

Научная статья

УДК 656.13(1-21):621.43.06:504.3.064; DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-54-62

К ВОПРОСУ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНО ОПАСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЗВЕШЕННЫХ ЧАСТИЦ ОТ АВТОМАГИСТРАЛИ С УЧЕТОМ ИХ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

✉ Пенченков Андрей Юрьевич;

Ложкин Владимир Николаевич.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия

✉ danshtein@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются вопросы физико-математического моделирования процессов распространения, накопления и чрезвычайно опасного воздействия взвешенных частиц от автомагистралей на окружающую среду и здоровье городского населения при неблагоприятных метеорологических и особых транспортных условиях в часы «пик». Приводятся результаты критического анализа современных отечественных и зарубежных физико-аналитических подходов, которые рекомендуется применять для физико-математического описания исследуемых в работе специфичных процессов эмиссии, распространения и накопления в стратифицированной атмосфере окрестности автомагистрали твердых частиц различной природы происхождения и, следовательно, разного уровня негативного санитарно-гигиенического воздействия, оцениваемого по предельно-допустимым концентрациям на уровне дыхания человека. Анализируются области применения моделей и рекомендуемые меры по снижению чрезвычайно опасного загрязнения воздушной среды взвешенными частицами разной природы происхождения на автомагистрали. В заключение приводятся резюмирующие выводы по совершенствованию проанализированных в работе физико-математических моделей, направленных на повышение точности результатов путем учета актуальных факторов в целях эффективного управления качеством воздуха городов.

Ключевые слова: распространение загрязняющих веществ, пылевидные продукты, автомагистрали, окружающая среда, физико-математические модели, воздействие, автомобильный транспорт

Для цитирования: Пенченков А.Ю., Ложкин В.Н. К вопросу моделирования чрезвычайно опасного воздействия взвешенных частиц от автомагистрали с учетом их химического состава // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 4 (68). С. 54–62. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-54-62.

Scientific article

MODELING THE EXTREMELY HAZARDOUS IMPACT OF SUSPENDED PARTICLES FROM A HIGHWAY, CONSIDERING ACCOUNT THEIR CHEMICAL COMPOSITION

✉ Penchenkov Andrey Yu.;

Lozhkin Vladimir N.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia

✉ danshtein@yandex.ru

Abstract. The issues of physical and mathematical modeling of the processes of distribution, accumulation and extremely dangerous impact of suspended particles from highways

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2023

on the environment and the health of the urban population under adverse meteorological and special transport conditions during peak hours are considered. The results of a critical analysis of modern domestic and foreign physical-analytical approaches are presented, which are recommended to be used for the physical-mathematical description of the specific processes of emission, propagation and accumulation in the stratified atmosphere in the vicinity of a motorway of solid particles of various origins and, consequently, different levels of negative sanitary hygienic impact, estimated by the maximum permissible concentrations at the level of human breathing. The areas of application of the models and recommended measures to reduce extremely dangerous air pollution with suspended particles of various origins on the highway are analyzed. In conclusion, summarizing conclusions are given on the improvement of the physical and mathematical models analyzed in the work, aimed at improving the accuracy of the results by taking into account relevant factors in order to effectively manage urban air quality.

Keywords: distribution of pollutants, dusty products, highways, environment, physical and mathematical models, impact, road transport

For citation: Penchenkov A.Yu., Lozhkin V.N. Modeling the extremely hazardous impact of suspended particles from a highway, considering account their chemical composition // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2023. № 4 (68). P. 54–62. DOI: 10.61260/1998-8990-2023-4-54-62.

Введение

Актуальность работы заключается в рассмотрении наиболее известных физико-математических моделей анализа качества воздуха, которые, в свою очередь, необходимы для мониторинга содержания пылевидных продуктов в воздухе в условиях чрезвычайно опасного действия транспортно-дорожных факторов, что является важным направлением для исследований, так как экологическая обстановка вблизи автомагистралей подвержена высокому уровню загрязнений.

Целью данной работы являлся анализ современных физико-аналитических подходов, которые применяются для физико-математического описания распространения и накопления взвешенных частиц от автомагистралей.

Основная научная задача, которая при этом решалась, проанализировать существующие методы с систематизацией их особенностей и отличий.

Методы исследования

В процессе исследования применялся метод обзорно-теоретического критического анализа литературных данных в предметной области изысканий из открытых источников информации.

Результаты

В настоящее время автотранспорт является одним из главных источников загрязнения окружающей среды. В результате сжигания топлива в двигателе автомобиля образуется ряд вредных химических веществ, которые могут переноситься вместе с пылевидными продуктами и приводить к загрязнению воздуха. Среди них:

1. Оксиды азота, образующиеся при сжигании топлива в высоких температурах и являющиеся одними из главных источников загрязнения воздуха в городах. Они могут вызывать проблемы с дыханием, ухудшение здоровья сердца и легких, а также способствовать формированию смога.

2. Углеводороды, образующиеся при сжигании топлива, могут быть токсичными для человека. Они могут вызывать раздражение глаз и дыхательных путей, головные боли, тошноту и другие проблемы со здоровьем.

3. Оксиды серы, образующиеся при сжигании топлива, содержащего серу, могут вызывать проблемы с дыханием, особенно у людей с астмой или другими заболеваниями легких.

4. Тяжелые металлы, такие как свинец и кадмий, которые могут содержаться в топливе и переноситься вместе с пылевидными продуктами [1], могут накапливаться в организме и вызывать различные проблемы со здоровьем, такие как нарушения нервной системы, проблемы с почками и др.

Твердые частицы, называемые сажей, образуются при неполном сгорании топлива и являются основным компонентом пылевидных загрязнений в выхлопах автомобилей.

Пылевидные продукты, такие как ПМ10 и ПМ2,5, представляют собой частицы пыли размером менее 10 микрометров и менее 2,5 микрометров соответственно. Они являются составной частью атмосферного воздуха и могут содержать различные вещества, включая тяжелые металлы, углеводороды, органические соединения, соли, минеральные вещества и др. [2]. Пылевидные продукты обладают высокой адсорбционной способностью благодаря большой поверхности частиц. Адсорбция – это процесс, при котором молекулы газов или жидкостей притягиваются и удерживаются на поверхности твердого тела.

Адсорбция происходит за счет химических взаимодействий между поверхностью частиц и молекулами адсорбируемого вещества. Исследования показывают, что бензапирен и тяжелые металлы, такие как свинец, кадмий и ртуть, могут адсорбироваться на поверхности частиц ПМ2,5 и ПМ10.

Кроме того, размер частиц ПМ10 и ПМ2,5 делает их особенно опасными для здоровья, поскольку они могут проникать в легкие и даже в кровеносную систему человека, что может вызывать различные заболевания, включая респираторные и сердечно-сосудистые. В целом пылевидные продукты представляют собой серьезную проблему для окружающей среды и требуют принятия мер для снижения их выбросов для защиты здоровья людей.

Также было выяснено, что пылевидные продукты могут быть носителями инфекций и бактерий, которые могут привести к заболеваниям дыхательной системы и другим болезням. Это особенно актуально в условиях повышенной загрязненности воздуха в городах.

Все эти вредные вещества могут переноситься вместе с пылевидными продуктами из выхлопов автомобилей и приводить к загрязнению воздуха. Исследования показали, что пылевидные продукты, в том числе ПМ10 и ПМ2,5, могут негативно влиять на здоровье населения не только вблизи источников выбросов, но и на значительном удалении от них, поскольку они могут долгое время находиться в атмосфере и распространяться на большие расстояния.

Одним из российских исследований, связанных с пылевидными выбросами автотранспорта, является работа «Оценка загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом в Московском регионе» (2019), проведенная специалистами Всероссийского научно-исследовательского института охраны окружающей среды (ВНИИ «Экология», Москва) [3]. В ходе исследования были измерены концентрации ПМ10 и ПМ2,5 вдоль автомагистралей МКАД и Ленинградского пр-та. Результаты показали, что на расстоянии до 500 м от автодорог концентрации ПМ10 и ПМ2,5 превышали допустимые нормы, а максимальное значение достигало 2,5 раза от предельно допустимого значения.

Также существует множество исследований в других странах, которые показывают аналогичные результаты. Например, в Италии было проведено исследование концентрации ПМ10 вдоль автодорог, которое показало, что на расстоянии до 300 м ее значение было более чем в два раза выше норматива.

Таким образом, существует много исследований, подтверждающих, что пылевидные продукты, выбрасываемые автотранспортом, могут распространяться на значительное расстояние и влиять на качество атмосферного воздуха в окружающих территориях. Подобные исследования могут помочь в разработке более эффективных методов борьбы с загрязнением воздуха и защите здоровья людей [4].

Для описания распространения, накопления и воздействия на окружающую среду вредных пылевидных продуктов, которые могут поступать в атмосферу из-за деятельности автомагистрали, используются физико-математические модели. Модель учитывает физические и химические свойства загрязнителей, а также факторы, влияющие на их поведение в окружающей среде, такие как скорость ветра, температура, влажность и другие параметры.

Модель может состоять из нескольких компонентов:

1. Уравнение динамики вредных пылевидных продуктов в окружающей среде, которое учитывает процессы диффузии, конвекции и химических реакций, включая фотохимические реакции, происходящие в атмосфере.

2. Уравнение баланса массы, которое описывает количество загрязнителей, поступающих из автомагистрали и удаляющихся из окружающей среды, включая механизмы осаждения на поверхности земли и растениях.

3. Уравнение оценки воздействия на здоровье населения, которое учитывает дозы вредных пылевидных продуктов, попадающих в организмы людей через дыхательную систему, а также их токсические свойства.

В настоящее время существует множество физико-математических моделей для описания распространения, накопления или воздействия на население вредных пылевидных продуктов в окрестности автомагистрали с учетом их химического состава.

Одной из наиболее известных и широко применяемых моделей является модель CALINE-4, разработанная в 1980-х гг. Она предназначена для моделирования динамики распространения автомобильных выбросов на открытых участках и в городах и учитывает такие факторы, как скорость ветра, температура воздуха, высота и характеристики источников выбросов, а также географические особенности местности [5].

Заданная модель применяется с целью исследования дисперсии загрязняющих веществ в условиях движения транспортных средств. Ее функциональность охватывает множество аспектов ландшафта и подвижных источников загрязнений в пределах 500 м вблизи автомобильных дорог. Путем данной модели осуществляется оценка уровня загрязнения воздуха на перекрестках, автотрассах и стоянках с учетом воздействия выбросов от автотранспорта на окружающую среду в указанных точках.

Модель CALINE-4 разработана для оценки дисперсии загрязнений от автотранспорта. Ее особенностью является учет различных параметров, таких как скорость ветра, теплообмен, метеорологические условия, транспортные потоки и характеристики дорожной инфраструктуры. CALINE-4 базируется на принципе линейного источника, где автомагистраль представляется в виде линии, а выбросы загрязнений происходят вдоль этой линии. Для функционирования CALINE-4 необходимы данные о топографии местности, метеорологические данные, информация о движении транспортных потоков и другие параметры, которые могут быть получены с помощью метеорологических станций, датчиков движения и другого специализированного оборудования.

AERMOD (American Meteorological Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model) – это модель, разработанная совместно Американским метеорологическим обществом и Агентством по охране окружающей среды США [6]. Она предназначена для моделирования дисперсии загрязнений вблизи источников выбросов, таких как промышленные предприятия и дорожный транспорт. AERMOD используется для проведения атмосферного моделирования и оценки качества воздуха в соответствии с требованиями нормативов.

Модель AERMOD является интегрированной системой моделирования, позволяющей оценивать дисперсию и концентрации загрязняющих веществ в атмосфере от различных источников, учитывая метеорологические условия, высоту источников выбросов, топографию и другие параметры. Применяется для прогнозирования рассеивания примесей выбросов от стационарных источников загрязнения атмосферы (ИЗА) (точечных, линейных, площадных) в штатном и аварийном режимах в радиусе до 50 км. Ее особенностью является использование физических и математических моделей для описания турбулентности и перемешивания воздушных масс. Для функционирования AERMOD необходимы данные

о метеорологических условиях, географической информации, характеристиках выбросов и других параметрах, которые могут быть получены с помощью метеорологических станций, GPS-датчиков и другого специализированного оборудования.

Данная система приспособлена для вычисления характеристик планетарного пограничного слоя с помощью процессора AERMET. Она предоставляет расчеты для множества параметров, таких как сопротивление, длина Мони́на-Обухова, скорость конвекции на разных масштабах, температурный градиент, высота перемешивания, поток тепла на поверхности. Это достигается при интеграции локальных характеристик поверхности, включая шероховатость и коэффициент переноса, в сочетании со стандартными метеорологическими показателями (скорость и направление ветра, температура, облачность). После этого полученные значения используются для расчетов вертикальных профилей скорости ветра, боковых и вертикальных турбулентных колебаний и градиента потенциальной температуры в рамках AERMOD.

Математической основой данной модели служит Гауссово распределение, в рамках которого представлена стационарная модель шлейфа. Эта модель учитывает дисперсию воздуха с учетом структуры турбулентности в планетарном пограничном слое и принципы масштабирования. Она способна обрабатывать разнообразные источники выбросов, включая поверхностные и атмосферные, а также учитывает сложные рельефы местности.

CALPUFF (CALPUFF Dispersion Model) – это усовершенствованная система моделирования метеорологии и качества воздуха в нестационарном режиме, разработанная учеными компании Exponent. Она поддерживается разработчиками модели и распространяется компанией Exponent [7]. Модель была включена Агентством по охране окружающей среды США в список альтернативных моделей для оценки переноса загрязняющих веществ на большие расстояния и их воздействия на территории федерального класса I. Она учитывает метеорологические условия, топографию местности, физико-химические процессы и другие факторы, влияющие на распространение пылевидных загрязнений. Математическая основа – Лагранжева модель рассеивания.

Представленная система моделирования включает в себя три ключевых компонента и набор программ для предварительной и последующей обработки данных. Суть системы моделирования заключается в совокупности трех основных элементов: CALMET (диагностическая трехмерная метеорологическая модель), CALPUFF (модель дисперсии воздушных загрязнений) и CALPOST (инструмент для последующей обработки результатов). Кроме перечисленных компонентов также имеется множество других процессоров, предназначенных для подготовки геофизических данных (сведения о местности и рельефе) в разнообразных стандартных форматах; а также метеорологических данных (данные о поверхности, верхних слоях атмосферы, осадках и информация от буев).

Дополнительно в составе данной системы существует HYROAD (Hybrid ROADway Mode) – это Гауссова модель распределения, которая учитывает изменения в диспергировании в момент старта автомобилей. HYROAD позволяет моделировать пространственно-временное распределение загрязнений воздуха в условиях дорожно-транспортного движения, учитывая особенности начальной стадии движения автотранспорта. Модель объединяет три отдельных модуля, которые моделируют влияние трафика, выбросов и рассеивания [6].

Модуль трафика представляет собой микромасштабную транспортную модель, которая имитирует движение отдельных транспортных средств. Модуль выбросов использует распределения скорости из модуля движения для определения составных коэффициентов выбросов; пространственное и временное распределение выбросов основано на моделировании работы транспортных средств. Модель отслеживает распределение скорости и ускорения транспортных средств по фазам сигнала на 10-метровом участке дороги для использования как для распределения выбросов, так и для индуцированных потоков и турбулентности.

Модуль дисперсии использует формулировку Лагранжа, а также сетчатое неоднородное поле ветра и устойчивости, полученное из результатов работы модуля движения для описания

характеристик дисперсии вблизи проезжей части. HYROAD предназначен для определения почасовых концентраций угарного газа (CO) или других газофазных загрязнителей, твердых частиц (PM) и токсичных веществ в воздухе от выбросов транспортных средств в местах расположения рецепторов, которые находятся в пределах 500 м от пересечений дорог.

Еще одной из интересных моделей является модель ADMS (Atmospheric Dispersion Modelling System), разработанная в Великобритании [8]. Она позволяет моделировать динамику выбросов в широком диапазоне условий. В ее основе лежит ряд математических уравнений, описывающих динамику распространения выбросов в атмосфере, и учет взаимодействия этих выбросов с другими компонентами атмосферы.

Модель ADMS также представляет собой систему моделирования дисперсии загрязнений для расчета концентраций загрязняющих веществ, выбрасываемых как непрерывно от точечных, линейных, объемных и площадных источников, так и дискретно от точечных источников, которая может быть применена для оценки распространения пылевидных продуктов от автомагистралей. Представленная модель включает в себя алгоритмы, учитывающие ряд важных факторов: воздействие строительства на основную площадку; сложные рельефные особенности местности; воздействие влажных осадков, гравитационного и сухого осаждения; быстрые колебания концентрации; химические реакции; радиоактивный распад и излучение гамма-доз; изменение высоты факела в зависимости от расстояния; распределение струй и направленных выбросов; временные усреднения от очень короткого до годового периода; видимость конденсированного факела.

CTDMPLUS (Complex Terrain Dispersion Model Plus Algorithms for Unstable Situations) – это Гауссова модель распределения [9], используемая для оценки качества атмосферного воздуха в регионах со сложным рельефом при разнообразных условиях дисперсии выбросов. Эта модель требует полного трехмерного описания уникальных характеристик местности, чтобы адекватно учесть искажения потока (и формирование шлейфа). Для определения состояния пограничного слоя необходимы точные оценки параметров поверхностного слоя (коэффициент трения и длина Монина-Обухова) и глубины смешанного слоя.

Модель имитирует поток и искажение факела вблизи выбранных пользователем трехмерных особенностей рельефа, но при этом сохраняет простоту, применяя поправки на искажение потока для плоской местности, гауссовых и бигауссовых распределений загрязняющих веществ. Алгоритмы для стабильных условий основаны на концепции разделяющей линии потока. Эти алгоритмы были разработаны на основе данных трех крупных полевых исследований уплотнения шлейфов и ряда исследований по моделированию флюидов. Учитывается негауссова природа вертикального рассеивания; боковое рассеивание моделируется с помощью концепций конвективного масштабирования.

Все вышеупомянутые методики не позволяют учитывать химический состав взвешенных частиц при анализе воздуха. Поэтому для решения данной задачи в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России была проведена научно-исследовательская работа, целью которой стала разработка соответствующей методики «Методика прогнозирования опасного воздействия взвешенных частиц в окрестности автомагистрали с учетом их химического состава» [10].

За основу была взята «Методика определения выбросов автотранспорта для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферы городов» (2010) [11], поскольку именно эта методика позволяет на основании данных обследования структуры потоков и интенсивности движения производить оценку выбросов опасных загрязнителей непосредственно вблизи автодорог.

В основе данного метода лежит подход, который опирается на концепцию диффузии твердых частиц из основных транспортных магистралей в периоды наивысшей интенсивности движения при неблагоприятных погодных условиях. Эта методика была разработана совместно исследователями из Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова и Научно-исследовательского института «Атмосферного воздуха» в Санкт-Петербурге. Она представляет собой реализацию численных решений уравнения

атмосферной диффузии, направленных на определение концентрации твердых частиц в зависимости от ряда конкретных параметров, таких как характер участка (перекресток, транспортная артерия, элемент инфраструктуры дорожной сети), городская среда, метеорологические обстоятельства и прочие факторы. Это выражение для средней концентрации вещества в воздухе (q) формируется следующим образом:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} k_x \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} k_y \frac{\partial q}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} k_z \frac{\partial q}{\partial z} - \alpha q,$$

где x и y представляют собой горизонтальные координатные оси; z – вертикальная координатная ось; t – переменная времени. Переменные u , v , w обозначают составляющие средней скорости перемещения твердых частиц в стратифицированной атмосфере, соответственно, в направлениях осей x , y и z . Параметры k_x , k_y и k_z представляют собой горизонтальные и вертикальную составляющую коэффициента обмена. Параметр α описывает влияние физических процессов, таких как коагуляция, гравитационное оседание, вымывание частиц сажи осадками, их оседание на поверхности почвы, водных объектов, инфраструктуры, зданий и других элементов.

Задача определения уровня загрязнения атмосферы вблизи автомагистралей Санкт-Петербурга взвешенными частицами, учитывая их химический состав, решается путем использования специализированных программных продуктов, таких как «Магистраль» и «Эколог-город», разработанных компанией «Интеграл», в которые были внесены определенные в ходе исследования доли содержания бенз(а)пирена в «выхлопных» и «невыхлопных» частицах.

В целом в современной науке существует множество моделей, которые позволяют оценить динамику распространения вредных пылевидных веществ в окрестности автомагистралей. Однако необходимо отметить, что большинство этих моделей разработаны для конкретных условий и не всегда могут быть применимы в других географических регионах и климатических условиях [12].

Физико-математические модели находят применение в нескольких областях. Службы охраны окружающей среды и экологического контроля используют их для мониторинга качества воздуха и оценки воздействия загрязнений на окружающую среду и здоровье населения. Дорожные организации и администрации прогнозируют и оценивают воздействие дорожного движения на окружающую среду и здоровье населения с помощью моделей, что помогает им принимать меры по снижению загрязнения и оптимизации условий движения. Научно-исследовательские институты и университеты проводят научные исследования, используя моделирование, для изучения воздействия пылевидных продуктов от автомагистралей и оценки эффективности мер по снижению загрязнения. Здравоохранение и общественное здоровье оценивают риски и разрабатывают рекомендации по снижению негативных последствий, анализируя связь между концентрациями пылевидных продуктов и заболеваниями дыхательных путей и другими проблемами со здоровьем.

Задача МЧС России заключается в том, чтобы контролировать чрезвычайно опасные воздействия пылевидных частиц на население городов с плотным автомобильным движением, поэтому необходимо прогнозировать расчетным путем усиление негативного их действия на человека с учетом абсорбции на поверхности сильнейших токсичных и канцерогенных веществ, а именно $C_{20}H_{12}$ и тяжелых металлов, то есть учета химического состава РМ.

Заключение

Таким образом, физико-математические модели представляют собой мощный инструмент для оценки качества воздуха в окрестности автомагистралей и разработки стратегий управления этим качеством. Они отличаются друг от друга по сложности, точности и уровню детализации.

Важно учитывать не только физико-химические свойства пылевидных продуктов, но также и их взаимодействие с атмосферой и климатическими условиями.

Поэтому для достижения оптимальных результатов необходимо проводить дальнейшие исследования в этой области, включая разработку более точных и прогнозируемых моделей, учет дополнительных факторов и оценку эффективности различных мер для улучшения качества воздуха в окрестности автомагистралей.

Список источников

1. Identification of metals and metalloids as hazardous elements in PM_{2,5} and PM₁₀ collected in a coastal environment affected by diffuse contamination / H. Morillas [et al.] // *Journal of cleaner production*. 2019. Т. 226. Р. 369–378.

2. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* // John Wiley & Sons. 2016.

3. Каргаполов Н.В., Рафаилова А.Л. Оценка загрязнения атмосферного воздуха автомобильным транспортом в Московском регионе // *International Journal of Professional Science*. 2019. № 10. С. 52–65.

4. Source apportionment to support air quality planning: Strengths and weaknesses of existing approaches / P. Thunis [et al.] // *Environment international*. 2019. Т. 130. С. 104825.

5. Benson P.E. Caline 4-a dispersion model for predictiong air pollutant concentrations near roadways // *Transportation research board*. 1984. № FHWA-CA-TL-84-15 Final Rpt.

6. Hartley W.S., Carr E.L., Bailey C.R. Modeling hotspot transportation-related air quality impacts using ISC, AERMOD, and HYROAD. URL: <http://www.ctre.iastate.edu/educweb/aq/AWMA%20Paper%200406%20Hartley.pdf> (дата обращения: 16.07.2023).

7. A user's guide for the CALPUFF dispersion model / J.S. Scire [et al.] // *Earth Tech, Inc*. 2000. Т. 521. Р. 1–521.

8. Daly A., Zannetti P. Air pollution modeling – an overview // *Ambient air pollution*. 2007. С. 15–28.

9. Mensink C., Kallos G. Air pollution modeling and its application XXV // Cham: Springer international publishing, 2018. С. 114–501.

10. Ложкин В.Н., Пенченков А.Ю., Гавкалюк Б.В. Физико-математическая модель образования, распространения, накопления и опасного воздействия транспортных ПМ₁₀ и ПМ_{2,5} с учетом их химического состава в условиях чрезвычайных ситуаций // *Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России»*. 2019. № 1. С. 1–6.

11. Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Рос. Федерации от 6 июня 2017 г. № 273 (зарег. 10 авг. 2017 г. № 47734). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201708110012?ysclid=lmejgnhv19927604848> (дата обращения: 11.09.2023).

12. Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2,5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis / P. Orellano [et al.] // *Environment international*. 2020. Т. 142. С. 105876.

References

1. Identification of metals and metalloids as hazardous elements in PM_{2,5} and PM₁₀ collected in a coastal environment affected by diffuse contamination / H. Morillas [et al.] // *Journal of cleaner production*. 2019. Т. 226. Р. 369–378.

2. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* // John Wiley & Sons. 2016.

3. Kargapolov N.V., Rafailova A.L. Ocenka zagryazneniya atmosfernogo vozduha avtomobil'nym transportom v Moskovskom regione // *International Journal of Professional Science*. 2019. № 10. С. 52–65.

4. Source apportionment to support air quality planning: Strengths and weaknesses of existing approaches / P. Thunis [et al.] // *Environment international*. 2019. T. 130. P. 104825.
5. Benson P.E. Caline 4-a dispersion model for predictiong air pollutant concentrations near roadways // *Transportation research board*. 1984. № FHWA-CA-TL-84-15 Final Rpt.
6. Hartley W.S., Carr E.L., Bailey C.R. Modeling hotspot transportation-related air quality impacts using ISC, AERMOD, and HYROAD. URL: <http://www.ctre.iastate.edu/educweb/eq/AWMA%20Paper%200406%20Hartley.pdf> (data obrashcheniya: 16.07.2023).
7. A user's guide for the CALPUFF dispersion model / J.S. Scire [et al.] // *Earth Tech, Inc*. 2000. T. 521. P. 1–521.
8. Daly A., Zannetti P. Air pollution modeling – an overview // *Ambient air pollution*. 2007. P. 15–28.
9. Mensink C., Kallos G. Air pollution modeling and its application XXV // *Cham: Springer international publishing*, 2018. P. 114–501.
10. Lozhkin V.N., Penchenkov A.Yu., Gavkalyuk B.V. Fiziko-matematicheskaya model' obrazovaniya, rasprostraneniya, nakopleniya i opasnogo vozdeystviya transportnyh PM10 i PM2,5 s uchetom ih himicheskogo sostava v usloviyah chrezvychajnyh situacij // *Nauch.-analit. zhurn. «Vestnik S.-Peterb. un-ta GPS MCHS Rossii»*. 2019. № 1. S. 1–6.
11. Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosfernom vozduhe: prikaz Ministerstva prirodnyh resursov i ekologii Ros. Federacii ot 6 iyunya 2017 g. № 273 (zareg. 10 avg. 2017 g. № 47734). URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201708110012?ysclid=lmejgnhv19927604848> (data obrashcheniya: 11.09.2023).
12. Short-term exposure to particulate matter (PM10 and PM2,5), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis / P. Orellano [et al.] // *Environment international*. 2020. T. 142. P. 105876.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 11.09.2023; одобрена после рецензирования: 16.09.2023; принята к публикации: 18.09.2023

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 11.09.2023; approved after review: 16.09.2023; accepted for publication: 18.09.2023

Информация об авторах:

Пенченков Андрей Юрьевич, соискатель кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: danshtein@yandex.ru

Ложкин Владимир Николаевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN-код: 9496-2451

Information about the authors:

Penchenkov Andrey Yu., applicant of the department of fire, rescue equipment and automobile economy of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: danshtein@yandex.ru

Lozhkin Vladimir N., professor of the department of fire, rescue equipment and automobile economy of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, professor, Honored scientist of the Russian Federation, e-mail: vnlojkin@yandex.ru, SPIN: 9496-2451