DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model // US Environmental Protection Agency. 1989. 431 с.
30. VDI Guidelines 3783, Part II Environmental Meteorology, Dispersion of heavy gases // The Association of German Engineers. 1990. 43 с.
31. Witlox H.W.M. The HEGADAS model for ground-level heavy-gas dispersion-I. Steady-state model // Atmospheric Environment. 1994. Vol. 28. Iss. 18. P. 2917–2932.
32. Интерактивная платформа «Комфортная среда г. Ижевска». URL: <https://komfortsreda.udsu.ru/>.
33. Метеорологическая база данных. URL: <https://openweathermap.org/>.
34. Онлайн карта «breezometer». URL: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york>.
35. Онлайн карта «Эковизор». URL: <http://online.russiangureens.ru/>.
36. Официальный сайт ООО «Фирма «Интеграл»». URL: <https://integral.ru/news/>.

## References

1. Agapova, E.A., Sumskoj, S.I. (2017), Analiticheskij obzor matematicheskijh modelej rasprostraneniya oblakov tyazhelyh gazov [Analytical review of mathematical models of heavy gas cloud propagation], *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, pp. 23–31.
2. Antropov, K.M. (2012), *Matematicheskie modeli zagryazneniya atmosfernoego vozduha megapolisa I promyshlennogo centra vybrosami avtotransporta I promyshlennyh predpriyatij* [Mathematical models of atmospheric air pollution of a megalopolis and an industrial center by emissions from motor vehicles and industrial enterprises] avtoreferat diss.k.f.-m.n., Ekaterinburg, Russia.
3. Berlyand, M.E. (1975), *Sovremennye problemy atmosfernoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia.
4. Buzalo, G.A., Buzalo, N.S., Kocur, S.V., Nikiforov, A.A. (2010), Nekotorye zadachi optimizacii v probleme zagryazneniya atmosfery promyshlennogo regiona, *Izvestiya VUZov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki*, no. 6, pp. 107–110.
5. Buzalo, N.S. (2003), *Matematicheskoe modelirovanie perenosa primesi v mezometeorologicheskom pogranichnom sloe atmosfery*, Diss. rabota na soiskanie uch. st. kand. Nauk, Novocherkassk, Russia, pp. 8–26.

## Экология и природопользование

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

6. Volkov, K.N., Emelianov, V.N., Zazimko, V.M. (2014), *Turbulentnye strui – statisticheskie modeli i modelirovanie krupnyh vihrei* [Turbulent jets – statistical models and modeling of large vortices.], Fizmatlit, Moscow, Russia.
7. Golovko, V.A., Kroschenko, A.A., Mihno, E.V., Vojcekhovich, O.Yu. (2018), Nejrosetevye modeli detekcii tovarov na izobrazhenii (2018), *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Fizika, Matematika, Informatika, Brest*, no. 5(113), pp. 27–30.
8. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii i ob ohrane okruzhayushchej sredy Udmurtskoj respubliki v 2021g.» (2022) [State report "On the state and environmental protection of the Udmurt Republic in 2021"], Ministerstvo prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy UR, AU «Upravlenie ohrany okruzhayushchej sredy i prirodnopol'zovaniya Minprirody Udmurtskoj respubliki», Izhevsk, Russia.
9. Kostyleva, V.M., Skobele, D.O., Pronin, A.N., Medvedevskih, S.V. (2022), Osnashchenie predpriyatij promyshlennosti sistemami avtomaticheskogo kontrolya emissii [Equipping industrial enterprises with automatic emission control systems], *Spravochnik ekologiya*, no. 5, pp. 92–98.
10. Korotkova, N.V., Semenova, N.V. (2017), Vliyanie osadkov na zagryaznenie atmosfernogo vozduha v Saratove, *Tezisy dokladov Vserossijskoj nauchnoj konferencii «Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchej sredy. Osnovnye rezul'taty i puti razvitiya»*, pp. 612–614.
11. Kychkin, A.V., Gorshkov, O.V., Kukarkin, M.A. (2022), Integraciya prediktivno-analiticheskikh modelej s iot-platfomoj cifrovogo ekomonitringa [Integration of predicative analytical models with the iOS digital ecomonitoring platform], *Prikladnaya informatika*, vol. 17, no. 4(100), pp. 5–16.
12. Marchuk, G.I. (1971), *Matematicheskoe modelirovanie v probleme okruzhayushchej sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem], Nauka, Moscow, Russia.
13. *Metodika modelirovaniya rasprostraneniya avariynih vybrosov opasnyh veshchestv: ruk. po bezopasnosti* (2015), ZAO NTC PB, Moscow, Russia.
14. *Metodika opredeleniya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferyj vozduh ot peredvizhnyh istochnikov dlya provedeniya svodnyh raschetov zagryazneniya atmosfernogo vozduha* (2019), Utverzhdennaya Prikazom Minprirody Rossii ot 27.11.2019 № 804, Moscow, Russia.
15. Metodika ocenki posledstvij himicheskikh avarij (Metodika «Toksi». Redakciya 2.2) (2001), *Methods of assessing the consequences of accidents at hazardous production facilities: collection of documents*, GUP «Promyshlennaya bezopasnost'», pp. 121–204.
16. Shatalov, A.A., Lisanov, M.V., Pecherkin, A.S. i dr. (2004), Metodika rascheta rasprostraneniya avariynih vybrosov, osnovannaya na modeli rasseivaniya tyazhelogo gaza, *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, no. 9, pp. 46–52.
17. Metody raschetov rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosferyj vozduhe (2017), utv. prikazom Minprirody Rossii ot 06.06.2017 N 273, Moscow, Russia.
18. Paspport nacional'nogo proekta «Ekologiya» (period realizacii 01.10.2018–31.12.2024) (2018), Ministerstvo prirodnih resursov i ekologii RF, Moscow, Russia.
19. SanPiN 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya» (2021), Utverzhdeny postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Rossijskoj Federacii ot 28 yanvarya 2021 goda N 2, Moscow, Russia.
20. Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy EVM №2018611903 ot 08.02.2018 g (2018), pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya «Belgorodskij gosudarstvennyj nacional'nyj issledovatel'skij universitet», Belgorod, Russia.
21. Semakina, A.V. (2008), Osobennosti ucheta vliyaniya mezhdugorodnoj avtotransportnoj seti na atmosferyj zagryaznenie, *Vestnik Udmurtskoj Universiteta. Ser. Biologiya. Nauki o zemle*, vol. 1, pp. 25–30.
22. Sorokin, N.D. (2022), Proekt programmy sozdaniya sistemy avtomaticheskogo kontrolya vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv, *Spravochnik ekologiya №11(119)*, pp. 65–74.
23. Stulov, E.A., Plaude, N.O., Monahova, N.A. (2010), Vliyanie uslovij pogody na harakteristiki aerolya v prizemnom sloe atmosfery, *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 2, pp. 26–34.
24. Hashirova, T.Yu., Akbasheva, G.A., SHakova, O.A., Akbasheva, E.A. (2017), Modelirovanie zagryaznennosti atmosferyj vozduha, *Fundamental'nye issledovaniya*, no. 8–2, pp. 325–330.
25. Ekologicheskij programmnyj kompleks dlya personal'nyh EVM : Teoret. osnovy i rukovodstvo pol'zovatelya EPK "Zone": Razrab. "Lenekosoft (1992), Gidrometeoizdat, Saint Petersburg, Russia.
26. Ekologiya i prirodnopol'zovanie na territorii goroda Izhevsk: Monografiya (2018), [Ecology and nature management on the territory of the city of Izhevsk: Monograph], *Institut komp'yuternyh issledovaniy*, pp. 27–35.
27. Akhmetshina, F., Osadchaya, L., Dyachenko, Y. (2021), The impact of meteorological factors on pollutant dispersion in the city area, *Sbornik materialov III Vserossijskoj molodyozhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem*, pp. 81–85.
28. Britter, R.E., McQuaid, J. (1988), Workbook on the dispersion of dense gases, *HSE Contract Research Report*, no. 17/88.
29. Spicer, T.O., Havens, J.A. (1989), *User's Guide For The DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model*, US Environmental Protection Agency.
30. VDI Guidelines 3783, Part II Environmental Meteorology, Dispersion of heavy gases (1990), The Association of German Engineers.
31. Witlox, H.W.M. (1994), The HEGADAS model for ground-level heavy-gas dispersion-I. Steady-state model, *Atmospheric Environment*, vol. 28, iss. 18, pp. 2917–2932.
32. Interaktivnaya platforma «Komfortnaya sreda g.Izhevsk», available at: <https://komfortsreda.udsu.ru/>.
33. Meteorologicheskaya baza dannyh, available at: <https://openweathermap.org/>.
34. Online karta «breezometer», available at: <https://www.breezometer.com/air-quality-map/ru/air-quality/united-states/new-york>.
35. Online karta «Ekovizor», available at: <http://online.russiangureens.ru/>.
36. Oficial'nyj sajt OOO «Firma «Integral»», available at: <https://integral.ru/news/>.



*Экология и природопользование*

Семакина А.В., Коробейникова А.А., Петухова Л.Н., Воронов И.А., Ренкез Г.В., Зуев А.М.

Статья поступила в редакцию: 18.07.2022; одобрена после рецензирования: 17.02.2023; принята к опубликованию: 23.05.2023.

The article was submitted: 18 July 2022; approved after review: 17 February 2023; accepted for publication: 23 May 2023.

## Информация об авторах

## Information about the authors

**Алсу Валерьевна Семакина**

кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой экологии и природопользования Института естественных наук, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»; 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1/1

**Alsu V. Semakina**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor in the Department of Ecology and Nature Management, Institute of Natural Sciences, Udmurt State University; 1/1 Universitetskaya st., Izhevsk, 426034, Russia

e-mail: alsen13@list.ru

**Анастасия Андреевна Коробейникова**

студентка 4 курса направления подготовки 05.03.06 «Экология и природопользование», ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»; 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1/1

**Anastasia A. Korobeynikova**

Student, Ecology and Nature Management Training Program, Udmurt State University;

1/1 Universitetskaya st., Izhevsk, 426034, Russia

e-mail: korobejnikovanasta3@gmail.com

**Лариса Николаевна Петухова**

кандидат географических наук, доцент, заместитель директора по учебной части института естественных наук, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»; 426034, Россия, г. Ижевск, ул. Университетская, 1/1

**Larisa N. Petukhova**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Deputy Director for Education, Institute of Natural Sciences, Udmurt State University;

1/1 Universitetskaya st., Izhevsk, 426034, Russia

e-mail: petlar75@mail.ru

**Илья Андреевич Воронов**

педагог дополнительного образования Республиканского детского технопарка «Кванториум»; 426009, г. Ижевск, ул. Ухтомского, 14–143

**Ilya A. Voronov**

Additional Education Teacher, Republican Children's Technopark 'Quantorium'; apt.143, 14, Ukhtomskogo st., Izhevsk, 426009, Russia

e-mail: whitet@bk.ru

**Глеб Владимирович Ренкез**

студент 4 курса бакалавриата направления подготовки 01.03.04 «Прикладная математика», ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»; 426077, г. Ижевск, ул. 40-летия ВЛКСМ, 29–56

**Gleb V. Reinkez**

Bachelor's Student, Applied Mathematics Training Program, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

apt.56, 29, 40 let VLKSM st., Izhevsk, 426077, Russia

e-mail: glebrenkez@gmail.com

**Альберт Марселевич Зуев**

ученик 8 класса частного учреждения СОШ «Столичный-КИТ» (г.Москва); 426067, г. Ижевск, ул. Труда, 60–15

**Albert M. Zuev**

Student, Private Secondary School 'Stolichnyi-KIT' (Moscow);

apt. 15, 60, Truda st., Izhevsk, 426067, Russia

e-mail: iamnaliner@yandex.ru

**Вклад авторов**

Семакина А.В. – идея, сбор материала, обработка материала, написание статьи, научное редактирование статьи.  
Коробейникова А.А. – методологическое обеспечение программы расчета выбросов и их рассеяния, редактирование графического материала.

Петухова Л.Н. – сбор материала, научное редактирование статьи.

Воронов И.А. – методологическое обеспечение процесса определения интенсивности и скоростного режима транспортных потоков, создание программы автоматической видеофиксации изображения, редактирование текста.

Ренкез Г.В. – методологическое обеспечение процесса определения интенсивности и скоростного режима транспортных потоков, создание программы автоматической видеофиксации изображения.

Зуев А.М. – методологическое обеспечение программы расчета выбросов и их рассеяния, написание программы расчета выбросов с учетом текущих характеристик транспортных потоков и метеоусловий.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors**

Alsu V. Semakina – the idea; material collection and processing; writing the article; scientific editing of the text.

Anastasia A. Korobeynikova – methodological support for the program for calculating emissions and their dispersion; editing of the graphic material.

Larisa N. Petukhova – collection of the material; scientific editing of the article.

Ilya A. Voronov – methodological support for the process of determining the intensity and speed of traffic flows; creation of an automatic video image recording program; editing of the text.

Gleb V. Reinkez – methodological support for the process of determining the intensity and speed of traffic flows; creation of an automatic video image recording program.

Albert M. Zuev - methodological support for the program for calculating emissions and their dispersion; writing a program for calculating emissions taking into account the current characteristics of traffic flows and weather conditions.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.