

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет
Государственной противопожарной службы МЧС России

На правах рукописи

Тимофеев Владимир Дмитриевич

**МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ
НА АВТОМАГИСТРАЛИ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ПРОДУКТАМИ
ГОРЕНИЯ ТОРФЯНОГО ПОЖАРА**

05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт)

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Ложкина Ольга Владимировна

Санкт-Петербург – 2019

Оглавление

	Стр.
Введение.....	6
1 Состояние проблемы, цель и задачи исследования.....	12
1.1 Характеристика природных пожаров как источников опасного воздействия на население и окружающую среду.....	12
1.1.1 Типы природных пожаров.....	12
1.1.2 Анализ пространственно-временного распределения природных пожаров на территории Российской Федерации.....	15
1.1.3 Крупнейшие чрезвычайные ситуации, вызванные природными пожарами.....	19
1.2 Виды опасного воздействия природных пожаров на жизнедеятельность населения и транспортный процесс.....	21
1.2.1 Чрезвычайно опасное влияние на здоровье населения.....	23
1.2.2 Характеристика опасного воздействия лесных и торфяных пожаров на участников дорожного движения.....	27
1.2.3 Примеры чрезвычайных ситуаций на автомагистралях, возникших в результате действия природных пожаров.....	29
1.3 Анализ современных физико-математических моделей распространения продуктов горения в зоне природных пожаров.....	32
1.3.1 Математические модели природных пожаров.....	32
1.3.2 Модель переноса продуктов горения на основе уравнений Навье- Стокса.....	33
1.3.3 Модели распространения примесей в воздухе на основе К-теории.....	37
1.3.4 Модели Гауссова рассеивания.....	39
1.4 Анализ современных методических подходов для прогнозирования снижения дальности видимости в зоне действия природных пожаров.....	44
1.5 Правила регулирования дорожного движения в условиях ограниченной видимости.....	48
Выводы по первой главе.....	49

2	Объект и методы исследования. Структура диссертационного исследования.....	53
2.1	Общая характеристика торфяного пожара как объекта исследования.....	53
2.1.1	Химические и структурные особенности торфа как лесного горючего материала.....	53
2.1.2	Физико-химические особенности процесса горения торфа. Обоснование понятия «дымовой гейзер».....	55
2.2	Материалы и методы экспериментального исследования качественно-количественного состава продуктов горения модельного источника горения торфа.....	59
2.2.1	Экспериментальное моделирование локального источника горения торфа.....	59
2.2.2	Измерение содержания угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи модельного источника горения.....	60
2.2.3	Математическая обработка результатов экспериментальных измерений...	63
2.3	Расчетное прогнозирование распространения продуктов горения вблизи тлеющего торфяника.....	65
2.4	Методика оценки снижения дальности видимости при аэрозольном замутнении атмосферы.....	66
2.5	Структурно-логическая схема методики оценки и прогнозирования опасного воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения.....	67
	Выводы по второй главе.....	69
3	Экспериментальное и физико-математическое моделирование загрязнения приземного воздушного слоя выбросами продуктов горения тлеющего торфа	71
3.1	Обоснование модели распространения продуктов горения вблизи тлеющего торфяного источника выброса.....	71
3.2	Изучение особенностей распространения угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи модельного источника горения торфа с использованием численных и экспериментальных методов исследования.....	78

Выводы по третьей главе.....	93
4 Методика прогнозирования и мониторинга чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара.....	95
4.1 Описание комплексной методики прогнозирования чрезвычайного воздействия продуктов горения торфяного пожара на автотранспортный процесс.....	95
4.2 Постановка и реализация решений задачи расчетного прогнозирования распространения опасных продуктов горения торфяного пожара вблизи автомагистрали с использованием К-модели на примере изучения закономерностей развития чрезвычайной ситуации на федеральной автодороге Р-255 «Сибирь».....	98
4.3 Применение дифференциально-нейросетевого моделирования для прогнозирования загрязнения воздуха автомагистрали продуктами горения торфяного пожара.....	105
4.3.1 Обоснование применимости метода искусственных нейронных сетей для моделирования переноса продуктов горения в окрестности торфяного пожара.....	105
4.3.2 Нейросетевой подход в решении задачи прогнозирования загрязнения воздуха автомагистрали продуктами горения торфяного пожара.....	108
Выводы по четвертой главе.....	110
5 Оценка опасного воздействия продуктов горения (CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$) на участников и условия дорожного движения.....	113
5.1 Обоснование критериев ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности с учетом риска для здоровья и снижения дальности видимости.....	113
5.2 Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на автомагистрали от воздействия продуктов горения торфяного пожара (CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$) на примере исследования ЧС на федеральной автодороге Р-255 «Сибирь».....	116
Выводы по пятой главе.....	121
Заключение.....	123

Список сокращений и условных обозначений.....	129
Словарь терминов.....	131
Список литературы.....	132
Приложение А.....	154
Приложение Б.....	155
Приложение В.....	156
Приложение Г.....	158

Введение

Актуальность темы исследования. В обеспечении безопасности развития регионов России особое внимание уделяется профилактике природных пожаров на основе прогнозирования негативных последствий их влияния на близлежащие инфраструктурные объекты, населенные пункты, транспортную и иные виды деятельности.

Горение торфа происходит под землей, преимущественно без открытого огня при недостатке кислорода с обильным выделением угарного газа (СО) и опасных канцерогенных взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} . При возникновении торфяного пожара вблизи автомагистрали, продукты горения оказывают негативное влияние на условия дорожного движения из-за уменьшения дальности видимости и на самочувствие участников транспортного процесса, что, в сочетании с неблагоприятными метеорологическими условиями, может привести к чрезвычайным ситуациям (далее – ЧС) – транспортным коллапсам и дорожно-транспортным происшествиям. Крупная ЧС наблюдалась в осенне-зимний период 2015–2016 гг. в Усольском районе Иркутской области при горении торфяников в окрестностях федеральной автодороги (далее – ФАД) Р-255 «Сибирь».

Методическое обеспечение расчетного прогнозирования таких специфических ЧС сдерживается недостаточной изученностью физических механизмов образования, эмиссии и распространения в атмосфере опасных продуктов горения торфяного пожара, невозможностью проведения инструментальных измерений на горящих торфяниках из-за опасности провала, отсутствием расчетных методик для прогнозирования негативного воздействия компонентов дыма на условия и участников дорожного движения. Это не позволяет прогнозировать, объективно оценивать, а, следовательно, и адекватно реагировать на дорожные ЧС в окрестности горящих торфяников.

Необходимость решения данной актуальной проблемы определила выбор темы, обоснование цели и задач диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Проблемными вопросами обеспечения транспортной безопасности в условиях ЧС и безопасности дорожного движения занимались Кравченко П.А., Трофименко Ю.В., Евтюков С.А., Малыгин И.Г., Добромиров В.Н., Савчук О.Н., Шкрабак В.С., Ложкин В.Н., Лепеш Г.В., Скороходов Д.А., Стариченков А.Л., Черняев И.О. Развитию методов моделирования лесных, степных и торфяных пожаров и оценкам их воздействия на жизнедеятельность населения в России посвящены труды Гармышева В.В., Гришина А.М., Голованова А.Н., Гостинцева Ю.А. и др. ученых. Значительный вклад в изучение, моделирование и прогнозирование процессов экстремально высокого загрязнения атмосферы поллютантами внесли Берлянд М.Е., Генихович Е.Л., Оникул Р.Я., Буренин Н.С., Ивлева Л.С., Ложкин В.Н., Савчук О.Н., Ложкина О.В., Lavdas L.G., Lye K.H., Riebau A.R., Sestak M.L., Sung G.B., Sutton O.G.

В то же время следует отметить, что вопросы методического обеспечения для прогнозирования опасного воздействия продуктов горения природных пожаров, в том числе торфяных, на условия и участников дорожного движения практически не исследовались в нашей стране, несмотря на очевидную актуальность этой проблемы.

Цель исследования: разработать комплексную методику для прогнозирования ЧС на автомагистрали, вызываемых продуктами горения торфяного пожара, с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц, риска для здоровья водителей и пассажиров, снижения дальности видимости и обоснованными критериями ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности в зависимости от значений этих показателей.

Задачи исследования:

1. Разработать модель распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного очагов горения торфа на основе современных теоретических представлений о

механизмах горения торфа, переносе загрязняющих веществ в атмосфере и результатов измерений.

2. Разработать методику прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц.

3. Обосновать критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

Научная новизна:

1. На основе современных теоретических представлений о механизмах горения торфа, переносе загрязняющих веществ в атмосфере и результатов экспериментальных исследований разработана модель, позволяющая прогнозировать распространение поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) от точечного и площадного очагов горения торфа.

2. Предложена методика прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара, позволяющая оценивать условия формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц.

3. Обоснованы критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности, отличающиеся учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

Теоретическая значимость работы. Выявлены закономерности эмиссии и распространения в приземной атмосфере продуктов горения торфяного пожара, теоретически обоснованы закономерности опасно высокого загрязнения придорожного воздуха автомагистрали компонентами дыма – угарным газом и мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$, установлены закономерности снижения дальности видимости на автодороге в зависимости от загрязнения воздушной среды мелкодисперсными частицами дыма, научно обоснованы критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности с

учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

Практическая значимость работы. Разработана методика для прогнозирования чрезвычайного воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения с оценкой снижения дальности видимости, риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и предложены критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности в зависимости от значения этих показателей. Методика позволяет с высокой степенью достоверности осуществлять прогнозирование ЧС на автомагистрали, обусловленных экстремально высоким загрязнением придорожного воздуха компонентами дыма торфяного пожара.

Методы исследования: методы физико-математического анализа закономерностей образования продуктов горения торфяного пожара и моделирования их переноса в воздушной среде; экспериментальные и численные методы определения концентраций угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц в атмосферном воздухе; методы статистического анализа, теоретический анализ снижения дальности видимости при загрязнении атмосферы компонентами дыма, методы оценки риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Модель распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного очагов горения торфа, основанная на современных теоретических представлениях о механизмах горения торфа, переносе загрязняющих веществ в атмосфере и результатах измерений.

2. Методика прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц.

3. Критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности, обоснованные с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

Достоверность основных положений диссертационного исследования подтверждена применением широко апробированных теоретических представлений о механизмах образования продуктов горения при природных пожарах и переноса их в воздушной среде; подтверждена полнотой результатов экспериментальных исследований, соответствием расчетных значений приземных концентраций CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$ по данным собственных измерений, осуществленных с использованием поверенного аналитического оборудования, и результатам анализа воздуха, полученным Росгидрометом; согласованностью полученных результатов с аналогичными данными авторитетных научных школ.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационного исследования доложены и обсуждены на Всероссийской научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в арктическом регионе» (Санкт-Петербург, 2016); VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Пожарная безопасность: проблемы и перспективы» (Воронеж, 2016.); XVI Международной научно-технической конференции «Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике» (Пенза, 2016); XI Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование» (Москва, 2016); XI международной конференции «Mesh methods for boundary-value problems and applications» (Казань, 2016); XV Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение» (Москва, 2017); Международной научно-практической конференции «Транспорт России: проблемы и перспективы 2018» (Санкт-Петербург, 2018).

Реализация результатов исследования. Результаты диссертационного исследования внедрены в практическую деятельность ФКУ «Центр управления в

кризисных ситуациях главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу» для прогнозирования чрезвычайных ситуаций от воздействия продуктов горения торфяных пожаров и в практическую деятельность ОАО «НИИ Атмосфера» (Санкт-Петербург) для разработки нормативных документов и методических рекомендаций для расчетов загрязнения атмосферы.

Результаты диссертационного исследования применяются в образовательном процессе ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.

Основные результаты диссертации оформлены в виде научных отчетов по результатам НИР «Контроль и прогнозирование чрезвычайно опасного воздействия торфяного пожара на автотранспортный процесс» (№ гос. регистрации АААА-А17-117121340096-9), выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности, и НИР «Информационные модели на основе иерархических гетерогенных нейронных сетей в исследовании влияния объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду» (№ проекта 14-01-00733 А, 2015-2016), осуществленной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

1 Состояние проблемы, цель и задачи исследования

1.1 Характеристика природных пожаров как источников опасного воздействия на население и окружающую среду

1.1.1 Типы природных пожаров

Природные пожары по масштабам воздействия и последствиям для человечества и биосферы имеют такую же важную роль как климатический режим, качество воздушной среды и водных ресурсов, превратившись одновременно в регулирующий и лимитирующий фактор задолго до того, как человек научился управлять огнем. Справедливости ради следует отметить, что на засушливых территориях низовые природные пожары имеют положительную регулирующую функцию, способствуя высвобождению полезных минералов из подстилающей поверхности в форме, пригодной для усвоения почвенными бактериями, способствуя, таким образом, улучшению качества почвы и увеличивая продуктивность экосистем [1].

Однако совершенно очевидна огромная опасность и негативные последствия природных пожаров: ежегодно лесные, торфяные и степные пожары, охватывающие площади в несколько миллионов гектаров, наносят огромный урон экономике и окружающей среде.

Под природным пожаром (в соответствии со словарем терминов МЧС России [2]) понимается неконтролируемый процесс горения, стихийно возникающий и распространяющийся в природной среде. На Рисунке 1.1 представлена схема с основными видами природных пожаров.



Рисунок 1.1 – Основные виды природных пожаров

Под лесными и степными пожарами понимается самопроизвольное (под воздействием естественных факторов окружающей среды, например солнечных лучей) или спровоцированное человеком (в результате неаккуратного обращения с огнем или умышленного поджога) возгорание в лесных и степных экосистемах.

Под торфяным пожаром понимается возгорание торфяного болота под воздействием прямого солнечного излучения или в результате небрежного обращения людей с огнем [2].

Особую опасность представляют природные пожары на территориях, загрязненных радионуклидами, когда в процесс горения вовлекаются слои почвы, зараженные опасными радиоактивными веществами. В результате пожара мелкодисперсные радиоактивные аэрозольные частицы – открытые источники ионизирующего излучения, поступают в воздушную среду, переносятся с воздушными массами на большие расстояния от места пожара и представляют опасность для населения.

Лесные пожары принято подразделять на низовые, верховые и подземные (торфяные, почвенные), а низовые, в свою очередь, – на устойчивые и беглые.

Устойчивый низовой пожар охватывает напочвенный покров, подлесок, валежник, нижние сегменты стволов деревьев и распространяется с небольшой скоростью (не более 0,5 м/мин). Беглый низовой пожар распространяется с более высокой скоростью 0,5-1 м/мин и более высоким пламенем, возникновению беглого низового пожара способствует длительная сухая и ветряная погода. Низовые пожары характеризуются высокой степенью задымления.

На следующей стадии низовой пожар переходит в верховой устойчивый, охватывая кроны деревьев, при сильной скорости ветра существует опасность возникновения беглого верхового пожара, характеризующегося скачкообразным перемещением огня по кронам деревьев, опережая фронт низового пожара. Скорость распространения пожара во время скачка огня велика – 250–400 м/мин, затем процесс замедляется до тех пор, пока низовой пожар не достигнет участка со сгоревшими кронами деревьев, а затем снова повторяется «скачок» огня. Физическая особенность верхового пожара заключается в образовании продуктов

горения и горячего воздуха, так называемых конвективных колонок, в которых высота пламени может достигать сотен метров.

Беглые верховые пожары чрезвычайно опасны, горящие фрагменты деревьев, искры, ветки переносятся на несколько сотен метров от источника, создавая новые очаги возгорания.

При верховом беглом пожаре, который возникает только при сильном ветре, огонь распространяется по кронам деревьев «скачками», опережая фронт низового пожара. Ветер также разносит горящие ветви, другие мелкие горящие объекты и искры, которые создают новые очаги низовых пожаров на сотни метров впереди основного очага. В ряде случаев огонь «перебрасывается» указанным способом через реки, широкие дороги, безлесные участки и другие кажущиеся рубежи для локализации пожара. Дым верхового пожара характеризуется выделением большого количества «черного углерода» (сажи), поэтому, как правило, окрашен в черный цвет.

Еще одной разновидностью лесных пожаров являются торфяные пожары, которые возникают вследствие низовых лесных пожаров, охватывая наземный и подземный почвенный слой, то есть распространяются вглубь. Отличительными особенностями торфяного пожара являются:

- 1) недостаток кислорода, в результате чего чаще всего происходит беспламенное горение с выделением большого количества продуктов неполного сгорания, окрашивающих дым в светло-серый цвет;
- 2) медленное распространение (до нескольких метров в сутки);
- 3) высокая длительность: торфяные пожары могут существовать в режиме тления несколько месяцев и даже лет, то есть они всесезонные;
- 4) атмосферные осадки могут повлиять на интенсивность горения только в начале пожара и при малой мощности торфяных залежей.

1.1.2 Анализ пространственно-временного распределения природных пожаров на территории Российской Федерации

По официальным статистическим данным площадь лесного фонда Российской Федерации составляет около 800 млн. га [3]. Также в России находятся одни из самых больших запасов торфа (около 170 млн. га). Торф представляет собой залежи органического происхождения – продукты неполного разложения болотных растений, образовавшиеся в условиях повышенной влажности и недостатка кислорода.

Приблизительно 12 % территории нашей страны (около 2 млн. км²) занимают болота и заболоченные земли.

Из достоверных источников известно, что ежегодно от 2 до 5 млн. гектаров площади страны охватываются природными пожарами [4, 5], включая, в том числе, лесные и нелесные площади (болота, оленьи и прочие пастбища, сенокосные угодья, кустарниковые заросли и другие), ущерб от которых достигает несколько млрд. рублей.

Особенно остро стоит эта проблема в Сибири [6, 7]. На Западно-Сибирской равнине сосредоточены крупнейшие массивы лесов и болот, которые охватывают территорию в 1 млн. км². Заболоченность доходит до 70 %, глубина торфяных залежей достигает 4-6 м, а местами – более 10 м. Это самый заболоченный район мира.

Для развития дорожной сети требовалось проводить осушение болот, что привело к уязвимости этих территорий с точки зрения опасности возникновения природных пожаров. Большая часть автомагистралей проложена через лесные массивы и бывшие болота, что представляет опасность для участников дорожного движения в условиях ЧС, возникающих в периоды горения торфяников.

Пространственно-временное распределение природных пожаров носит случайный характер. Очевидно, что распространенность природных пожаров и их продолжительность напрямую связаны с климатическими и метеорологическими факторами: высокая пожароопасность наблюдается в условиях длительной сухой

и жаркой погоды, а повторяемость засушливых периодов повсеместно неуклонно растет.

Что касается Российской Федерации, в наибольшей степени природным пожарам подвержены лесные территории Дальнего Востока и Восточной Сибири, где площади возгорания достигают нескольких млн. га. Другие регионы нашей страны, включая Западную Сибирь, Приуралье, Центральный и Северо-западный регион, также периодически подвергаются масштабным природным пожарам в периоды засушливого лета.

В отношении масштабов распространения природных пожаров в официальных источниках содержится противоречивая информация, что, главным образом, обусловлено методическими особенностями учета. Например, в официальной статистике МЧС России ведется учет только крупных природных пожаров с площадью очага более 25 га [8-14]. Кроме того, нет однозначной позиции в отношении того, стоит ли относить к природным пожарам регулируемые палы сухой травы или палы в лесозащитной полосе, а также пожары на бывших аграрных территориях.

Еще одним аспектом является необъективность оценки площади возгорания, большая часть которых определяется визуально. Проблема может быть частично решена привлечением спутниковых технологий (спутниковой фото- и видеосъемки), которые позволяют быстро обнаружить очаг природного возгорания и приблизительно оценить его масштабы. Однако известно, что густой дым, распространяющийся на многие километры от источника, будет препятствовать точной оценке площади территорий, охваченных пожарами, оптической аппаратурой, установленной на спутниках.

Так, например, площадь хорошо всем известных лесных и торфяных пожаров, охвативших в июле–августе 2010 г. всю страну, включая Центральный округ и часть Северо-Западного региона, МЧС России оценило в 1 млн. га [8], Рослесхоз в 4,19 млн. га [15, 16], Росстат в 2,27 млн. га [16]. В то же время рядом исследователей и некоторыми общественными организациями этот показатель оценивался в 6 млн. га.

Обобщенные статистические сведения о природных пожарах, публикуемые в ежегодных Государственных докладах МЧС России, приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика официальных статистических данных о природных пожарах на территории Российской Федерации по данным МЧС России [8–14].

Год	Всего природных пожаров*	Число погибших	Число пострадавших	Ущерб, млн. руб.
2010	58	9	856	н/д
2011	25	1	1	н/д
2012	77	8	13	н/д
2013	45	0	362	н/д
2014	5	0	0	873
2015	7	41	1581	1456
2016	2	0	0	0
<i>Примечания: * – в Государственных докладах МЧС России приведены сведения только для крупных природных пожаров площадью более 25 га; н/д – нет данных.</i>				

Кроме МЧС России, статистический учет природных пожаров ведется Федеральной службой государственной статистики (далее – ФСГС) и Федеральным агентством лесного хозяйства (далее – ФАЛХ). Статистическая информация размещается на портале Единой межведомственной информационно-статистической системы Российской Федерации. Данные обобщены в Таблицах 1.2-1.3.

Таблица 1.2 – Площадь лесных и нелесных земель в Российской Федерации, пострадавших от лесных пожаров (ФСГС, Форма: 5-ЛХ) [16].

Тип территорий	Площадь, га				
	2008	2009	2010	2011	2012
Нелесные	465 030	480 988	445 959	266 384	271 164
Лесные	2 069 804	211 601	2 268 734	1 408 370	2 101 184

Таблица 1.3 – Площадь земель, пострадавших от лесных пожаров (по отчетным статистическим данным ФАЛХ) [16].

Год	Российская Федерация	Сибирский федеральный округ (СФО)		Дальневосточный федеральный округ (ДФО)		Σ СФО и ДФО, %
	Площадь, га	Площадь, га	%*	Площадь, га	%*	
2014	7 804 049	4 478 307	57,4	3 261 821	41,8	99,2
2015	6 587 001	5 848 462	88,7	683 161	10,4	99,1
2016	5 218 669	2 962 794	56,8	2 102 966	40,3	97,1
2017	7 643 975	4 950 872	64,8	2 130 037	27,9	92,7
<i>Примечание: * – процент площади пожара в Федеральном округе от общей площади территорий, охваченных лесными пожарами в Российской Федерации.</i>						

Анализ статистических данных свидетельствует о том, что более 90 % природных пожаров поражают территории Сибири и Дальнего Востока. Особенно тяжелая ситуация в Восточной Сибири сложилась в 2015 г., когда около 6 млн. га было охвачено огнем (88 % от общей площади, пройденной пожарами в Российской Федерации). При этом по официальным данным [16] от 40 до 60 % возгораний случаются по причине неосторожного обращения с огнем. В целом, многолетние наблюдения показывают, что от 0,1 до 0,2 % суммарной площади лесного покрова нашей страны ежегодно выбывают из состава лесного фонда в связи с воздействием таких факторов, как лесные пожары, поражение насекомыми и болезнями растений, вырубки.

Официальная статистика по пострадавшим, погибшим и нанесенному материальному ущербу в результате пожаров, действующих в природной среде, неполная (Таблица 1.1). В Государственных докладах МЧС России [12, 13] приведены данные только за 2014 и 2015 гг., но и они отражают информацию о погибших и пострадавших непосредственно во время пожара, сведений о пострадавших и умерших в результате обострения хронических заболеваний дыхательной и кровеносно-сосудистой системы в условиях чрезвычайного воздействия продуктов горения пожаров нет.

1.1.3 Крупнейшие чрезвычайные ситуации, вызванные природными пожарами

Высокие темпы индустриализации и освоения все новых природных территорий в XX-XXI вв. привело к существенному сокращению лесного фонда планеты в указанный период [17]. Результаты анализа статистических данных свидетельствуют о том, что 40-60 % природных пожаров инициируются по вине человека и количество лесных пожаров в течение последних 50 лет многократно возросло. Особую обеспокоенность вызывают катастрофические пожары, составляющие не более 2 % всех природных пожаров. Однако они являются самыми разрушительными и оказывают чрезвычайно негативное воздействие на среду обитания и социально-экономическое развитие отдельных стран.

С июня по сентябрь 2007 г. Греция была буквально разорена лесными пожарами, в результате которых погибли 84 человека (67 человек погибли в августе) и было уничтожено 271 140 га лесного фонда и сельскохозяйственных угодий страны [18-23]. Пожарами была практически уничтожена большая часть лесных массивов острова Пелопоннес. Расследуя два крупных пожара на Пелопоннесе, греческие власти арестовали 26-летнего фермера по подозрению в поджоге. Фермер признался и был приговорен к тюремному заключению. Премьер-министр Греции Костас Караманлис высказал предположение о намеренных поджогах и на других территориях.

Утром 16 августа 2007 г. при скорости ветра 25 км/ч фронт пламени приблизился к ближайшим пригородам Афин Врилисия и Неа Пентели, окруженных преимущественно сосновыми лесами. Сочетание сухой жаркой погоды и довольно сильного ветра привело к возникновению беглого верхового пожара и, как следствие, формированию вертикальной конвективной колонки над очагом пожара. Средствам пожарной авиации не удавалось сбросить воду на очаг возгорания из-за сильного порывистого ветра. К полудню ветер усилился до 35 км/ч, и пожар достиг жилых районов (Рисунок 1.2), уничтожив несколько десятков домов и 800 га ценнейших лесов.

Последний пожар был потушен 3 сентября 2007 г.



Рисунок 1.2 – Верховой беглый пожар вблизи поселения Неа Пентели, Греция, 16 августа 2007 г. [23]

Тяжелейший по последствиям лесной пожар случился в этом же регионе в июле 2018 г., когда в прибрежных районах Аттики вспыхнула серия природных пожаров. По состоянию на 31 июля 2018 г. 92 человека были признаны погибшими, а еще 25 – пропавшими без вести. Этот пожар был признан вторым по тяжести последствий лесным пожаром, случившимся в XXI в. Первый – лесной пожар в Австралии в 2009 г., унесший жизни 180 человек.

События развивались следующим образом: 23 июля 2018 г. в 13:00 по восточноевропейскому времени западнее Афин вблизи Кинеты начался лесной пожар. Спустя несколько часов на севере Афин недалеко от Пентили вспыхнул еще один лесной пожар. Из-за очень сильных порывов ветра, достигавших в этом районе скорости 124 км/ч, скорость продвижения пожаров составила рекордные 77 миль/ч. Огнем в Кинете были уничтожены дома, а огонь в Пентели направился на восток к прибрежным поселкам Неоса, Вутсаса и Мати. Трагедия произошла в Мати. Пламя было настолько интенсивным, что огнем были заживо сожжены люди в домах, машинах, на улицах и даже в нескольких метрах от пляжа. Сотни частных домов и тысячи транспортных средств были уничтожены огнем до того, как пожар был взят под контроль.

В январе-феврале 2009 г. в Австралии установилась экстремально жаркая и сухая погода, температура воздуха достигала пиковых значений 40-45 °С [24-28]. Субботний день 7 февраля 2009 г. в этом государстве получил название «Черная

суббота лесных пожаров». В этот день на территории страны было зафиксировано не менее 400 индивидуальных пожаров, унесших в совокупности жизни 180 человек, 16 из которых погибли в результате дорожно-транспортных происшествий, случившихся по причине сильного задымления на автомагистралях. Огнем было пройдено около 450 000 га лесных и нелесных земель и уничтожено более 3 500 жилых и коммерческих строений.

Штат Калифорния в США практически каждый год испытывает большие и разрушительные природные пожары, как правило в октябре, на исходе длительного сухого периода, длящегося обычно с 15 мая по 15 октября [29-32]. Наиболее разрушительные пожары возникают в густонаселенных прибрежных районах между Сан-Диего и Сан-Франциско, которые подвержены мощным восточным ветрам: Санта-Ана (в южной Калифорнии) и Диаболо (в центральной Калифорнии). Этот феноменальный ветер устанавливается в сентябре-октябре.

Самый большой единичный пожар в современной истории Калифорнии случился в Сан-Диего в октябре 2003 г. Пожаром было пройдено 113 232 га лесных и нелесных земель, уничтожено 2 820 зданий. Тогда погибло 15 человек [29, 30].

В 2017 г. в Калифорнии был самый разрушительный сезон лесных пожаров [33]. По данным Департамента лесного хозяйства и противопожарной защиты штата, в общей сложности случилось 9 133 пожара, которыми была охвачена площадь 552 562 га, уничтожено и повреждено более 10 000 построек, что превзошло совокупные показатели за девять предыдущих лет. По официальным данным, жертвами пожара стали 43 человека.

1.2 Виды опасного воздействия природных пожаров на жизнедеятельность населения и транспортный процесс

Лесные пожары могут оказывать локальное и даже глобальное негативное влияние на качество атмосферного воздуха в результате эмиссии в окружающую среду угарного газа (CO), углекислого газа (CO₂), мелкодисперсных взвешенных частиц и продуктов неполного сгорания углеводородов.

Чрезвычайно разрушительные пожары в Индонезии в 1997–1998 гг. были специально инициированы людьми с целью высвобождения больших территорий под пальмовые плантации. По официальным данным, случаев гибели людей или уничтожения имущества непосредственно в результате действия пожара не было. Однако лесными пожарами было пройдено 9,7 млн. га леса, и они имели колоссальные негативные последствия в результате экстремально высокого загрязнения воздуха оксидом углерода и взвешенными частицами [34-39].

Зона действия пожаров 1997 г. в Калимантане и Суматре расширилась на север, достигнув Малайзии, Сингапура, Брунея и Таиланда [37-39]. В течение этого периода концентрация опаснейших взвешенных частиц в десятки раз превышала национальные стандарты качества атмосферного воздуха. Среднемесячная горизонтальная видимость в большинстве мест на Суматре и Калимантане в сентябре 1997 г. была ниже 1 км, а дневная максимальная видимость была часто ниже 100 м.

По оценкам ученых, вследствие лесных пожаров в Индонезии в 1997 г. в атмосферу поступило от 0,81 до 2,57 гигатонн CO_2 , составивших от 13 до 40 % всех выбросов углекислого газа от сжигания ископаемого топлива. Это парниковый газ.

Во всех странах, пострадавших от действия дымового смога, наблюдался рост острого ухудшения состояния здоровья населения. Негативные эффекты для здоровья включали острое проявление сердечно-сосудистых и респираторных заболеваний, таких как астма, инфекции верхних дыхательных путей, снижение функции легких, а также раздражение глаз и кожи, вызванные, главным образом, взвешенными частицами. Например, в Сингапуре имело место 30%-ое увеличение посещаемости больниц. Кроме того, влияние природных пожаров оказало негативное аддитивное действие на качество атмосферного воздуха в городах-мегаполисах в Юго-Восточной Азии.

Еще одна серьезная проблема проявилась в нарушении транспортной деятельности всех без исключения видов транспорта из-за ухудшения видимости, которое привело к значительному экономическому ущербу в Индонезии,

Малайзии и Сингапуре. По грубым оценкам Всемирного торгового фонда экономический ущерб, нанесенный Индонезии, составил более 1 млрд. долларов США, Малайзии и Сингапуру – около 0,5 млрд. долларов США.

1.2.1 Чрезвычайно опасное влияние на здоровье населения

Наибольшую опасность для здоровья людей представляют такие компоненты дыма природных пожаров, как угарный газ и мелкодисперсные взвешенные частицы.

Взвешенные частицы – это особый вид загрязнителей воздуха, не имеющий определенного химического состава, а выделяющийся в отдельную группу поллютантов по физическому признаку – аэродинамическому диаметру. В практике санитарной гигиены выделяют два типа частиц: PM_{10} и $PM_{2.5}$. Частицы PM_{10} включают частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм, а частицы $PM_{2.5}$ – частицы с аэродинамическим диаметром менее 2,5 мкм. И те, и другие относятся к респирабельным, однако более грубодисперсные (PM_{10}) задерживаются в дыхательных путях, вызывая раздражение их слизистых оболочек и провоцируя, таким образом, кашель, аллергический ринит, першение в горле. Мелкодисперсные частицы признаны токсикологами наиболее опасными из-за их способности проникать в глубокие отделы легких и, минуя защитные барьеры, в кровоток. Особенно опасно воздействие загрязнителей на восприимчивые группы населения: детей, беременных женщин, пожилых людей, людей с хроническими сердечно-сосудистыми заболеваниями и такими заболеваниями, как астма, хроническая обструктивная болезнь легких (далее – ХОБЛ).

Оксид углерода (CO) – бесцветный газ без запаха, наибольшие концентрации которого достигаются вблизи эпицентра лесного пожара и поэтому представляют серьезную угрозу здоровью пожарных. В отношении угарного газа в Российской Федерации принято несколько нормативных предельных значений концентраций вследствие его высокой токсичности: среднесуточная предельно-допустимая концентрация (далее – ПДК) – 3 мг/м³, максимальная разовая ПДК – 5

мг/м³, ПДК воздуха рабочей зоны в течение рабочего дня – 20 мг/м³, при экспозиции 1 час – 50 мг/м³, при экспозиции полчаса – 100 мг/м³, при экспозиции 15 мин – 200 мг/м³. Угарный газ хорошо растворяется в крови, вступает во взаимодействие с гемоглобином, образуя метгемоглобин, и нарушает таким образом транспорт кислорода к клеткам, органам и тканям организма. При концентрациях в диапазоне 600-800 мг/м³ он может вызывать головную боль, слабость, головокружение, при более высоких (1000-1300 мг/м³) – спутанность сознания, тошноту, дезориентацию, нарушение зрения, при концентрациях выше 5 000 мг/м³ смерть наступает в течение 2–5 мин. Однако даже при более низких концентрациях, например, при природных пожарах, люди с сердечно-сосудистыми заболеваниями могут испытывать боль в груди и сердечную аритмию [40-45]. Недавние исследования, посвященные изучению количества смертельных случаев и их причин среди пожарных в периоды ликвидации природных пожаров в 1990-2006 гг., показали, что 21,9 % смертей произошли от сердечных приступов.

Исследователями в Калифорнии были изучены обращения граждан в медицинский колл-центр в период сильнейших лесных пожаров в Сан-Диего в 2007 г. [40], которые были ранжированы по следующим видам: заявки на предоставление услуг для экстренной госпитализации, плановой госпитализации и амбулаторного наблюдения. В результате было установлено, что количество респираторных заболеваний увеличилось на 34 %, острых бронхитов – на 72 % среди всех групп населения. В группе детей в возрасте от 0 до 4 лет число обращений за экстренной помощью в связи с острыми респираторными заболеваниями выросло на 70 %, а в группе младенцев от 0 до 1 года число обращений в связи с астматическими приступами выросло на 243 %.

К аналогичным выводам пришли и австралийские ученые [41], которые изучили последствия для здоровья населения лесных пожаров 2006-2007 гг., одних из самых обширных и длительных (более двух месяцев) в истории Австралии, с высоким уровнем тонкодисперсных частиц PM_{2.5} в атмосферном воздухе. Целью исследования было изучение взаимосвязи между концентрацией

PM_{2.5} в воздухе и посещением отделения неотложной помощи для лечения астмы. В результате анализа было установлено, что в этот период было зафиксировано 2 047 случаев обращения за экстренной помощью по причине приступов астмы. Число обращений увеличивалось на 1,98 % при возрастании концентрации PM_{2.5} на каждые 10 мкг. Особенно выраженная корреляция наблюдалась среди женщин старше 20 лет – 5,08 %.

Несомненного внимания заслуживают научно-исследовательские работы, проведенные в нашей стране и посвященные изучению чрезвычайных последствий экстремально жаркого лета 2010 г. в Центральном и Северо-западном федеральных округах, от которого серьезно пострадали жители Москвы [46-53].

Волны жары в сочетании с торфяными и лесными пожарами в пригородах мегаполиса, таких как Москва, представляют значительный риск для здоровья населения, потому что негативному воздействию подвергаются сразу несколько миллионов человек. Прогнозные модели свидетельствуют о том, что в ближайшем будущем ожидается рост и увеличение длительности волн жары повсеместно, в том числе в умеренных широтах.

Как уже отмечалось выше, лесные пожары часто возникают в периоды жаркой сухой погоды, поэтому на население стрессовое действие оказывают одновременно два фактора: высокие концентрации в воздухе токсичных веществ, выделяющихся при пожаре, и непосредственно жара.

Продолжительная жара летом 2010 г. в Москве и во всем Центральном округе привела к масштабным лесным и торфяным пожарам [46, 47]. Исследование показателей смертности населения в этот период [48, 51, 52] позволило получить доказательства комбинированного действия вышеупомянутых факторов. Ежедневная смертность населения Москвы в период июля–августа 2010 г. достигла 300 случаев в день, показатель преждевременной смертности достиг 11 тысяч человек. Аналогичные закономерности наблюдались и ранее [49, 50], однако для не столь экстремальных условий.

На Рисунке 1.3 представлены суточные тренды температуры воздуха, концентрации PM_{10} в воздухе и показателя смертности в Москве летом 2010 г. [52].

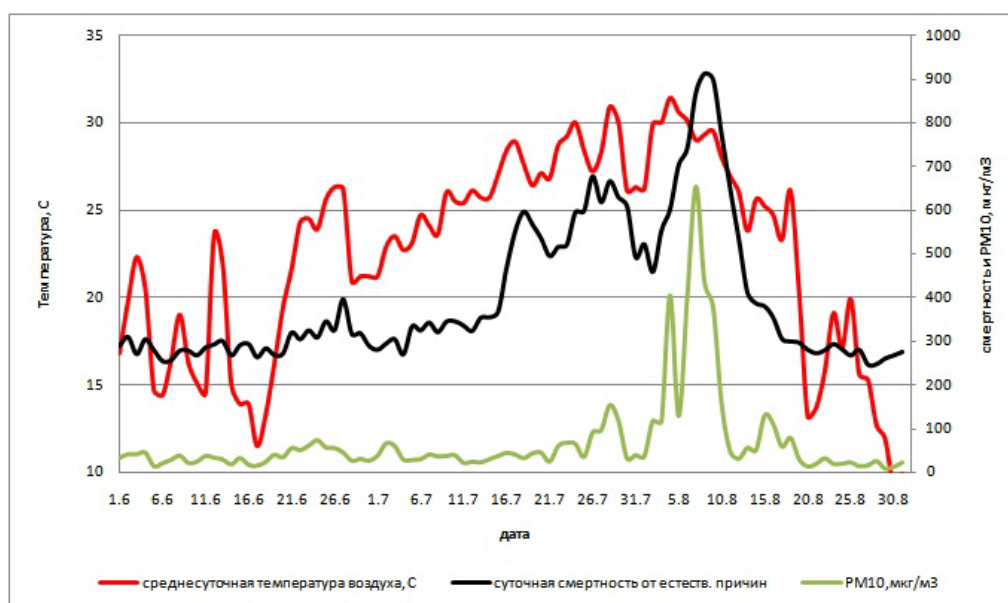


Рисунок 1.3 – Тренды температуры воздуха, содержания PM_{10} в воздухе и показателя смертности в Москве в июне–августе 2010 г. [52].

В течение многих суток в Москве температура была выше $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимально разовая концентрация PM_{10} достигала $3\,000\text{ мкг/м}^3$, превысив соответствующий нормативный показатель в 10 раз, в то же время в период наиболее острого проявления ЧС (6-10 августа) среднесуточная концентрация PM_{10} достигала 900 мкг/м^3 , превысив ПДК_{СС} в 18 раз (ПДК_{СС} составляет 50 мкг/м^3).

Рисунок 1.3 отчетливо отражает и стремительный рост показателя смертности в период с 6 по 10 августа 2010 г., превысившего в эти дни фоновое значение в три раза [52].

По грубым расчетам экономический ущерб от природных пожаров 2010 г. составил около 85,5 млрд. руб. [53].

1.2.2 Характеристика опасного воздействия лесных и торфяных пожаров на участников дорожного движения

Опасность лесных пожаров для участников дорожного движения заключается, главным образом, в негативном воздействии физических и химических факторов на психофизическое состояние и здоровье водителей и пассажиров, а также на условия движения – существенное ухудшение видимости при высоком задымлении. Рассмотрим эти факторы подробнее.

В разделе 1.2.1 уже были описаны токсические свойства наиболее опасных для здоровья людей продуктов горения природных пожаров. Высокие концентрации угарного газа, углекислого газа, мелкодисперсных взвешенных частиц, а также прочих продуктов неполного сгорания биомассы оказывают комбинированное негативное воздействие на самочувствие водителей, управляющих транспортными средствами.

Комбинированное воздействие нескольких опасных веществ приводит к возникновению таких симптомов, как головная боль, головокружение, боль в грудной клетке, слезотечение, раздражение верхних дыхательных путей, затруднение дыхания, то есть к симптомам, проявляющимся при острых респираторных и сердечно-сосудистых заболеваниях.

Автотранспортный процесс – это опасный процесс, особенно в условиях высокоскоростного движения, требующий от водителей быстрого принятия решений и хорошей реакции. Очевидно, что психофизическое состояние и самочувствие водителя является одними из ключевых факторов в обеспечении безопасности на дорогах. Воздействие химических токсикантов может привести к резкому снижению работоспособности водителей и, как следствие, к созданию аварийных ситуаций и дорожно-транспортным происшествиям (далее – ДТП) на дорогах.

То, что водители с физическими нарушениями здоровья или психическими заболеваниями имеют больше шансов быть вовлеченными в ДТП, является доказанным фактом. Многочисленные международные научные исследования подтверждают крайне негативное влияние некоторых физических и психических

заболеваний, таких как неврологические расстройства [54-56], деменция [57], инсульты [58], сахарный диабет [59], гипогликемия [60], проблемы с глазами [61], дегенерация желтого пятна [62], глаукома [63], апноэ [64], ревматоидный артрит [55, 56], артроз [65], острые сердечные приступы [66], на способность управлять транспортным средством (далее – ТС). Большинство из этих патологических состояний строго контролируются при оценке способности к вождению.

В то же время так называемые «сиюминутные», «внезапные» заболевания или недомогания, например простуда, грипп, головные боли, головокружение, усталость, сонливость, инфекции, лихорадка, расстройство желудка, стресс, мышечные боли и прием лекарств тоже негативно влияют на реакцию водителей, серьезно снижают эффективность вождения и повышают риск аварий [55, 67-70]. Испанскими учеными [71] было проведено масштабное статистическое исследование, направленное на выявление факторов, которые, по мнению самих водителей, оказывали наибольшее воздействие на их способность управлять ТС. В опросе приняли участие 1 200 испанских водителей (666 мужчин и 534 женщины). Единственными критериями отбора являлись наличие водительских прав любого типа автомобилей и частое вождение. Результаты исследования представлены на Рисунке 1.4.

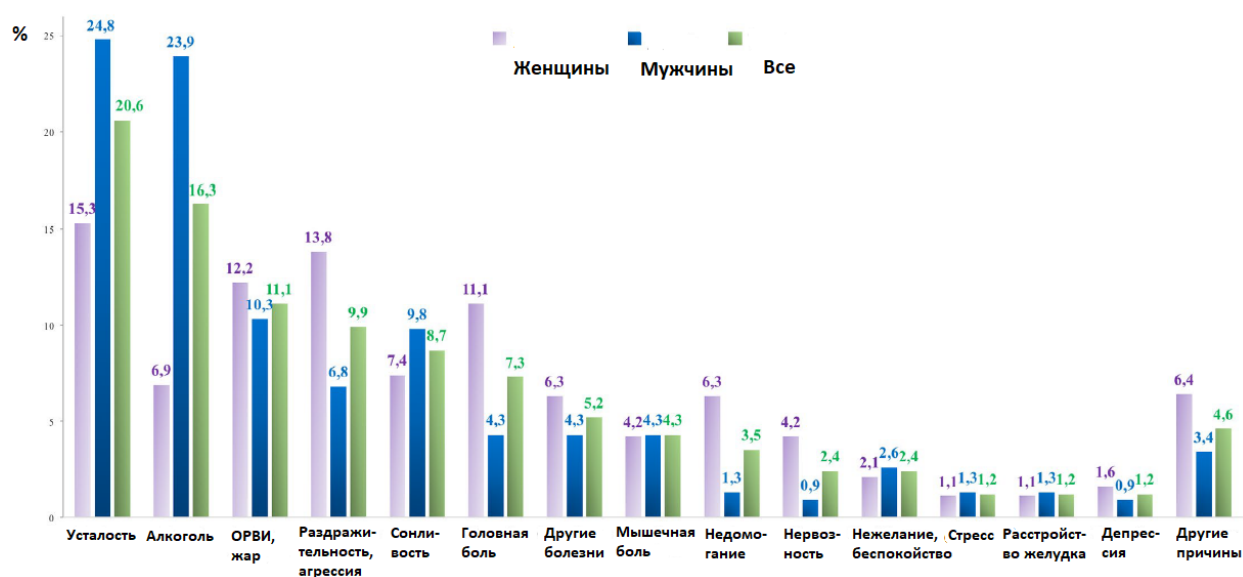


Рисунок 1.4 – Виды недомоганий и их влияние на способность управлять ТС по результатам испанских исследований [71].

На основе этого исследования можно сделать вывод о том, что усталость, алкоголь, раздражительность, сонливость, головные боли, респираторные заболевания и повышенная температура тела – самые распространенные виды недомогания, ухудшающие самочувствие водителей. Кроме того, статистический анализ выявил гендерные различия в состоянии здоровья и физической подготовке водителей мужского и женского пола.

Следует помнить, что нахождение в атмосфере с повышенным содержанием угарного газа и пониженным содержанием кислорода вызывает возникновение таких симптомов, как головокружение, головная боль, шум в ушах, нарушение координации, возможное снижение слуха и зрения. Таким образом, водитель рискует потерять контроль над своими действиями и управлением автомобилем, что увеличивает риск возникновения ДТП.

Очевидно, что еще одним негативным фактором, проявляющимся во время управления ТС в условиях задымления, является психоэмоциональное состояние водителей. Страх, паника, беспокойство, нервозность также увеличивают вероятность принятия неправильных решений и риск ДТП.

Пожалуй, самый опасный фактор лесного пожара, оказывающий негативное действие на участников дорожного движения, – это дым, резко ограничивающий видимость на дороге, что приводит не только к замедлению движения, но и существенно повышает риск ДТП, в результате которых наносится вред здоровью людей, имуществу, затрудняется движение на автомагистрали, что приводит к остановке потока в непригодной для дыхания зоне [72].

В следующем разделе приведено несколько примеров серьезных ДТП, произошедших в зонах действия лесных пожаров.

1.2.3 Примеры чрезвычайных ситуаций на автомагистралях, возникших в результате действия природных пожаров

В начале января 2008 г. на территориях между Орландо и Тампой (США), вблизи автомагистрали Interstate-4 проводились плановые палы на болотах. Внезапное падение относительной влажности воздуха, по данным отдела

лесохозяйственных расследований, привело к тому, что плановый пожар площадью 50 акров вышел из-под контроля и уничтожил еще 400 акров земли. Ранним утром 9 января в результате задымления и тумана на автомагистрали существенно уменьшилась видимость и произошла крупнейшая авария с участием 70 автомобилей, в результате которой погибли 5 человек и были ранены 38 человек.

Аэрофотосъемка, проведенная ранним утром, показала, густую пелену из тумана и дыма, простирающуюся на многие мили и придающую небу жуткий золотистый цвет. Условия видимости улучшились ближе к полудню, обнажив катастрофическую картину (Рисунок 1.5).

Примерно 20 из пострадавших ТС – тяжелые грузовики. По меньшей мере, шесть из них сгорели полностью.

Движение на автомагистрали было парализовано на несколько часов.

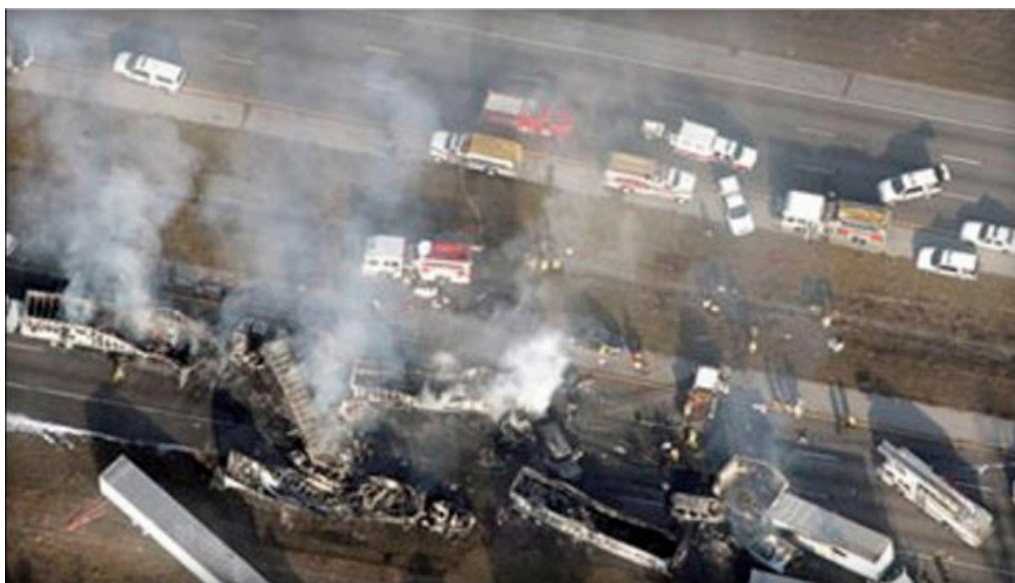


Рисунок 1.5 – Крупнейшая автодорожная катастрофа с участием 70 автомобилей, спровоцированная дымом от природного пожара и туманом (автотрасса Interstate 4, Флорида, 9 января 2008 г.)

Очень похожая трагедия разыгралась 30 января 2009 г. в Северной Флориде вблизи автомагистрали Interstate-75, когда опять же смесь тумана и дыма от природного торфяного пожара, бушующего в близлежащем государственном заповеднике Пейнс-Прери к югу от Гейнсвилля, заволокла участок дороги и

спровоцировала несколько ДТП, в результате которых погибли 11 человек и были ранены 18 человек [73, 74].

Для нашей страны эта проблема тоже актуальна, особенно, как уже упоминалось выше, для Сибири и Дальнего Востока.

Иркутская область является одним из самых заболоченных и лесных регионов России. Тысячи километров дорог проходят через лесной массив. Чрезвычайное воздействие лесных и торфяных пожаров на транспортные процессы актуально для данного региона.

Осенью 2015 г. и зимой 2016 г. в Иркутской области в течение нескольких месяцев действовал крупнейший торфяной пожар, повлекший возникновение ЧС в декабре 2015 г. на ФАД Р-255 «Сибирь». По причине высокого задымления и ограничения видимости на пятнадцатикилометровом участке автотрассы в Усольском районе был введен режим чрезвычайной ситуации. Из автомобилей формировали колонны, с водителями проводили предварительный инструктаж, колонны ТС передвигались только в сопровождении экипажей ДПС (Рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Движение автомобилей вблизи поселка Тельма на ФАД Р-255 «Сибирь» в период действия торфяного пожара 26 ноября 2015 г.

Очевидно, что для предупреждения и адекватного реагирования на такие угрозы чрезвычайного характера требуется разработка новой методики прогнозирования опасного воздействия продуктов горения природных пожаров на участников транспортного процесса, учитывающей особенности распространения

токсичных веществ и дыма от источника возгорания, метеорологические условия, характер рельефа местности, геометрические параметры источника возгорания, интенсивность движения на автомагистрали.

1.3 Анализ современных физико-математических моделей распространения продуктов горения в зоне природных пожаров

1.3.1 Математические модели природных пожаров

Учитывая важность проблемы и масштабы экономического ущерба, ежегодно наносимого природными пожарами на территории Сибири и Дальнего Востока, в Советском Союзе в 70-90-ых гг. прошлого века был выполнен целый ряд научно-исследовательских работ по моделированию лесных, степных и торфяных пожаров [79-86]. Большинство исследований было проведено в Томском государственном университете и в Институте химической физики РАН [87-89].

Был изучен зарубежный опыт [90-92] и предложены собственные математические модели природных пожаров (верховых и низовых лесных, торфяных, степных) [79-86], учитывающие фундаментальные законы физики (законы сохранения импульса и энергии) и законы химии (закон сохранения массы), а также такие параметры, как тепло- и массообмен между тропосферой и горящим природным объектом (пологом леса, степью, торфяником).

Учеными также были проведены численные и экспериментальные исследования по моделированию торфяных пожаров с учетом их специфики [80, 82, 83].

Научной школой Г.М. Гришина были разработаны упрощенные двух- и трехфронтные модели для одномерного нестационарного распространения процесса горения на торфяниках, а также проведены численные исследования закономерностей протекания физико-химических процессов горения в природных пористых средах (торфе), математически описаны механизмы возникновения и поверхностного пламенного горения торфа на границе «торф-воздух». Было показано, что в этом случае структура фронта торфяного пожара подобна

структуре фронта лесного пожара: горение – диффузионное, над пожаром образуется конвективная колонка. Однако процесс тлеющего (беспламенного) горения с распространением вглубь торфяной залежи и высвобождением большого количества угарного газа, мелкодисперсных взвешенных частиц, продуктов неполного окисления биомассы изучен недостаточно.

Несмотря на достоинство предложенных моделей, позволяющих прогнозировать развитие разного рода природных пожаров, они являются строго локальными и не позволяют оценивать массоперенос продуктов горения на удаленное расстояние.

В то же время известно, что особенностью торфяных пожаров является высокая степень задымления прилегающих территорий в радиусе нескольких десятков километров. Такие ЧС имели место в разгар торфяных пожаров в Московской, Владимирской и Тверской областях летом 2002 и 2010 гг., и ежегодно повторяются в Иркутской области.

1.3.2 Модель переноса продуктов горения на основе уравнений Навье-Стокса

Для прогнозирования распространения примесей в атмосфере в окрестности источника эмиссии широко применяются различные гидродинамические и физико-статистические модели, основанные на установлении связей между концентрационными характеристиками примесей и параметров среды, такие как Лагранжевы модели, Эйлеровы модели, Гауссовы модели и модели, базирующиеся на к-теории.

Различают модели не только по типу численного метода, положенного в их основу, но и по пространственно-временным масштабам процессов, ими описываемых. В этом аспекте выделяются:

- локальные модели, описывающие локальные процессы (масштаб: десятки-сотни метров – несколько километров (например, распространение загрязняющих веществ вблизи конкретной магистрали, источника пожара, завода), время: несколько минут);

- модели мезо-уровня (масштаб: несколько километров – десятков километров (квартал, район, город); время: от нескольких минут до нескольких часов); мезомасштабные модели ближе к локальным, поэтому зачастую в их идентификации возникает неопределенность;

- региональные модели, включая модели переноса примесей на большие расстояния (масштаб: несколько сот километров и более, время: десятки и сотни часов).

Проведенный выше анализ ЧС, вызванных природными пожарами, показал нам, что эта проблема актуальна на всех трех уровнях (локальном, мезо-уровне, глобальном). Таким образом, очевидно, что применимость той или иной модели будет определяться задачами, решаемыми в каждом конкретном случае.

Проанализируем наиболее часто используемые физико-математические модели распространения продуктов горения.

Существенный вклад в разработку и развитие моделирования крупномасштабных природных пожаров внес профессор Ю.А. Гостинцев с соратниками [87-89] из Института химической физики РАН.

Крупномасштабные открытые верховые природные пожары сопровождаются образованием высоких конвективных колонок и характеризуются высоким вертикальным подъемом газовой смеси продуктов горения, мелкодисперсного аэрозоля и дыма непосредственно над площадью пожара [87-89, 93]. Для описания вертикального переноса примесей в верхние слои тропосферы обосновано использование модели, базирующейся на уравнениях Навье-Стокса для вязкого сжимаемого и теплопроводного газа. Такая модель позволяет учитывать диффузию взвешенных частиц и влияние фазовых переходов, обусловленных наличием влаги в атмосфере, на динамику подъема и зависания конвективной колонки [87-89].

Для определения эффективных коэффициентов переноса здесь была использована алгебраическая модель турбулентности.

Метод Навье-Стокса основан на численном решении уравнения турбулентной диффузии [87-89]. За основу принята струйная модель конвекции с

допущением о подобии скорости, турбулентности и других характеристик на всех высотах, а также используется гипотеза о вовлечении влажного воздуха в конвективный процесс, который при подъеме и расширении охлаждается. Применение такого подхода представляется обоснованным, поскольку размеры аэрозолей, генерируемых при пожаре, существенно превышают характерные молекулярно-кинетические пробеги, а время их скоростной и температурной релаксации значительно меньше времени развития конвективных движений. Цилиндрическая система координат (r, z) «помещается» в центр пожара на подстилающей поверхности. Тогда восходящие конвективные потоки продуктов горения при крупном пожаре можно описать с использованием следующей системы уравнений Навье-Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} + \frac{\partial(\rho r u)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} = 0, \quad (1.1)$$

$$\frac{D(\rho u)}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \tau_{rr})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_r}{\partial z} - \frac{2}{R_e} \cdot \frac{u}{r^2}, \quad (1.2)$$

$$\frac{D(\rho v)}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r \tau_{rz})}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} - \frac{g R_0}{u_0^2} \cdot (\rho - \rho_0), \quad (1.3)$$

$$\frac{D(\rho T)}{Dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r q_r)}{\partial r} + r \frac{\partial q_z}{\partial z} - \frac{(\gamma-1)u_0^2}{RT_0} \cdot \left(P + \frac{P_a}{\rho_0 u_0^2} \right) \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r u)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] + \gamma(I_1 + I_2) \quad (1.4)$$

$$\frac{D(\rho \varphi)}{Dt} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(r k_r)}{\partial r} + \frac{\partial k_z}{\partial z} + m_\varphi, (\varphi = \{C, F\}), \quad (1.5)$$

$$\rho = \frac{1}{T_v} \left(\frac{u_0^2}{RT_0} P + P_a \right), \quad (1.6)$$

$$\tau_{rr} = \frac{2}{Re} \cdot \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (1.7)$$

$$\tau_{rz} = \frac{1}{Re} \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} \right), \quad (1.8)$$

$$\tau_{zz} = \frac{2}{Re} \cdot \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (1.9)$$

$$q_r = \frac{1}{Re Pr} \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (1.10)$$

$$q_z = \frac{1}{Re Pr} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1.11)$$

$$k_r = \frac{1}{Re Sc} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad (1.12)$$

$$k_z = \frac{1}{Re Sc} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \quad (1.13)$$

$$I_i = \frac{\overline{Q}_i R_0}{c_{p0} \rho_0 T_0 u_0}, \quad (1.14)$$

$$m_\varphi = \frac{\overline{S}_\varphi R_0}{\rho_0 u_0}, \quad (1.15)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{IP}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial lru}{\partial r} + \frac{\partial lv}{\partial z}, \quad (1.16)$$

где t – время; u, v – радиальная и вертикальная составляющие скорости соответственно; c_{p0} – теплоемкость при постоянном давлении; γ – показатель адиабаты; R – универсальная газовая постоянная; i – массовая концентрация аэрозоля; g – ускорение свободного падения; Re, Pr, Sc – числа Рейнольдса, Прандтля и Шмидта соответственно.

Значение виртуальной температуры T_v согласно [87–89] равно:

$$T_v = T(1 + 0,6078F), \quad (1.17)$$

где: T – истинная температура, $^{\circ}\text{C}$; F – удельная влажность, г/кг; 0,6078 – численный коэффициент.

Виртуальная температура T_v – это расчетная температура сухого воздуха $^{\circ}\text{C}$, при которой его плотность равна плотности влажного воздуха. В задачах статики атмосферы действительный воздух заменяется сухим воздухом той же плотности, что приводит к упрощению барометрических формул.

Несомненным достоинством предложенной модели является учет влияния влажности и температурной стратификации атмосферы на пространственно-временные характеристики распространения продуктов горения в атмосфере. Сравнение расчетных данных с результатами экспериментальных исследований и данными, полученными другими расчетными методами, показали удовлетворительную сходимость [87–89].

При помощи данной модели был решен ряд численных задач практического и теоретического характера: исследование переноса конвективной колонки, анализ влияния мощности тепловыделения, площади пожара и влажности атмосферы на ее загрязнение, исследование структурных особенностей образования аэрозольных облаков над крупными пожарами.

Данная модель может быть использована для моделирования выноса и распространения продуктов горения в атмосфере при крупных лесных пожарах, но не подходит для моделирования переноса продуктов горения при торфяном пожаре, характеризующемся другими физико-химическими параметрами. При торфяном пожаре отсутствует открытое пламя, поэтому продукты горения имеют относительно низкую температуру и, следовательно, не образуется явно выраженной конвективной колонки. Для решения задачи прогнозирования распространения дыма и продуктов горения от торфяного пожара более обосновано применение так называемых к-моделей и гауссовых моделей.

1.3.3 Модели распространения примесей в воздухе на основе К-теории

Наибольшее распространение в нашей стране получили модели, основанные на описании адвективного (диффузионного) и конвективного (турбулентного) массопереноса примеси в воздушной среде с построением полей ее концентраций на малых и средних расстояниях от источника [94-96]. Эти модели, базирующиеся на уравнении турбулентной диффузии, получили название градиентных моделей или к-моделей.

В Советском Союзе, а затем в России наибольшее распространение получила модель, разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А.В. Воейкова под руководством профессора М.Е. Берлянда [94-96].

В соответствии с этим методическим подходом загрязнение воздуха вредными веществами, поступающими из непрерывно действующих источников, оценивается для неблагоприятных метеорологических условий по наибольшему рассчитанному значению разовой приземной концентрации (C_m), формирующейся при опасной скорости ветра (U_m) на некотором расстоянии (X_m) от места эмиссии. Алгоритм и порядок проведения расчетов подробно описаны в «Методике расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86» [97] и пришедшем ей на смену документе «Методы расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» [98].

Распространение примесных компонентов в воздухе, согласно данной модели, описывается с помощью уравнений турбулентной диффузии. Затем, посредством усреднения осуществляется переход от мгновенных концентраций к усредненным [94]. В общем виде, изменение средних значений концентраций C описывается уравнением:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = S + \frac{\partial}{\partial x} K_x \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (1.18)$$

где x и y – оси, расположенные в горизонтальной плоскости; z – ось по вертикали; t – время; u , v , w – составляющие средней скорости перемещения загрязнителей вдоль осей x , y , z ; k_x , k_y , k_z – горизонтальные и вертикальная составляющие коэффициента обмена; S – параметр, учитывающий изменение объемной концентрации поллютанта за счет химического метаболизма в атмосфере.

Модели на основе уравнений турбулентной диффузии позволяют на единой основе решить множество задач с учетом метеорологических условий, рельефа местности, времени осреднения, химической эволюции примесей в воздушной среде, при необходимости – геометрических параметров прилегающей застройки для разных типов источников точечного (труба завода), линейного (автомагистраль), площадного (чаще всего – совокупности точечных источников, расположенных на определенной территории известной площади) и т.д.

Главная трудность при использовании данной модели заключается в том, что отсутствует единая теория диффузии, на основе которой можно было бы получить коэффициенты диффузии (коэффициенты обмена), которые преимущественно определялись бы на основе обработки обширных эмпирических данных.

Модель М.Е. Берлянда не позволяет произвести численное исследование образования и свойства конвективной колонки, возникающей при открытом природном пожаре. Возможно лишь рассмотрение процесса переноса вредных продуктов, которые находятся в стадии зависания в верхнем слое конвективной колонки, стилизуя выброс продуктов горения от такого рода пожара в виде источника промышленных выбросов, что является непростой задачей. Иными

словами, численное моделирование с помощью К-теории процесса переноса продуктов горения, выделяемых при пожаре, возможно лишь при так называемом «приравнении» физических параметров продуктов горения в конвективной колонке к параметрам вредных примесей, выделяемых из очага пожара, что возможно при достижении определенной высоты. При этом также необходимо уточнение и введение некоторых дополнительных коэффициентов.

Можно сделать вывод, что расчет процесса переноса при помощи модели М.Е. Берлянда можно производить для недостаточно мощных, небольших очагов пожаров, так как она не рассчитана на сильный перегрев газов в зоне источника и наличие турбулентного перемешивания. Доказательством справедливости теоретических обоснований модели служит многолетний положительный опыт ее использования, в том числе в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России, для прогнозирования загрязнения воздуха вблизи автомагистралей (по своей сути, автотранспортные потоки являются низкими холодными неорганизованными источниками выброса вредных веществ) [99-111] и для моделирования распространения особо опасных химических веществ в результате аварийных выбросов в условиях ЧС [112-114].

С помощью данной теории можно производить расчеты переноса вредных веществ при торфяных пожарах. Однако, при моделировании крупных мега-переносов облака смога, создаваемого торфяным пожаром, на значительные расстояния, становится несущественным учет не только молекулярной, но и глобулярной (турбулентной) диффузии. Кроме того, возможно решение практических задач при возникновении над подстилающей поверхностью торфяника пламенного (огневого) горения и прогнозирования переносов в атмосфере вблизи автомагистрали изначально относительно горячих продуктов горения.

1.3.4 Модели Гауссова рассеивания

В практике моделирования распространения примесей от источников большое применение нашли модели, базирующиеся на Гауссовом распределении.

Атмосферные процессы переноса и распространения примеси стилизуются в виде шлейфа, напоминающего профиль Гауссовой дисперсии (Рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Распространение дымового смога от лесных пожаров в южной Греции 25 августа 2007 г. [115]

Перенос веществ над подстилающей поверхностью определяется направлением ветра, а вертикальная дисперсия происходит согласно Гауссовому распределению. Первоначально эти модели были разработаны для промышленных источников выбросов и автотранспорта, но также нашли свое применение для моделирования пространственно-временного переноса примесей от природных пожаров [115-119]. Наиболее известными из них являются VSMOKE [116, 117] и SASEM [118]. Эти модели опираются на Гауссову теорию дисперсии поллютантов в атмосфере, разработанную Тернером. На Рисунке 1.8 визуализированы результаты расчетного прогнозирования распространения дыма от лесного пожара в Греции с помощью программы VSMOKE [115].

Наиболее плотный дым и, соответственно, концентрации опасных веществ находятся вблизи очага пожара (темно-бордовый цвет). VSMOKE довольно активно используется лесохозяйственными службами на юго-востоке США, поскольку позволяет легко и быстро получить прогнозы распространения дыма, если известны характеристики пожара (при плановых пожарах), погодных условий (скорости и интенсивности ветра, устойчивости атмосферы).

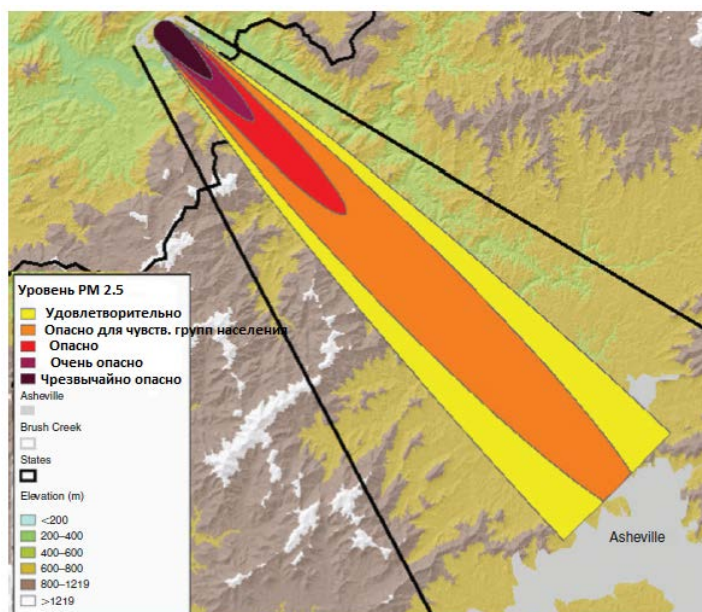


Рисунок 1.8 – Моделирование с использованием гауссовой модели VSMOKE распространения дымы в Восточном Теннесси (Греция), 18 марта 2006 г.

SASEM (*Simple Approach Smoke Estimation Model* – в переводе с англ. «Простая модель для оценки дыма») является еще одним примером Гауссовой модели, предназначенной для прогнозирования небольших лесных пожаров на пологой местности на западе США.

Модель SASEM способна прогнозировать выбросы взвешенных частиц на уровне земли и ухудшение видимости в результате одиночных пожаров. Как и модель VSMOKE, модель SASEM предназначена для скрининговых прогнозов, поскольку построена на упрощенных предположениях о невозмущенном состоянии атмосферы.

В отечественных источниках также есть работы, посвященные исследованию переноса и распространения опасных продуктов в атмосфере в результате природного пожара, например, работа [120], в которой описаны результаты численного исследования загрязнения окружающей среды радионуклидами, высвободившимися при низовых пожарах в Брянской области, которые показали удовлетворительную согласованность с экспериментальными исследованиями.

Теоретически модели этого типа разрабатываются на основе уравнения двойной дисперсии Гаусса, параметры для которого устанавливаются экспериментально-численными методами.

Для нахождения концентрации примеси в некоторой точке с координатами (x, y, z) при некоторой средней скорости ветра, уравнение примет вид:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_x U} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right], \quad (1.19)$$

где: $C(x, y, z)$ – концентрация примеси в рассматриваемой точке с координатами (x, y, z) ; Q – интенсивность непрерывного выброса в атмосферу вредного вещества, г/м²с; σ_y, σ_x – распределение отклонения примеси в шлейфе в направлении y и z , зависящие от расстояния x до источника; U – скорость ветра, м/с.

Предполагается, что ось x ориентирована по направлению ветра. Ось y расположена перпендикулярно направлению ветра по горизонтали, а ось z – по вертикали. Параметры σ_y и σ_x представляют собой стандартные отклонения распределений концентраций в точке x соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях, перпендикулярно направлению ветра. Полная система координат приведена на Рисунке 1.9.

В уравнении (1.19) предполагается шлейф с осью в виде прямой линии по направлению ветра, который не учитывает его пространственно-временные изменения. Уравнение (1.19) можно также использовать и для отличной от прямой линии траектории шлейфа при условии, что ее кривизна не слишком велика.

Параметры σ_y и σ_x в уравнении (1.19) увеличиваются с расстоянием x . Скорость их увеличения с расстоянием зависит от интенсивности турбулентности и стабильности атмосферы. Для практического использования зависимость σ_y и σ_x от расстояния были определены на основании экспериментальных и теоретических исследований при различных рельефах местности.

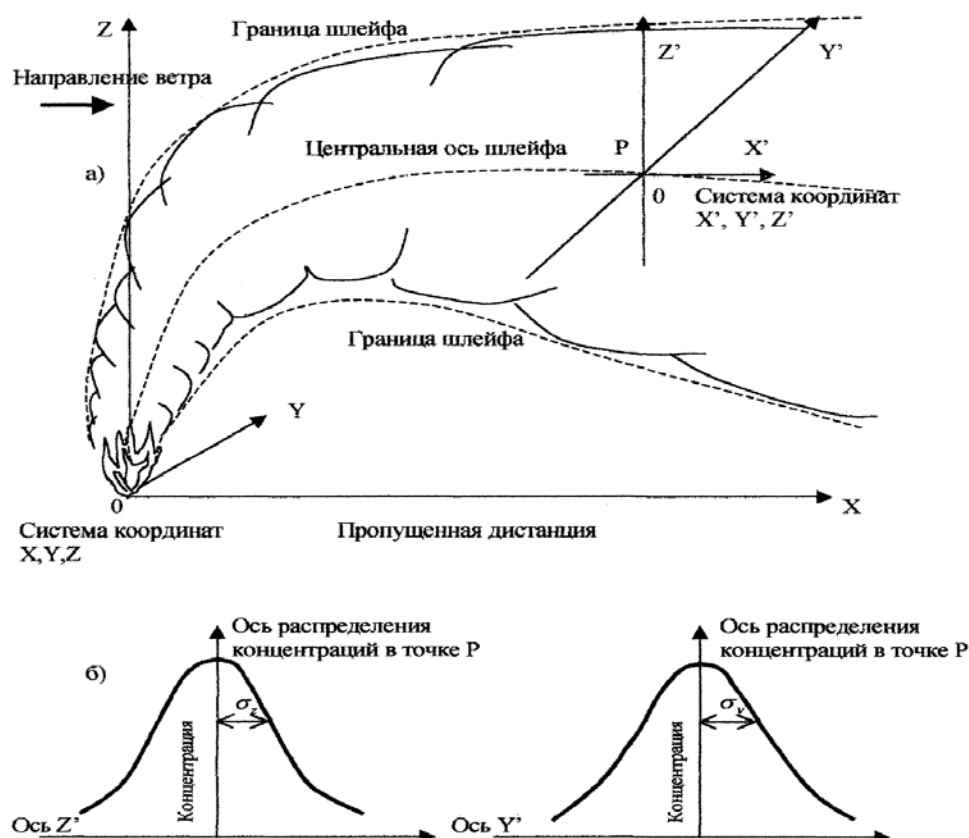


Рисунок 1.9 – Схематичное изображение: а) распространение дыма от пожара в декартовой системе координат; б) параметры дисперсии шлейфа σ_x и σ_y

Достоинствами Гауссовой модели, благодаря которым она широко применяется при расчетном мониторинге и прогнозировании загрязнения атмосферного воздуха, являются:

1. Поле концентрации от одного или нескольких источников выбросов описывается алгебраическим соотношением, благодаря чему машинные реализации этой модели отличаются высоким быстродействием и не требуют больших объемов памяти.

2. Гауссово приближение рассеивания позволяет учитывать множество факторов, влияющих на уровни концентраций примесей в приземной атмосфере, но при этом не требуют подробных метеорологических данных и очень полезны, когда метеорологическая информация скудна.

3. Результаты расчетов по модели и многочисленные экспериментальные наблюдения, выполненные исследовательскими коллективами, показали хорошее соответствие между собой.

Однако применимость Гауссовых моделей для моделирования транспорта примесей серьезно ограничена по следующим причинам:

1. Модель не позволяет учитывать высокий начальный подъем продуктов горения в результате вертикального конвективного переноса. На основе наблюдений за плановыми пожарами на юго-востоке Соединенных Штатов [115] было установлено, что не более чем в 40 % пожаров допускается не учитывать начальный подъем продуктов горения, в остальных случаях велика вероятность подъема выше пограничного слоя (при развитии верховых пожаров). В этом случае прогнозные значения концентраций у земной поверхности будут сильно завышены относительно реального положения дел.

2. Базовый принцип Гауссовых моделей – допущение о невозмущенном состоянии атмосферы. Гауссовы модели предполагают, что дым движется по прямой в стационарных однородных условиях. Области изменяющихся погодных условий, таких как сближение и прохождение через фронт циклона, морские бризы, горные и долинны ветры в сложной местности, серьезно влияют на результаты моделирования и могут снижать их надежность.

3. Гауссовы модели имеют ограничения по минимальной ветровой нагрузке.

Вполне очевидно, что применение данных моделей может быть оправдано при моделировании переноса продуктов горения от торфяного пожара.

1.4 Анализ современных методических подходов для прогнозирования снижения дальности видимости в зоне действия природных пожаров

Дальность видимости (далее – ДВ) является одной из основных характеристик прозрачности воздуха у земной поверхности и возможности человеческого зрения различать удаленные объекты. Этот показатель является критическим фактором для всех видов транспортных процессов: автодорожного, авиационного (особенно на взлетно-посадочной полосе), речного и морского. В связи с этим, в отечественной и зарубежной научной литературе большое внимание уделялось и уделяется теоретическому и экспериментальному изучению характеристик, от которых зависит ДВ при интенсивном аэрозольном

загрязнении воздуха, а также количественной оценке ДВ в различных метеорологических условиях, особенно в условиях тумана, мглы и смога [121-136].

На дорогах существенное локальное снижение ДВ может отмечаться при задымлении в результате действующих неподалеку природных пожаров.

Рассмотренные выше модели относятся к моделям регионального масштаба. Однако, и на это обратили внимание американские специалисты [115, 131], с точки зрения чрезвычайного воздействия с угрозой гибели людей и серьезного ущерба здоровью, экстремальную опасность представляют локальные ЧС, связанные с образованием в вечернее и ночное время (в периоды температурных инверсий атмосферы) в приземном слое воздуха так называемого «суперсмога» (смеси дыма и радиационного тумана), который буквально стелется по земле, опасные продукты горения распространяются на уровне дыхания людей, видимость, в том числе видимость на автодорогах, практически нулевая. ЧС, которые случались в России и США по причине этого явления, подробно описаны в разделе 1.2.3.

Проблема прогнозирования «суперсмога» состоит из двух основных задач. Первая – это прогнозирование распространения и переноса продуктов горения с дымом. Вторая – это прогнозирование образования «суперсмога», то есть метеорологических условий (критической температуры воздуха), при которой происходит резкое формирование «суперсмога». Все действующие модели построены на уравнениях тепло- и влагообмена.

Такая модель была разработана для юго-восточных штатов США – модель «РВ-Piemont» [115, 131]. Модель может быть использована для прогнозирования или мониторинга приземного переноса дыма ночью в сложных метеорологических и рельефных (горно-долинных) условиях, характерных для большинства восточных штатов США.

Результаты моделирования перемещения дыма от планового пожара, проведенного в Национальном заповеднике дикой природы Пьемонта в Центральной Джорджии показаны на Рисунке 1.10.

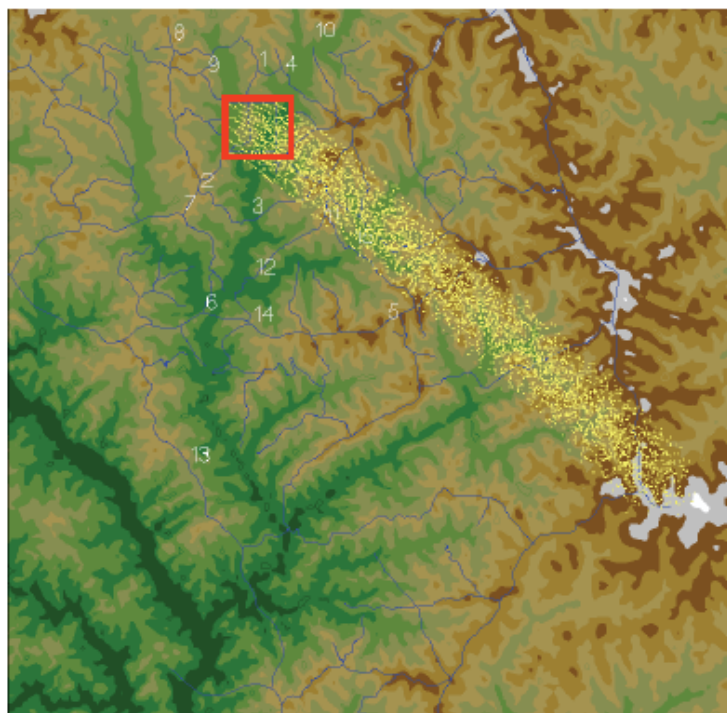


Рисунок 1.10 – Визуализация расчетного прогнозирования смога от планового природного пожара на 15 января 2003 г., полученная для Национального заповедника дикой природы Пьемонта, масштаб карты – 12,6х12,6 км [131].

На основании сопоставления результатов моделирования с данными полевых наблюдений противопожарных бригад, было установлено, что правильность прогнозирования составила 77 %.

Kunkel [132] и Kokkola с соавторами [133] показали, что сильное загрязнение воздуха может способствовать образованию плотных туманов, состоящих из большого количества относительно мелких капель воды.

Уменьшение видимости происходит по двум причинам:

- 1) за счет увеличения количества мелкодисперсных взвешенных частиц, что увеличивает коэффициент экстинкции для данного содержания жидкой воды;
- 2) за счет уменьшения размера капель воды, что сводит к минимуму конденсацию воды в виде росы.

Естественные туманы редко достигают уровня влагонасыщения, достаточного для формирования «суперсмога». Из уравнения материального баланса хорошо известно, что вода, как углекислый и угарный газ, является

продуктом горения. Пары воды, образующиеся при пожаре, особенно, в режиме тлеющего горения, могут вносить существенный вклад в образование «суперсмога». Achtemeier [131] показал, что поверхностные слои воздуха над медленно тлеющим источником горения удерживают до 10 раз больше влаги на единицу массы воздуха, чем при развитии пламенного горения. Если влагонасыщение атмосферного воздуха велико, то при некоторой критичной температуре дым и туман формируют приземный «суперсмог», ограничивающий видимость до метра.

Проблема взаимодействия атмосферных загрязнений с туманами изучалась и в нашей стране [134-136]. Взаимное влияние туманов и мелкодисперсных аэрозолей – довольно сложный для физико-математического моделирования процесс. При туманах нередко имеют место специфические метеорологические условия, способствующие концентрированию опасных аэрозолей и других загрязнений в приземном слое. Как уже отмечалось выше, с одной стороны, мелкодисперсные аэрозоли изменяют микрофизические характеристики капель воды в тумане – вызывают уменьшение размера (радиуса) капель и, как следствие, увеличение их числа (концентрации) в единице объема, а с другой стороны, конденсация влаги на частицах способствует их укрупнению и смещению к подстилающей поверхности. Берлянд, Оникул и Канчан [134-136] провели численные исследования диффузии загрязнителей в речном и радиационном тумане и установили, что капли воды в тумане адсорбируют не только загрязнители, которые были в приземном воздухе до его начала, но и примеси из вышележащих слоев, что приводит к увеличению уровня загрязнения воздуха над поверхностью.

Из приведенной информации следует, что задача прогнозирования снижения дальности видимости в жизнедеятельном слое атмосферы имеет важное значение для моделирования чрезвычайно опасного воздействия лесных пожаров на безопасность дорожного движения.

1.5 Правила регулирования дорожного движения в условиях ограниченной видимости

Условия видимости – первостепенный фактор, определяющий характеристики дорожного процесса: скоростной режим, расстояния между автомобилями, выполнение различных маневров на дороге.

Управление автотранспортным средством при недостаточной видимости, вызванной туманом, мглой или дымом, крайне опасно, потому что в этих случаях:

- резко ограничивается зона видимости;
- проявляются эффекты обмана зрения – объекты (пешеходы, препятствия на дороге, другие ТС) могут казаться дальше и меньше, чем они есть на самом деле;
- не видны дорожные знаки и разметка;
- искажается зрительное восприятие цветов и размеров объектов;
- теряются ориентиры в пространстве;
- водители находятся в состоянии высокого психоэмоционального напряжения.

Такие условия создают высокий риск аварийности на дорогах.

В действующих Правилах дорожного движения Российской Федерации, дано определение понятия «недостаточная видимость»: «Недостаточная видимость – видимость дороги менее 300 метров в условиях тумана, дождя, снегопада и тому подобное», то есть это такие условия, при которых на расстоянии 300 м невозможно четко различить цвет и форму ТС, увидеть пешехода, препятствия, дорожные знаки.

Недостаточная видимость на дороге требует от водителей, дорожных служб и патрульно-постовых служб ГИБДД принятия адекватных мер для обеспечения максимальной безопасности с целью минимизации риска ДТП. Одним из эффективных инструментов для водителей признано ограничение скорости движения до значений, обеспечивающих гарантированную остановку ТС в случае возникновения внезапной опасности. Рекомендации по соблюдению скоростного режима в условиях ограниченной видимости изложены в Строительных правилах

СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменением № 1)» – Приложение Б.

При возникновении природных пожаров вблизи автомагистралей могут создаваться условия высокого задымления, приводящие к уменьшению дальности и качества видимости на дорогах и увеличивающие таким образом риск возникновения дорожно-транспортных происшествий. Приведенная в Приложении Б таблица может служить ориентиром при принятии решений о регулировании движения ТС на автомобильных дорогах, находящихся в зоне задымления от природного пожара, с целью минимизации аварийности.

Выводы по первой главе

1. Проблема природных пожаров чрезвычайно актуальна. 40–60 % из них возникают по вине человека. Количество лесных пожаров в течение последних 50 лет многократно возросло в Российской Федерации и в мире.

Россия обладает одним из самых крупных лесных фондов (около 800 млн. га) и запасов торфа (около 170 млн. га). По официальным данным ежегодно от 2 до 5 млн. гектаров природных территорий страны охватываются пожарами, наносящими огромный материальный и экономический ущерб стране. Особенно остро эта проблема стоит в Сибири и на Дальнем Востоке. Чрезвычайно тяжелая ситуация сложилась в Восточной Сибири в 2015 г., когда около 6 млн. гектаров было охвачено огнем (88 % от общей площади, пройденной пожарами в Российской Федерации).

2. Особую опасность представляют природные пожары, развивающиеся вблизи населенных пунктов и автомобильных магистралей.

Тяжелейшие по последствиям лесные пожары бушевали в Австралии в феврале 2009 г., в общей сложности погибли 180 человек, 16 из них – в результате ДТП, случившихся вследствие сильного задымления на автомагистралях. 9 января 2008 г. в США по причине задымления от природного пожара и тумана на автомагистрали Interstate-4 существенно уменьшилась видимость, и произошла крупнейшая авария с участием 70 автомобилей, в результате которой погибли 5 и

были ранены 38 человек. Похожая трагедия разыгралась 30 января 2009 г. в Северной Флориде вблизи автомагистрали Interstate-75, когда смог (смесь тумана и дыма от природного торфяного пожара) спровоцировал несколько ДТП, в результате которых погибли 11 и были ранены 18 человек.

На территории Российской Федерации также имели место дорожные ЧС, вызванные природными пожарами. Осенью 2015 г. и зимой 2016 г. в Иркутской области в течение нескольких месяцев действовал крупнейший торфяной пожар, повлекший возникновение ЧС (транспортного коллапса) в декабре 2015 г. на ФАД Р-255 «Сибирь». По причине высокого задымления и ограничения видимости на пятнадцатикилометровом участке автотрассы в Усольском районе был введен режим ЧС. Благодаря своевременным организационным мерам, удалось избежать серьезных аварий с гибелью и ранением людей.

3. Опасное действие продуктов горения природных пожаров на условия и участников транспортного процесса заключается, во-первых, в негативном воздействии на самочувствие и психоэмоциональное состояние водителей и пассажиров, а, во-вторых, в существенном ограничении видимости, что в совокупности повышает риск возникновения ДТП, а при неблагоприятных метеорологических условиях приводит к серьезным авариям.

Опасное воздействие продуктов горения природных пожаров на здоровье людей связано, в первую очередь, с угарным газом и мелкодисперсными взвешенными частицами, высокие концентрации которых оказывают комбинированное негативное влияние на самочувствие участников дорожного движения, проявляющееся в возникновении таких симптомов, как головная боль, головокружение, боль в грудной клетке, слезотечение, раздражение верхних дыхательных путей, затрудненное дыхание.

Наиболее опасным фактором воздействия природных пожаров на транспортный процесс следует признать ограничение видимости в результате задымления, которое не только приводит к замедлению движения транспортных потоков или их остановке, что вызывает транспортные коллапсы, но и существенно повышает риск ДТП.

Особую опасность представляют ситуации комбинированного действия дыма и тумана в условиях температурной инверсии атмосферы, взаимное синергетическое влияние которых проявляется в образовании приземного смога, состоящего из большого количества мелкодисперсных капель воды и взвешенных частиц. В такой ЧС формируются условия нулевой видимости (менее 3 м).

4. Анализ проблемы показал, что в нашей стране и за рубежом разрабатывались модели развития природных пожаров. Большинство разработанных в Российской Федерации моделей являются локальными и ориентированы на прогнозирование поверхностных природных пожаров с открытым пламенем и сопровождающихся образованием конвективной колонки над очагом.

Для прогнозирования процессов переноса примесных компонентов в атмосфере в России наибольшее распространение получили к-модели.

За рубежом активно разрабатывались модели регионального масштаба. Для этих целей использовались широко апробированные в практике прогнозирования распространения примесей в воздушной среде модели Гауссова, Лагранжева и Эйлера типа.

5. Особенности торфяного пожара, как источника создания ЧС на автомобильных дорогах, находящихся в зоне задымления, являются:

1) тлеющий режим горения без открытого огня при недостатке кислорода с обильным выделением угарного газа (СО) и опасных канцерогенных взвешенных частиц (в том числе $PM_{2.5}$ и PM_{10});

2) относительно низкая температура продуктов горения по сравнению с пламенными природными пожарами;

3) высокая длительность торфяных пожаров (такие пожары могут действовать в течение нескольких месяцев и даже в зимний период);

4) высокая опасность формирования густого смога в сочетании с туманом при неблагоприятных метеорологических условиях.

6. Проведенный анализ показал, что методическое обеспечение расчетного прогнозирования таких специфических ЧС сдерживается недостаточной

изученностью физических механизмов выброса и распространения в атмосфере опасных продуктов горения торфяного пожара, невозможностью проведения инструментальных измерений на горящих торфяниках из-за опасности провала, отсутствием расчетных методик для прогнозирования негативного воздействия компонентов дыма на условия и участников дорожного движения. Это не позволяет прогнозировать, объективно оценивать, а, следовательно, и адекватно реагировать на дорожные ЧС в окрестности горящих торфяников.

7. Выполненный анализ и сформулированные на его основе выводы послужили основанием для определения цели и задач диссертационного исследования, которые изложены во введении.

2. Объект и методы исследования. Структура диссертационного исследования

2.1 Общая характеристика торфяного пожара как объекта исследования

На Западно-Сибирской равнине сосредоточены крупнейшие массивы лесов, болот и торфяников, которые охватывают территорию в 1 млн. км². Заболоченность доходит до 70 %, мощность торфяной залежи достигает 4-6 м, а местами 10 м и более. Заболоченные земли периодически становятся очагами масштабных пожаров, причиняющих существенный ущерб природе и населению. С интенсивным развитием дорожной сети в Сибири многие болота осушались, что сделало торфяные залежи потенциальным источником крупных пожаров. Большая часть дорог и прилегающих населенных пунктов расположены в лесных массивах и на заболоченных территориях, что представляет скрытую пожарную опасность для участников дорожного движения и населения.

Горение торфа происходит под землей без открытого огня при недостатке кислорода с обильным выделением угарного газа (СО). Если торфяной пожар развивается в окрестности автомагистрали, то смог уменьшает видимость, его токсичные компоненты оказывают негативное влияние на самочувствие водителей и пассажиров, что в целом приводит к повышению риска возникновения ДТП и даже к ЧС – транспортному коллапсу.

Такая ЧС сложилась в Иркутской области Российской Федерации при длительном горении торфа вблизи автомагистрали «Сибирь», продолжавшемся осень-зимой 2015-2016 гг.

2.1.1 Химические и структурные особенности торфа как лесного горючего материала

Торф является лесным горючим материалом – биотопливом, формирующимся в результате неполного разложения болотных растительных остатков в условиях избыточного увлажнения и недостаточной аэрации [137-141].

Он представляет собой сложную гетерогенную многокомпонентную систему переменного состава, включающую органические, минеральные вещества и воду. С геологической точки зрения различают низинный, переходный и верховой типы торфов, которые характеризуются разными физико-химическими показателями, а именно, составом образующих веществ, зольностью, теплотворностью, степенью разложения, степенью увлажнения. В Иркутской области преобладают низинные виды торфа [137-141]. Содержание в нем гидрофобных компонентов (битумов) – низкое (менее 5 %), гуминовых кислот – относительно высокое (более 35 %), фульвокислот – низкое (менее 16 %), полиэлектролитов – высокое (более 50 %), минеральных веществ – высокое ($\text{CaO} > 30 \%$, $\text{SiO}_2 > 15 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 < 15 \%$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 15 \%$). Этот тип торфа характеризуется высокой степенью зольности (> 10) и высокой степенью разложения ($30 < \text{Ddp} < 50 \%$), средней влажностью, средней теплотворностью. Очевидно, что физико-химические параметры торфа обуславливают качественно-количественный состав продуктов горения торфа.

Эти территории характеризуются смешанным поверхностным и грунтовым заболачиванием, которому способствует сезонно-многолетняя мерзлота, играющая роль водоупорного горизонта и выступающая препятствием на пути инфильтрации избыточных вод. Для торфяных залежей характерна относительно невысокая плотность вещества. Зольность поверхностных слоев составляет 9–26 %, для водной почвенной вытяжки характерна слабокислая реакция среды, почвы не засолены, по анионному составу преобладают хлориды и сульфаты, по катионному – магний и кальций [137].

В Иркутской области многие болотные почвы были осушены [137]. Торфяные низинные освоенные почвы заметно отличаются от целинных по температурному и водно-воздушному режиму. Во-первых, им свойственны более высокие средние температуры – мерзлые слои присутствуют только в течение нескольких месяцев (6–8), а в целинных – несколько лет. Во-вторых, осушение приводит к резкому уменьшению влажности и увеличению воздухоемкости почв,

что, в условиях засухи, способствует развитию напряженной пожароопасной обстановки.

Микроклиматической особенностью низинных торфяных болотных территорий Иркутской области, расположенных в пониженных рельефных зонах, является «стекание» и «застой» более тяжелого холодного воздуха. Ветровая нагрузка не отличается большой скоростью, в среднем составляя 2 м/с. Зимой очень часто наблюдаются штили [137]. При развитии зимних торфяных пожаров, свойственных этому региону, такие условия будут способствовать накоплению в приземном слое атмосферы опасных продуктов горения, способных оказывать крайне негативное действие на жизнедеятельность людей. Рассмотрим далее физико-химические особенности процесса горения торфа.

2.1.2 Физико-химические особенности процесса горения торфа. Обоснование понятия «дымовой гейзер»

Структурные и физико-химические особенности торфа обуславливают существенные различия в развитии торфяного пожара по сравнению с другими видами природных пожаров. Для торфа, как уже упоминалось в разделе 1.1.1, характерен беспламенный процесс горения в режиме тления, сопровождающийся в условиях дефицита кислорода воздуха, выделением большого количества дыма и продуктов неполного сгорания – угарного газа, частиц сажи, кислородсодержащих органических соединений. Тление торфа – относительно медленный и длительный процесс, зависящий от исходной влажности торфяника [78-83, 137-144]. В поверхностных пластах сухой торфяной залежи при соответствующих погодных условиях (сухой и жаркой погоде) скорость разрастания очага тления может достигать нескольких десятков сантиметров в сутки. В глубоких слоях процесс тления замедляется из-за более высокой влажности и недостатка кислорода. Быстрое масштабное распространение торфяного пожара (от нескольких гектаров до нескольких тысяч гектаров) возможно вследствие первоначального пламенного горения сухой растительности на поверхностном слое торфяника.

Особую опасность представляют зимние торфяные пожары. При наличии снежного покрова очаг пожара находится в глубине осушенной залежи, а выход продуктов горения с дымом осуществляется не со всей площади пожара, а из точечных дымовых устьев – на поверхности торфяника появляются точечные источники выброса дыма, так называемые «дымовые гейзеры» (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Характерный пример зимнего торфяного пожара в Усольском районе Иркутской области

Характерные черты зимних торфяных пожаров – медленное развитие процесса, высокая длительность (до нескольких месяцев), высокая задымленность. Изначальный очаг разрастается вглубь и вширь крайне медленно. За первые несколько недель площадь такого очага может достигать нескольких квадратных метров, а глубина прогорания – нескольких десятков сантиметров (на хорошо дренированных местах, а также вблизи корней деревьев глубина прогорания может быть большей). В условиях низких температур окружающей среды и устойчивого снежного покрова, тление у поверхности прекращается вовсе, а распространение беспламенного горения происходит внутри залежи. Такие процессы крайне опасны для пожарных, участвующих в ликвидации пожара, из-за образования внутренних (невидимых с поверхности) прогоревших полостей и риска провала.

Схематическое изображение выброса продуктов горения от тлеющего торфяника представлено на Рисунке 2.2.

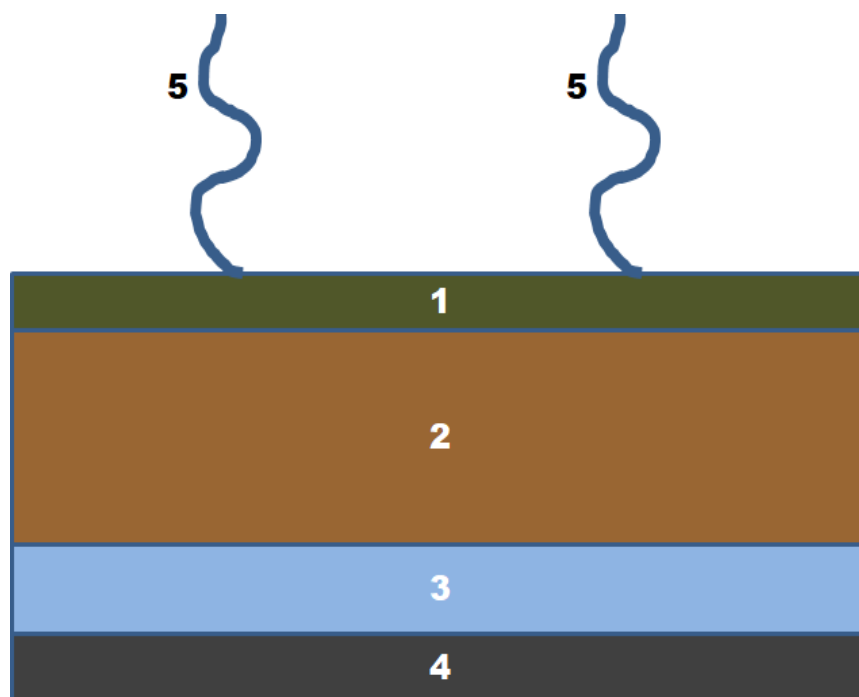


Рисунок 2.2 – Схематическое изображение процесса выброса продуктов горения от тлеющего торфяника: 1 – подстилаящая поверхность; 2 – тлеющий слой торфа; 3 – слой воды; 4 – дно торфяного болота; 5 – точечные источники выброса продуктов горения

При внутреннем горении торфа восходящие потоки продуктов горения, проходя через слои тлеющего торфа и подстилаяющей поверхности, остывают, что обуславливает распространение дыма в приземном слое атмосферы, создавая таким образом опасность для людей.

Совокупность точечных источников выброса вредных веществ («дымовых гейзеров») создает целостный источник выброса, который может быть стилизован в виде площадного источника.

Число точечных источников выброса продуктов горения зависит от площади, глубины и степени прогорания, которые, в свою очередь, будут определяться погодными условиями, структурой торфяника, его степенью увлажненности. В условиях длительной жаркой и сухой погоды число точечных источников выброса будет увеличиваться, а при возникновении поверхностного пожара эмиссия будет происходить со всей площади горения, то есть будет наблюдаться площадной источник выброса вредных веществ. На Рисунке 2.3 схематически представлен процесс развития торфяного пожара.



Рисунок 2.3 – Схема основных физико-химических процессов во фронте торфяного пожара

В литературных источниках имеются описания результатов исследования горения верхних торфяных слоев [78-83, 142-144]. Специалисты [142-144] пришли к выводу о том, что процесс распространения торфяного пожара имеет следующий характер: беспламенное горение торфа, в основном, происходит на границе слоев кокса (конденсированного продукта пиролиза торфа) и золы. Скорость процесса лимитируется диффузией кислорода через поверхностный слой почвы и золы к очагу горения. Выделяющееся в результате горения тепло расходуется на прогрев и сушку новых пластов торфа, которые затем подвергаются пиролизу, сгоранию и т.д. В режиме тлеющего горения объемная структура пласта торфа сохраняется, сгорая как целый кусок и покрываясь сверху золой. Процесс горения торфа, в силу лимитированного доступа кислорода, происходит с недожогом и с образованием значительного большего количества СО, чем при пламенном горении. Продукты горения, диффундируя от очага возгорания через поверхностные слои почвы, успевают остыть. При поверхностном пожаре (площадной источник выброса) процесс горения происходит быстрее (за счет более интенсивного притока кислорода воздуха), в результате чего температура горения эмитируемых продуктов горения более высокая, и они, за счет конвекции, образуют восходящие потоки.

Со временем верхние слои прогорают, покрывая золой нижние слои еще горящего торфа, и при этих условиях возникают так же единичные дымовые устья, откуда струйки дыма «пробиваются» через слои золы.

Наиболее опасными для здоровья людей являются такие продукты горения торфа, как угарный газ и мелкодисперсные взвешенные частицы. Их концентрация в воздухе зависит от массы горящего торфа, площади источника горения, скорости выхода продуктов горения. В меньшей степени – от химического состава торфа, объема, вида торфяного пожара как источника выброса (совокупность точечных или площадной).

Организация прогнозирования таких ЧС и разработка соответствующего экспериментально-расчетного методического обеспечения становятся актуальными задачами, решение которых позволит обоснованно оценивать опасное воздействие токсичных продуктов горения торфяного пожара на население, автотранспортный процесс, загрязнение атмосферы. Математические модели требуют верификации относительно результатов экспериментальных измерений. В условиях реального подземного торфяного пожара продукты горения из-под земли прорываются из локальных очагов, экспериментальное исследование распространения токсичных газов от которых невозможно из-за опасности провала, поэтому на начальном этапе диссертационного изыскания были проведены экспериментальные исследования качественно-количественного состава продуктов горения, эмитируемых в воздух от модельного источника горения торфа.

2.2 Материалы и методы экспериментального исследования качественно-количественного состава продуктов горения модельного источника горения торфа

2.2.1 Экспериментальное моделирование локального источника горения торфа

Для экспериментального моделирования локального источника горения торфа были использован брикетированный природный торф, сходный по химическому составу и структуре с низинным торфом Иркутской области. Общая масса торфа составляет 25 кг (Рисунок 2.4 а).

Эксперимент проводили следующим образом: брикет торфа помещался на огнеупорную подложку и разжигался с использованием древесного угля (Рисунок

2.4 б). Опытным путем было установлено, что процесс тления торфа длился приблизительно 60 минут. Место горения рассматривалось в качестве нулевой координаты, относительно которой определялись рецепторные точки – точки замера концентраций угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$.

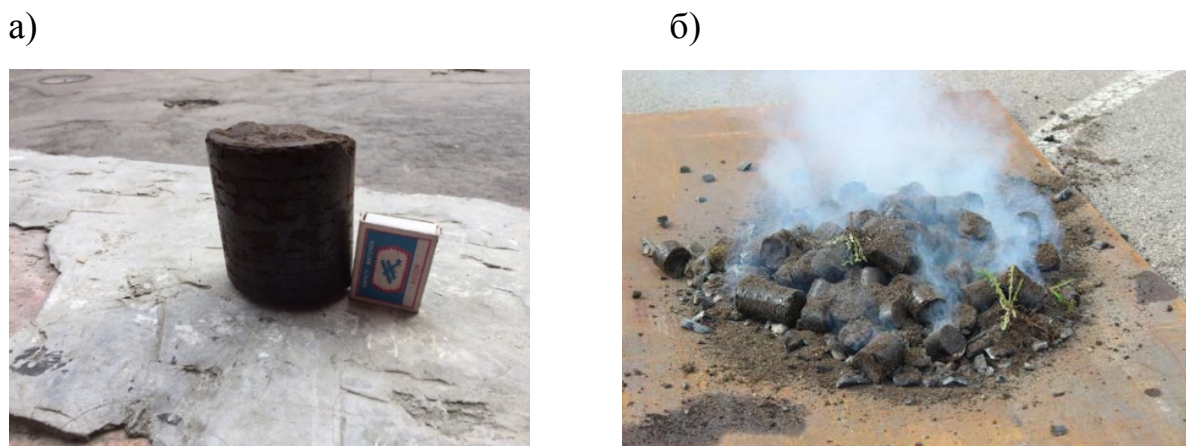


Рисунок 2.4 – Экспериментальное моделирование источника локального выброса в атмосферу продуктов горения торфа

2.2.2 Измерение содержания угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ вблизи модельного источника горения

Для натурных замеров концентраций исследуемых веществ в воздушной среде были использованы портативные газоанализаторы, позволяющие проводить непрерывные измерения в течение определенного времени.

Измерение содержания CO на разном удалении от моделируемого локального источника горения осуществляли с помощью двух приборов, обладающих разной чувствительностью и диапазоном измерения концентраций угарного газа. Прибор Testo-330-2LL (Testo / Германия) предназначен для определения содержания CO в горючих газах, поэтому был использован для измерений вблизи источника (на удалении нескольких десятков сантиметров). Газоанализатор ПГА-200 оборудован более чувствительным детектором, и с его помощью измеряли CO на удалении от 1,5 до нескольких метров от источника.

Для измерения концентраций взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ был выбран оптический метод лазерной нефелометрии с детектированием интенсивности

рассеянного света с использованием анализатора DUSTTRAK 8530 (TSI Incorporated / USA).

Скорость ветра измеряли с помощью анемометра АТЕ-1033. Скорость ветра во время эксперимента колебалась в пределах 2-4 м/с.

Все использованные приборы были предварительно поверены и откалиброваны. Их технические характеристики представлены в Таблице 2.1. Экспериментальные исследования были проведены в пяти повторностях.

Таблица 2.1 – Технические характеристики измерительных приборов.

Прибор	Анализ. Параметр	Производитель	Принцип детектирования	Диапазон измерений	Погрешность измерений
DustTrak 8530	PM ₁₀ и PM _{2,5}	TSI Incorporated/ США	Лазерная нефелометрия	0,1-150 мг/м ³	±20%
ПГА-200	СО	ЗАО «НПП «Электростандарт» / Россия	Электрохимический	0-120 мг/м ³	±5 мг/м ³
Testo-330-2LL	СО	Testo / Германия	Электрохимический	0-8000 ppm	±10 ppm или ±10% от изм.зн. (0 ... 200 ppm) ±20 ppm или ±5% от изм.зн. (201 ... 2000 ppm) ±10% от изм.зн. (2001 ... 8000 ppm)
Anemometr ATE-1033	Скорость ветра	Aktakom	В приборе использован выносной датчик-крыльчатка, снабженный подвеской на шарикоподшипниках с малым трением, и обеспечивающий дистанционное измерение скорости воздушного потока	0,4-30,0 м/с	±(2% изм.значения + 0,2 м/с)
Testo-330-2LL	Температура газо-воздушной смеси	Testo / Германия	Термопары К(Ni-CrNi)	-40 ... +1200 °С	±0.5 °С (0.0 ... +100.0 °С)±0.5 % от изм.зн. (ост. диап.)

2.2.3 Математическая обработка результатов экспериментальных измерений

Для оценки объективности экспериментальных данных проведена математическая обработка результатов экспериментальных измерений, путем определения погрешности измерений.

При проведении экспериментальных полевых исследований использовалось поверенное и откалиброванное газоаналитическое оборудование, а также поддерживались постоянные условия. В целях минимизации ошибок все измерения проводились не менее пяти раз.

Определение погрешности измерений осуществлялось традиционным способом:

1. Расчет среднего значения:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (2.1)$$

2. Оценка дисперсии:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}. \quad (2.2)$$

3. Расчет среднего квадратичного отклонения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (2.3)$$

4. Вычисление стандартного отклонения среднего (среднеквадратичная ошибка среднего):

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}. \quad (2.4)$$

5. Проведение статистического анализа. Было использовано распределение Стьюдента, поскольку число параллельных измерений, как правило, не превышало 10. Данный метод позволяет связать между собой три основные характеристики выборочной совокупности: ширину доверительного интервала, соответствующую ему доверительную вероятность и объем выборки или число степеней свободы выборки $f = n - 1$. Требуемый уровень доверительной вероятности был задан как $P=0,95$, для данного значения по таблице определен

коэффициент Стьюдента $t(P, n - 1)$ [338338] и модуль доверительного интервала $\Delta x = \sigma(\bar{x}) \cdot t(P, v)$.

6. Определение относительной ошибки среднего:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x \cdot 100}{\bar{x}}, \% \quad (2.5)$$

При воспроизводимых условиях погрешность косвенных измерений, а именно удельных выбросов ЗВ, рассчитываемых по формулам, представляющим собой произведения нескольких прямо измеренных величин, определялась следующим образом:

а) вначале находили относительную погрешность:

$$\varepsilon_z = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln z}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln z}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2} \cdot 100, \% \quad (2.6)$$

Учитывая, что производная от постоянной величины равна нулю, а производная от натурального логарифма $\frac{\partial \ln z}{\partial x} = \frac{1}{x}$ и $\frac{\partial \ln z}{\partial y} = \frac{1}{y}$, получили выражение:

$$\varepsilon_z = \sqrt{\left(\frac{\Delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta y}{y}\right)^2} \cdot 100 = \sqrt{(\varepsilon_x)^2 + (\varepsilon_y)^2} \cdot 100, \% \quad (2.7)$$

б) затем определяли абсолютную погрешность:

$$\Delta z = \frac{\varepsilon_z \cdot \bar{z}}{100} \quad (2.8)$$

где: x и y – значения прямо измеряемых величин; z – значение косвенно измеряемой величины, вычисленной по прямо измеренным аргументам x и y ; Δx и Δy – абсолютные погрешности прямо измеряемых величин x и y ; ε_x и ε_y – относительные погрешности прямо измеряемых величин x и y ; Δz абсолютная погрешность косвенно измеряемой величины z ; ε_z – относительная погрешность косвенно измеряемой величины z .

В случае обработки косвенных измерений при невоспроизводимых условиях значение косвенно измеренной величины вычислялось для каждого отдельного измерения, а полученные результаты обрабатывались совместно, как прямые многократные измерения.

При проведении испытаний погрешности измерений угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ вблизи модельного источника горения соответствовали требованиям действующих отечественных и международных стандартов.

2.3 Расчетное прогнозирование распространения продуктов горения вблизи тлеющего торфяника

Для локального пространственно-временного расчетного прогнозирования распространения продуктов горения в окрестности источника горения торфа (концентрационных полей загрязнителей) была использована физико-математическая К-модель [94] и разработанные на ее основе методики ОНД-86 и Методов расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе [97, 98], которые были адаптированы мной применительно к изучаемому объекту посредством экспериментального исследования и теоретического анализа (глава 3 диссертации).

Доказательством обоснованности применения этого подхода для прогнозирования концентраций загрязняющих веществ, эмитируемых от низких холодных источников, являются положительные результаты многолетних исследований качества воздушной среды вблизи автомагистралей [99-111, 153-159], проводимых в Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России под руководством профессора В. Н. Ложкина.

Для моделирования диффузии продуктов горения на мезо-уровне был привлечен нейросетевой метод, построенный на применении Гауссиана в качестве базисной радиальной функции [160, 161]. Эти исследования получили дальнейшее развитие в совместных работах с научной школой профессора В. Н. Ложкина (Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России) при поддержке гранта РФФИ № 14-01-00733А [111, 150-152, 156, 162, 163]. Научное обоснование возможности применения этого метода для решения задач диссертационного исследования изложено в главе 4.

2.4 Методика оценки снижения дальности видимости при аэрозольном замутнении атмосферы

Простой и удобной для применения на практике для расчета горизонтальной дальности видимости (L_v) в условиях «замутняющего действия водных аэрозолей» является формула, предложенная Трабертом еще в начале XX-ого века [164, 165]:

$$L_v = \alpha^* \cdot \frac{\rho}{q} \cdot r_e, \quad (2.9)$$

где: α^* – безразмерная эмпирическая константа, учитывающая полидисперсность аэрозолей и зависимость их концентрации от координат; q – концентрация аэрозолей в воздухе, г/м³; ρ – плотность аэрозолей, г/м³; r_e – диаметр или эффективный диаметр аэрозолей, м.

Формула была выведена, исходя из следующих упрощений:

- аэрозоль монодисперсен;
- частицы аэрозоля имеют сферическую форму;
- концентрация этих частиц не зависит от координат.

Кроме того, Трабертом учитывалось ослабление светового пучка только за счет его рассеивания частицами аэрозоля без учета поглощения.

Оникул и Яковлева [166] обосновали возможность использования этого подхода для расчета уменьшения дальности видимости в условиях загрязнения воздуха твердыми аэрозолями.

Результаты проведенных расчетов показали, что на снижение дальности видимости наиболее значимое влияние оказывают мелкодисперсные частицы с радиусом менее 10 мкм, что обусловлено их начальным выносом над поверхностью под действием подъемной силы.

В исследовательских работах [164, 165] было показано, что наиболее соответствующие реальным ситуациям результаты расчета получаются при незначительном разбросе размеров аэрозолей.

Представляется очевидным, что формула (2,9) не годится для применения в условиях предельно малых концентраций q аэрозоля в воздухе, поскольку при $q \rightarrow$

$0 L_v \rightarrow \infty$. Их следует применять только в ситуациях, когда расчетные значения L_v существенно меньше метеорологической дальности видимости в условиях визуально прозрачной атмосферы.

Значительные трудности возникают и при загрязнении воздуха у подстилающей поверхности разнородными аэрозолями. Эти проблемы обсуждаются в работах [167-170].

2.5 Структурно-логическая схема методики оценки и прогнозирования опасного воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения

На основании проведенного аналитического обзора по проблеме диссертационной работы, анализа и обоснования применимости экспериментальных методов исследования и физико-математических моделей была разработана структурно-логическая схема комплексной методики оценки и прогнозирования воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения [151, 171] – Рисунок 2.5.

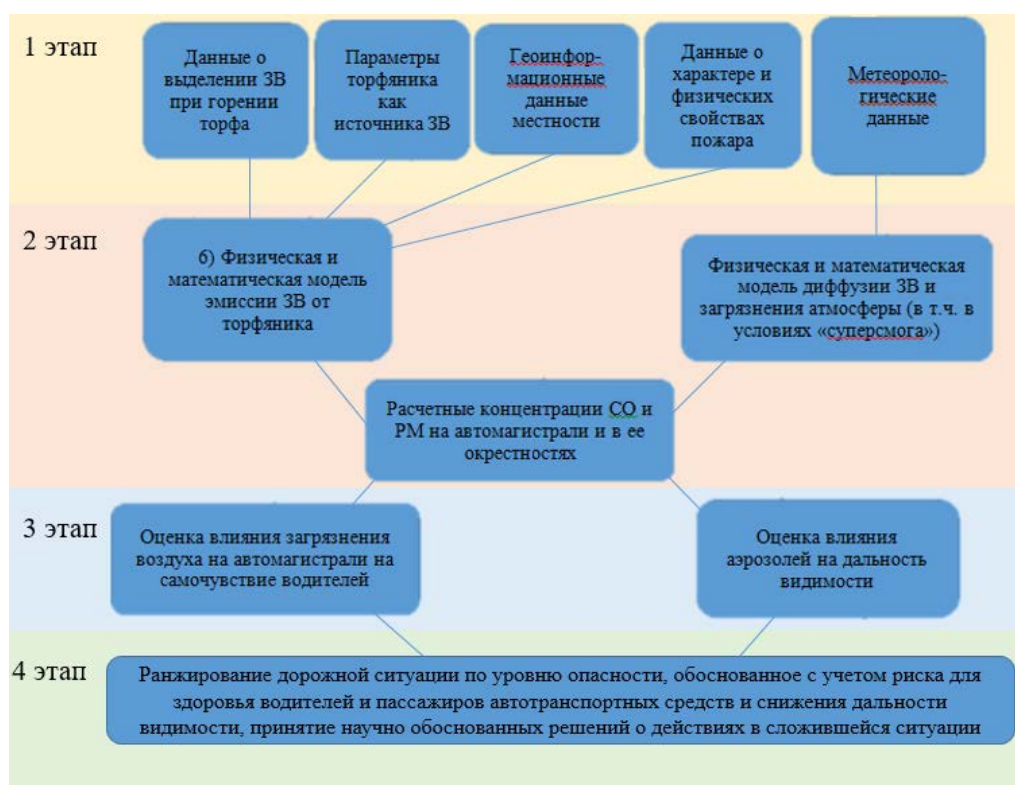


Рисунок 2.5 – Структурно-логическая схема методики оценки и прогнозирования воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения

На первом этапе проводится сбор исходных данных о торфяном пожаре как источнике выброса опасных веществ: экспериментальных данных о количественно-качественном составе продуктов горения, геометрических параметрах горящего торфяника, характере и физических особенностях пожара, рельефных и климатических характеристик местности, метеорологической ситуации.

На втором этапе осуществляется моделирование эмиссии, диффузии и переноса опасных продуктов горения в приземном атмосферном слое с использованием адаптированной мной применительно к распространению загрязняющих веществ от торфяного пожара К-модели и модели Гаусса, положенных в основу оригинального нейросетевого подхода моделирования.

Для расчета концентраций угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц вблизи автомагистрали и визуализации результатов расчета с помощью выше обоснованных физико-математических моделей были использованы соответственно программные продукты «Эколог» фирмы «Интеграл» и «Mathematica» компании «Wolfram Research».

На третьем этапе осуществляется оценка влияния опасных концентраций угарного газа и взвешенных частиц на самочувствие участников автотранспортного процесса с использованием программного продукта «Риски» фирмы «Интеграл», разработанного на основании «Руководства по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04», и оценки снижения дальности видимости.

На четвертом этапе вырабатываются критерии для принятия научно обоснованных решений о введении режима ЧС на основании результатов расчетного прогноза и рекомендованных критериев введения режима ЧС, установленных Приказом МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях».

Выводы по второй главе

1. В качестве объекта исследования в диссертационной работе рассматривалась реальная чрезвычайная ситуация (режим ЧС был введен с 24.12.2015 по 29.12.2015), возникшая в Усольском районе Иркутской области РФ при длительном (с октября 2015 г. по февраль 2016 г.) торфяном пожаре вблизи автомагистрали «Сибирь». В результате в районе возник транспортный коллапс, имевший широкий общественный резонанс.

Для торфа характерен беспламенный процесс горения в режиме тления, сопровождающийся, в условиях дефицита кислорода воздуха, выделением большого количества дыма и продуктов неполного сгорания – угарного газа, частиц сажи, кислородсодержащих органических соединений.

2. Особую опасность представляют подземные торфяные пожары, для которых характерны медленное развитие процесса, большая длительность (до нескольких месяцев), высокая задымленность. При наличии покрова очаг пожара находится в глубине осушенной залежи, а выход продуктов горения с дымом осуществляется не со всей площади пожара, а из точечных дымовых устьев, что позволило применить в отношении них термин «дымовые гейзеры».

3. Любые физико-математические модели для прогнозирования реально протекающих процессов требуют «настройки» и подтверждения адекватности относительно экспериментально измеряемых показателей. В условиях действующего подземного торфяного пожара натурные измерения концентраций токсичных компонентов существенно осложняются вероятностью провала, поэтому на начальном этапе диссертационного изыскания необходимо проведение экспериментально-расчетного исследования качественно-количественного состава продуктов горения, эмитируемых в воздух от модельного источника горения торфа, с использованием соответствующего аналитического оборудования.

4. Для расчетного прогнозирования концентраций угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в воздухе в условиях штилевой погоды в локальных пространственно-временных масштабах обосновано применение К-

модели, построенной на уравнении турбулентной диффузии. Для моделирования процесса распространения поллютантов на мезо-уровне при устойчивой средней ветровой нагрузке 2-8 м/с оправдано использование Гауссовой модели, реализованной в виде нейросетевой модели. Оригинальность предложенного подхода заключается в возможности самообучения модели по гетерогенным расчетным и экспериментальным данным.

5. Выявлено, что с точки зрения негативного воздействия на автотранспортный процесс, наиболее опасными факторами воздействия дыма и продуктов горения торфяного пожара являются снижение дальности видимости и токсическое действие поллютантов на самочувствие участников движения, что в совокупности может привести к повышению аварийности на автомагистрали. Для оценки и прогнозирования опасного действия угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц на здоровье людей было решено использовать методику оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду, а для оценки снижения дальности видимости – методику, базирующаяся на подходе Траберта для аэрозольного замутнения атмосферы.

6. Разработана структурно-логическая схема диссертационного исследования – методики прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами горения торфяного пожара, реализуемой в четыре этапа. На первом этапе осуществляется сбор фактических данных о торфяном пожаре как источнике выброса поллютантов с учетом всех необходимых параметров. На втором этапе оценивается мощность выброса и осуществляется расчетное прогнозирование распространения угарного газа и взвешенных частиц вблизи автомагистралей, находящихся вблизи торфяного пожара. На третьем этапе оценивается влияние продуктов горения на здоровье людей и влияние дыма на снижение дальности видимости на автодороге. На четвертом этапе, на основании результатов расчетного прогноза и рекомендованных критериев введения режима ЧС, установленных Приказом МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях», вырабатываются научно обоснованные решения о действиях в сложившейся чрезвычайной ситуации.

3. Экспериментальное и физико-математическое моделирование загрязнения приземного воздушного слоя выбросами продуктов горения тлеющего торфа

3.1 Обоснование модели распространения продуктов горения вблизи тлеющего торфяного источника выброса

Обоснование модели распространения и переноса в воздушном пространстве продуктов горения и дыма торфяного пожара является ключевой задачей при разработке методики прогнозирования развития чрезвычайной ситуации на автомагистралях, расположенных поблизости от горящих торфяников [150-152].

Основными параметрами, определяющими этот процесс, а следовательно, обязательными для учета в модели, являются: погодные и климатические условия местности, характерные особенности рельефа, скорость эмиссии продуктов горения от источника, физические параметры состояния атмосферы.

Рассмотрим влияние данных факторов на распространение опасных компонентов дыма торфяного пожара в воздухе.

Такие параметры, как скорость ветра, температура окружающей среды, состояние вертикальной устойчивости атмосферы (коэффициент стратификации), оказывают наиболее значимое влияние на распространение и перенос примесей в атмосфере.

Наиболее опасные метеорологические условия, способствующие аккумуляции вредных веществ в приземном воздушном слое, создаются при установившемся по направлению к магистрали слабом ветре. В такой квазистационарной ситуации вредные вещества, главным образом мелкодисперсные аэрозоли, находятся во взвешенном состоянии, переносятся с небольшой скоростью и успевают «накапливаться».

Температура воздуха и коэффициент стратификации влияют на высоту подъема потока продуктов горения. В условиях тлеющего горения торфа,

особенно при отрицательной температуре наружного воздуха, образование конвективных колонок практически не происходит.

Очевидно, что от скорости выхода продуктов горения напрямую зависит концентрация опасных примесей в атмосфере: чем выше скорость, тем выше концентрация.

Рельеф местности может либо способствовать накоплению примесей (в горной долине, овраге), либо не препятствовать их распространению (на равнине).

Влияние физических свойств атмосферы и выходящих потоков продуктов горения при торфяных пожарах на данный момент изучено слабо, но представляет большую важность при разработке данной методики.

В реальных условиях развития торфяного пожара изменение концентрации i -го поллютанта за счёт квазистационарного притока «холодных» дымовых газов (далее ДГ) из так называемого «дымового гейзера» в некой точке на поверхности с координатами x, y, z можно представить как:

$$\Delta C_i^{(x,y,z)} = C_i^0 - C_i^{dif} - C_i^n - C_i^s \pm C_i^{met}, \quad (3.1)$$

где: C_i^0 – начальное содержание i -го поллютанта в ДГ; C_i^s , C_i^n – его разбавление за счёт вымывания или осаждения на подстилающую поверхность, включая и поверхность торфяника; C_i^{dif} – разбавление i -го поллютанта за счёт турбулентной диффузии; $\pm C_i^{met}$ – разбавление (-) или концентрирование (+) i -го поллютанта за счёт химического метаболизма в воздушной среде; $\Delta C_i^{(x,y,z)}$ – прирост концентрации i -го поллютанта (относительно его фонового содержания в приземном воздухе) за счет эмиссии продуктов горения от внутреннего торфяного пожара.

Уровень опасного воздействия i -го поллютанта в любой точке пространства с координатами x, y, z можно определить как:

$$\Xi_i^{(x,y,z)} = (C_{iE} + \Delta C_i)^{(x,y,z)} / [C_i], \quad (3.2)$$

где: $C_{iE}^{(x,y,z)}$ – фоновое содержание i -го поллютанта в точке с координатами x, y, z ; $[C_i]$ – установленное нормативами предельно допустимое содержание i -го поллютанта в воздушной среде – ПДК_{МР} или ПДК_{СС}.

Для реальных условий протекания торфяного пожара и переноса продуктов горения целесообразно учитывать турбулентные потоки с выделением средних значений концентраций поллютантов и пульсационных отклонений от них наряду со средними величинами и флуктуациями скоростей движения воздуха.

Для упрощения физической модели М. Е. Берлянд в работе [94] предложил в качестве начального условия принимать известный конвективный поток опасных примесей от источника в атмосферу.

В диссертационной работе не рассматривались частные случаи поглощения примесных компонентов подстилающей поверхностью, например, водной поверхностью близлежащих водоемов или почвой.

По направлению ветра диффузионный поток окажется значительно меньшим конвективного.

Для угарного газа, выделяющегося в большом количестве при торфяном пожаре, химический метаболизм отсутствует.

Исходя из вышеописанных допущений, уравнение (1.18) можно существенно упростить: квазистационарность процесса позволяет принять $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$, ориентирование оси x в направлении ветра позволяет принять $v = 0$. Мы также допустили, что средний турбулентный поток поллютантов у земной поверхности будет незначительным и им можно пренебречь, как и дисперсией вдоль вертикали. Скорость осаждения лёгких дымовых аэрозолей, таких как мелкодисперсные частицы $PM_{2,5}$ и PM_{10} , можно условно считать равной 0. Тогда уравнение (1.18) примет следующий вид:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial y} K_y \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_z \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3.3)$$

Логично в качестве граничных условий принять, что:

$$C \rightarrow C_E \quad \text{при} \quad z \rightarrow \infty, \quad (3.4)$$

$$C \rightarrow C_E \quad \text{при} \quad |y| \rightarrow \infty, \text{ где} \quad (3.5)$$

C_E – фоновое содержание поллютанта, характерное для этой местности.

Источник вредных выбросов можно в общем случае рассматривать как источник конечного времени действия. При этом C будет удовлетворять уравнению для квазистационарного состояния при $\frac{\partial C}{\partial z} = 0$.

Очевидно, что в условиях квазистационарности процесса горения торфяника изменение концентрации поллютантов в его окрестности будет главным образом зависеть от турбулентного обмена и скорости ветра.

При разработке методики воздействия продуктов горения на условия и участников дорожного движения особый интерес представляет прогнозирование загрязнения приземного воздушного слоя в диапазоне высот от 0,5 до 50 м с определением максимального значения концентрации поллютанта, формируемой на некотором удалении от источника.

В этой связи представляется обоснованным использование упрощенной полуэмпирической формулы, предложенной в ОНД-86 [97], и позднее – в методических указаниях [98].

Как отмечалось выше, наблюдаемые физические процессы тепломассопереноса продуктов горения в условиях развития беспламенного подземного торфяного пожара в режиме тления позволяют нам стилизовать его в виде совокупности хаотично распределенных на некой поверхности точечных низких источников выброса, которые мы назвали «дымовыми гейзерами» (Рисунок 2.2).

Физическая картина распространения дымовых газов от действующего торфяного пожара (Рисунок 2.1) указывает на отсутствие мощного начального конвективного подъема продуктов горения, характерного для поверхностного пламенного горения, и позволяет обоснованно отнести подобный источник к наземным источникам с $H < 2-10$ м с относительно низкой температурой дымовых газов.

С понижением высоты источников и уменьшением различия в температурах выбрасываемых газов и окружающего воздуха значительно возрастает приземная концентрация поллютантов.

В условиях летнего торфяного пожара, когда нельзя пренебречь разностью

температур дымовых газов и наружного воздуха ($\Delta T > 50^\circ\text{C}$), опасная концентрация токсичных компонентов будет определяться по общей формуле [170]:

$$C_M = \frac{AMFmn\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}} \quad (3.6)$$

В условиях зимнего пожара появляется дополнительное условие для отнесения его к низким холодным источникам – перегрев эмитируемых газов относительно температуры воздуха менее 50°C ($\Delta T \leq 50^\circ\text{C}$). Тогда можно воспользоваться более простой формулой для определения максимальной концентрации примеси на некотором удалении от низкого холодного источника [170]:

$$C'_M = \frac{AMFn\eta D}{8H^{4/3}V_1}, \quad (3.7)$$

где: C_M и C'_M – максимальное значение концентрации примесного компонента, которое достигается на удалении x_M по оси дымового шлейфа для горячего и холодного источника соответственно, г/м^3 ; H – высота источника над поверхностью земли, м; D – диаметр устья источника выброса, м; M – удельный выброс примесного компонента в единицу времени, г/с ; V_1 – объем выброса дымовых газов от в единицу времени, $\text{м}^3/\text{с}$;

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} W_0, \quad (3.8)$$

где: W_0 – скорость выброса дымовых газов, м/с ; F – безразмерный коэффициент, который характеризует скорость осаждения взвешенных частиц и зависит от их дисперсности; F равно единице для газов и мелкодисперсных аэрозолей размером менее 10 мкм ; A – безразмерный коэффициент, характеризующий условия распределения примесей в приземном воздушном слое по вертикали и горизонтали при неблагоприятных метеоусловиях, способствующих накоплению примесей в приземной атмосфере; зависит от стратификации атмосферы и характерных особенностей турбулентного обмена, присущих разным климатическим зонам, например:

а) 250 – для республики Бурятия и Забайкальского края;

б) 200 – для Европейских районов РФ южнее 50^0 с. ш., Дальнего Востока и Сибири;

в) 180 – для Европейской территории РФ и Урала от 50 до 52^0 с. ш.;

г) 160 – для Европейской территории РФ и Урала севернее 52^0 с. ш. (за исключением Центра);

д) 140 – для Московской, Тульской, Рязанской, Владимирской, Калужской, Ивановской областей.

η – безразмерный коэффициент, который определяет влияние рельефа на распространение загрязняющих веществ; если перепад высот не превышает 50 м на один километр, то считается, что η равно единице.

Вспомогательные коэффициенты m и n , зависящие от температурных и геометрических характеристик источника эмиссии, находятся через соответствующие параметры.

$$f = 10^2 \frac{W_0^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad v_M = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}}, \quad v'_M = 1,3 \frac{W_0 D}{H}, \quad (3.9)$$

где: v_M и v'_M – опасная скорость ветра, при которой достигается максимальное загрязнение воздуха для горячего и холодного источников соответственно;

$$m = (0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f})^{-1} \text{ при } f \leq 100;$$

$$m = 1,47 f^{-1/3} \text{ при } f > 100;$$

$$n = 0,53 v_M^2 - 2,13 v_M + 3,13 \text{ при } 0,5 \leq v_M \leq 2;$$

$$n = 1 \text{ при } v_M > 2 \text{ м/с.}$$

n – безразмерный коэффициент, учитывающий геометрические и температурные характеристики источника выброса.

Преобразовав формулу (3.7), получим:

$$D = 0,64 \left(\frac{V_1}{W_0} \right)^{1/2} \quad (3.10)$$

и далее, подстановкой (3.10) в (3.6) и (3.7), получаем:

$$C_M = \frac{AMFmn\eta V_1^{1/6}}{H^2 W_0^{1/2} \Delta T^{1/3}}, \quad (3.11)$$

$$C'_M = \frac{AMFmn\eta}{7.1H^{4/3}\sqrt{W_0V_1}}. \quad (3.12)$$

Анализ формул (3.6) и (3.7) и соответствующих им (3.11) и (3.12) свидетельствует о том, что максимальная концентрация по-разному зависит от высоты источника для относительно горячих и относительно холодных выбросов: в первом случае она пропорциональна $\frac{1}{H^2}$, а во втором – $\frac{1}{H^{4/3}}$.

Отсюда следует, что, при прочих равных условиях, приземные концентрации загрязнителей в случае низких холодных источников будут несколько выше, чем в случае горячих источников.

Различие в приземных концентрациях горячих и холодных выбросов заметно проявляется при приподнятой инверсии температуры воздуха за счет существенного изменения начального подъема дымовых газов (ΔH). Относительно холодные выбросы не могут в таких условиях подняться выше некоторого уровня («потолка»), что приводит при безветрии к стремительному росту концентраций опасных примесей у поверхности.

Для не очень мощных единичных низких холодных источников опасная концентрация загрязнителей достигается, как правило, на удалении 10-100 м от источника. Однако в случае больших совокупностей таких источников, как в случае торфяного пожара, который можно стилизовать в виде площадного источника, обоснован расчет в масштабе 1-10 км.

В случае площадного источника выбросов, образованного несколькими точечными источниками, приземная концентрация загрязнителя (C) вычисляется на основе принципа суперпозиции полей концентраций от отдельных источников, иными словами, путем интегрирования формул для концентрации от точечного источника по площади:

$$C = \frac{M}{S} \int_S \int \tilde{C}(x - \xi, y - \zeta) \theta(x - \xi) d\xi d\zeta, \quad (3.13)$$

где: M – мощность выброса продуктов горения, г/с; S – площадь, м²; x – расстояние от источника выбросов, на котором достигается максимальная концентрация загрязнителя, м; y – параметр, характеризующий направление ветра,

м; ξ – коэффициент, учитывающий рельеф местности; ζ – коэффициент, определяемый в зависимости от скорости ветра; $\tilde{C}$ – концентрация поллютанта, формируемая точечным источником, г/л.

Из анализа формулы следует, что влияние стратификации и скорости ветра на максимальную концентрацию поллютанта, создаваемого точечным и площадным источником, проявляются по-разному на различных расстояниях.

Неблагоприятная стратификация и опасная скорость ветра будут оказывать приблизительно одинаковое влияние на концентрацию примеси, формируемую вблизи наветренной стороны точечного и площадного источника. С увеличением расстояния от источника и поверхностных размеров площадного источника более опасное влияние оказывает стратификация атмосферы, приподнятая инверсия температуры и снижение скорости ветра. При одних и тех же аномально неблагоприятных метеорологических условиях максимальная концентрация поллютанта C_M для площадного источника может увеличиваться до 5-10 раз, тогда как для точечного источника – в 1,5-2 раза. В этом случае для площадного источника, образованного совокупностью точечных, снижение концентрации примеси по мере удаления от него существенно замедляется.

Влияние рельефа местности на значение максимальной приземной концентрации C_M от дымового гейзера учитывается безразмерным коэффициентом h , значение которого устанавливается на основе анализа картографического материала, характеризующего рельеф местности в радиусе до 50 высот наиболее высокого из размещаемых на площадке источника, но не менее чем до 2 км.

3.2 Изучение особенностей распространения угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи модельного источника горения торфа с использованием численных и экспериментальных методов исследования

Как уже отмечалось выше, в связи с тем, что экспериментальные измерения в условиях реально действующего торфяного пожара значительно затруднены из-за опасности провала в образовавшиеся вследствие беспламенного выгорания торфяных залежей подземные пустоты, представлялось логичным и

обоснованным провести натурный эксперимент с воссозданием модельного точечного источника горения торфа.

При сборе исходных данных для моделирования процесса горения торфа в режиме тлеющего горения и эмиссии в окружающую среду токсичных поллютантов требуется учет специфических характеристик торфа, таких как химический состав, степень разложения, зольность, влажность, теплотворная способность. С увеличением степени разложения торфа возрастает его теплотворная способность. Для экспериментального моделирования локального источника горения торфа был использован брикетированный природный торф, сходный по химическому составу и структуре с низинным торфом Иркутской области, для которого свойственна высокая зольность (>10), высокая степень разложения (30-50 %), средняя влажность и средняя теплотворность. Методика проведения экспериментального исследования подробно изложена в разделе 2.2.

Для каждого цикла экспериментальных исследований было использовано 170 брикетов торфа цилиндрической формы высотой 17 см и диаметром 10 см. Торфяные брикеты располагались на огнеупорной подложке таким образом, чтобы ко всем ним был обеспечен доступ кислорода, что позволило нам определить площадь источника, как сумму площадей поверхностей брикетов. Процесс подготовки к измерениям и настройки приборов представлен на Рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Процесс подготовки к измерениям и тестирования приборов

Расчет мощности выброса поллютанта (M , г/с) от модельного источника горения осуществлялся следующим образом:

$$M = \frac{C \cdot W_0 \cdot S}{1000}, \quad (3.14)$$

где: C – концентрация поллютанта в дымовых газах, мг/м³; W_0 – скорость выхода дымовых газов, м/с; $1/1000$ – коэффициент перевода из мг/м³ в г/м³; S – площадь горения, м².

Исходя из условий эксперимента, получаем:

$$S = \left(h \cdot \pi \cdot d + \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 2 \right) \cdot N, \quad (3.15)$$

где: h и d – высота и диаметр одного брикета торфа, м; N – их количество.

Тогда

$$S = \left(0,17 \cdot 3,14 \cdot 0,1 + \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} \cdot 2 \right) \cdot 170 = 11,74 \text{ м}^2 \quad (3.16)$$

Мощности выброса угарного газа, взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} соответственно равны:

$$\begin{aligned} M_{CO} &= \frac{162 \cdot 5 \cdot 11,74}{1000} = 9,51 \text{ г/с} \\ PM_{2.5} &= \frac{20,6 \cdot 5 \cdot 11,74}{1000} = 1,2 \text{ г/с} \\ PM_{10} &= \frac{22,6 \cdot 5 \cdot 11,74}{1000} = 1,33 \text{ г/с} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Здесь необходимо отметить, что при расчете мощности выброса загрязняющих веществ, выделяющихся в атмосферу в условиях реального пожара, когда неизвестны концентрации поллютантов, необходимо использовать формулу (3.18):

$$M = \frac{S \cdot H \cdot \rho \cdot B \cdot \alpha \cdot 1000}{t}, \quad (3.18)$$

где: S – площадь очага возгорания торфяника, м²; H – глубина залегания торфа, м; ρ – плотность торфа, кг/м³; B – массовая доля сгоревшего торфа; 1000 – коэффициент перевода г в кг; t – время горения торфа, с; α – удельная масса вредного вещества, выделяющегося при сгорании 1 кг торфа, кг.

При расчете по этой формуле мы исходили из следующих рассуждений: площадь остается той же, равной 11,74 м²; H (глубину залежи) и B (долю

сгоревшего торфа) заменим одним параметром X , равным глубине прогорания брикетов – 1,4 см (0,014 м); время горения – 60 минут (3600 с).

Плотность торфа вычисляем, исходя из значения объема одного брикета – 0,00024м³ и его массы – 120 г. Плотность при этом будет равна 500кг/м³.

Тогда мощность выброса СО составит:

$$M_{CO} = \frac{0,014 \cdot 500 \cdot 11,74 \cdot 0,41 \cdot 1000}{3600} = 9,35 \text{ г/с} \quad (3.19)$$

Сравнение значений мощности выброса угарного газа, рассчитанных по формулам (3.17) и (3.19), равных соответственно 9,51 и 9,35 г/с, позволяет сделать вывод о правомерности применения формулы (3.18), поскольку полученное с ее помощью значение M отклоняется от значения, определенного по уравнению (3.14), учитывающего экспериментально измеренную концентрацию СО, всего на 1,7 %.

Это позволяет использовать формулу (3.18) для расчета мощности выбросов продуктов горения в условиях действующего торфяного пожара при неизвестных значениях их концентраций над источником.

Для взвешенных частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10} нам неизвестен коэффициент α , показывающий удельную массу вещества, выделяющуюся при сгорании 1 кг торфа. Необходимо найти его, зная мощность выброса.

$$\alpha_{PM2.5} = \frac{M \cdot T}{S \cdot X \cdot \rho \cdot 1000} = \frac{1,2 \cdot 3600}{11,74 \cdot 0,014 \cdot 500 \cdot 1000} = 0,052 \quad (3.20)$$

$$\alpha_{PM10} = \frac{1,33 \cdot 3600}{11,74 \cdot 0,014 \cdot 500 \cdot 1000} = 0,058 \quad (3.21)$$

Полученные значения мощностей выброса поллютантов были использованы для расчета характеристик их распространения в окрестности модельного источника горения.

Для экспериментального подтверждения обоснованной ранее теоретической гипотезы о характере распространения продуктов горения от торфяного пожара, протекающего в режиме тления, в зимний и летний периоды, нами были дополнительно проведены экспериментальные исследования при положительных и отрицательных температурах окружающей среды с максимальным приближением к реальным условиям.

На Рисунке 3.2 представлена динамика понижения температуры дымовых газов с высотой над модельным источником горения торфа.

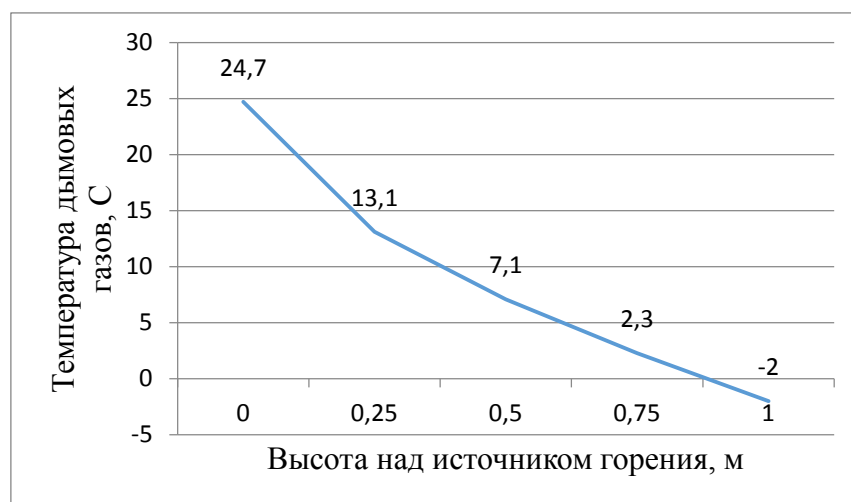


Рисунок 3.2 – Динамика понижения температуры дымовых газов с высотой над модельным источником горения торфа

Результаты натурных измерений свидетельствуют о правильности нашей гипотезы о незначительной разности температур дымовых газов и воздуха непосредственно над источником: разница температур зимой при прохождении нагретых отходящих газов через снежно-ледяной покров при температуре окружающей среды минус 2 °C составила 26,7 °C, а летом при температуре плюс 23 °C – 51 °C.

Это однозначно позволяет нам в первом случае стилизовать источник в виде наземного холодного источника выброса, а во втором случае – сделать научно обоснованный выбор на основании сравнения расчетных и экспериментальных данных.

В Таблицах 3.1-3.9 сравниваются данные экспериментальных измерений и результаты расчетов концентраций угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2,5}$ в тринадцати контрольных точках, расположенных на разном удалении от источника, местоположение которого было принято за нулевую точку отсчета в Декартовой системе координат. Мы исходили из предположения, что ось Y ориентирована по направлению ветра.

Таблица 3.1 – Сравнение экспериментальных и расчетных концентраций угарного газа в воздухе на разном удалении от источника в летний период при стилизации источника выброса в виде горячего наземного источника

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{\text{расчет}}$, мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	142	160	183	161,67 $\pm$ 51,02	117,3	27
2	0	1	1,5	157	150	149	152,00 $\pm$ 10,82	108,4	28
3	0	2	1,5	143	137	145	141,67 $\pm$ 10,34	101,3	28
4	0	5	1,5	128	131	124	127,67 $\pm$ 8,72	83,9	34
5	0	10	1,5	30	38	35	34,33 $\pm$ 10,03	39,9	16
6	0	20	1,5	29	32	33	31,33 $\pm$ 5,17	28,7	8
7	0	25	1,5	32	33	27	30,67 $\pm$ 7,98	21,3	31
8	0	30	1,5	32	27	27	28,67 $\pm$ 7,17	16,4	43
9	0	35	1,5	18,5	20,8	21,6	20,30 $\pm$ 4,00	12,7	37
10	0	40	1,5	6,4	5,5	6,8	6,23 $\pm$ 1,65	8,4	35
11	0	50	1,5	3,3	2,9	3	3,07 $\pm$ 0,52	7,0	56
12	0	55	1,5	2,4	3	3,5	2,97 $\pm$ 1,37	5,9	49
13	0	60	1,5	3,1	2,9	2,6	2,87 $\pm$ 0,62	4,6	60

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1 , C_2 , C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{\text{расчет}}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x, y, z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Таблица 3.2 – Сравнение экспериментальных и расчетных концентраций взвешенных частиц РМ_{2,5} в воздухе на разном удалении от источника в летний период при стилизации источника выброса в виде горячего наземного источника

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{\text{расчет}}$, мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	23,1	21,2	18,2	20,83 $\pm$ 6,13	18,0	14
2	0	1	1,5	22,2	21,3	18,3	20,60 $\pm$ 5,07	16,3	20
3	0	2	1,5	21,4	20,2	19,1	20,23 $\pm$ 2,86	14,2	29
4	0	5	1,5	16,1	17	16,2	16,43 $\pm$ 1,22	12,9	22
5	0	10	1,5	14,2	15,1	14,5	14,60 $\pm$ 1,14	6,2	58
6	0	20	1,5	12,4	10,9	10,5	11,27 $\pm$ 2,49	4,4	61
7	0	25	1,5	8,9	9,2	10,2	9,43 $\pm$ 1,69	3,3	65
p8	0	30	1,5	7,3	7,1	7,5	7,30 $\pm$ 0,50	2,5	66
9	0	35	1,5	6,1	5,7	6,5	6,10 $\pm$ 0,99	1,9	69

10	0	40	1,5	1,9	1,7	2,6	2,07± 1,17	1,3	37
11	0	50	1,5	1,8	1,6	2,3	1,90± 0,90	1,1	42
12	0	55	1,5	0,9	1,2	1,3	1,13± 0,52	0,9	21
13	0	60	1,5	1,1	0,9	0,9	0,97± 0,29	0,7	28

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1 , C_2 , C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{\text{расчет}}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x , y , z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Таблица 3.3 – Сравнение экспериментальных и расчетных результатов определения концентрации PM_{10} в воздухе на разном удалении от источника в летний период при стилизации источника выброса в виде горячего наземного источника

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{\text{расчет}}$, мг/м ³	D , %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	22,3	23,1	21,4	22,27±2,11	22,6	1
2	0	1	1,5	21,1	22	21,3	21,47±1,17	20,1	6
3	0	2	1,5	19,8	20,8	21	20,53±1,60	18,3	10
4	0	5	1,5	17,2	17,8	18,1	17,70±1,14	16,1	9
5	0	10	1,5	16,5	16,8	16,3	16,53±0,62	7,7	53
6	0	20	1,5	14,3	14,1	13,9	14,10±0,50	5,5	61
7	0	25	1,5	11,4	12,5	12,9	12,27±1,93	4,1	67
8	0	30	1,5	9,5	9,9	10,1	9,83±0,76	3,2	67
9	0	35	1,5	6,8	6,3	6	6,37±1,00	2,4	62
10	0	40	1,5	4,2	4,1	4,4	4,23±0,38	1,6	62
11	0	50	1,5	2,1	2,6	2,6	2,43±0,72	1,4	42
12	0	55	1,5	1,5	1,9	1,6	1,67±0,52	1,2	28
13	0	60	1,5	1,2	1,3	1,4	1,30±0,25	0,9	31

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1 , C_2 , C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{\text{расчет}}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x , y , z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Проведенное сравнение показывает, что при стилизации источника горения в виде наземного горячего источника выброса расчетные концентрации угарного газа в контрольных точках на расстоянии до 40 м сопоставимы с результатами экспериментальных измерений – расхождение данных не превышает 40 %, при этом расчетные концентрации были ниже реально измеренных.

На расстоянии 40-60 м от источника расчетные концентрации превышали реально измеренные, при этом также наблюдалась тенденция увеличения расхождения между результатами измерений и расчетными данными до 60 % (Таблица 3.1).

В отношении характера распространения взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ вблизи источника выброса было установлено, что расхождение расчетных и измеренных концентраций в контрольных точках на расстоянии до 5 м не превышало 20 %, при этом расчетные концентрации были ниже измеренных. В диапазоне расстояний от 10 до 50 м экспериментальные концентрации имели тенденцию сглаженного снижения, а расчетные – резкого, что очевидно сопровождалось увеличением роста расхождения результатов до 60 %.

Результаты экспериментальных измерений показали, что концентрации угарного газа и взвешенных частиц ниже соответствующих максимально разовых ПДК, достигались соответственно на удалении более 60 м от источника.

В целом можно констатировать, что предложенный подход оказался более корректным в отношении моделирования распространения в воздухе угарного газа, чем мелкодисперсных взвешенных частиц. На основании полученных данных можно сделать вывод о том, что в реальных условиях аэродинамика мелкодисперсных взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ отличается от аэродинамики газов – они медленнее диффундируют в воздушном пространстве, и характер изменения профиля концентраций носит более сглаженный характер.

В Таблице 3.4 и на Рисунках 3.3 и 3.4 приведены сравнения результатов экспериментальных и расчетных исследований распространения угарного газа в летний период при стилизации источника тлеющего беспламенного горения торфа в виде холодного наземного источника выброса.

Таблица 3.4 – Сравнение экспериментальных и расчетных концентраций угарного газа в воздухе на разном удалении от источника в летний период при стилизации источника выброса в виде холодного наземного источника

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{\text{расчет}}$, мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	142	160	183	161,67 $\pm$ 51,02	181,7	12
2	0	1	1,5	157	150	149	152,00 $\pm$ 10,82	163,5	1
3	0	2	1,5	143	137	145	141,67 $\pm$ 10,34	142,7	28
4	0	5	1,5	128	131	124	127,67 $\pm$ 8,72	123,2	3
5	0	10	1,5	30	38	35	34,33 $\pm$ 10,03	37,9	9
6	0	20	1,5	29	32	33	31,33 $\pm$ 5,17	39,8	27
7	0	25	1,5	32	33	27	30,67 $\pm$ 7,98	29,4	4
8	0	30	1,5	32	27	27	28,67 $\pm$ 7,17	22,4	22
9	0	35	1,5	18,5	20,8	21,6	20,30 $\pm$ 4,00	17,4	14
10	0	40	1,5	6,4	5,5	6,8	6,23 $\pm$ 1,65	8,7	28
11	0	50	1,5	3,3	2,9	3	3,07 $\pm$ 0,52	4,2	26
12	0	55	1,5	2,4	3	3,5	2,97 $\pm$ 1,37	4,1	27
13	0	60	1,5	3,1	2,9	2,6	2,87 $\pm$ 0,62	3,4	18

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1 , C_2 , C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{\text{расчет}}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x, y, z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Для наглядности мною были построены карты распространения угарного газа вблизи модельного источника горения торфа. Результаты визуализации экспериментального и расчетного исследования распространения СО вблизи экспериментально смоделированного локального источника горения торфа при его стилизации в виде низкого холодного источника представлены на Рисунке 3.3.

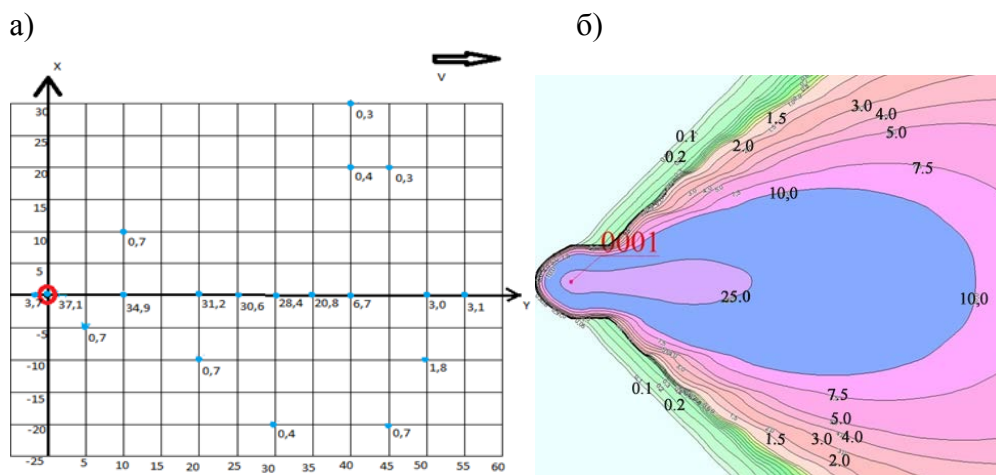


Рисунок 3.3 – (а) Результаты измерения концентрации СО (синие точки на Рисунке 3а), мг/м^3 , (б) результаты численного моделирования распространения СО, полученные с использованием программного обеспечения «Эколог» (Рисунок 3б)

Для проведения сравнительного анализа результаты экспериментальных измерений и численных исследований были совмещены на одной диаграмме (Рисунок 3.4). Проводя сравнительный анализ результатов измерительных и расчетных исследований распространения угарного газа вблизи локального источника горения торфа, необходимо учитывать, что в первом случае мы получаем значения концентраций в единицах измерения мг/м^3 , а во втором – в долях ПДК угарного газа, так заложено в программном обеспечении. Значение $\text{ПДК}_{\text{МР}}$ угарного газа составляет 5 мг/м^3 .

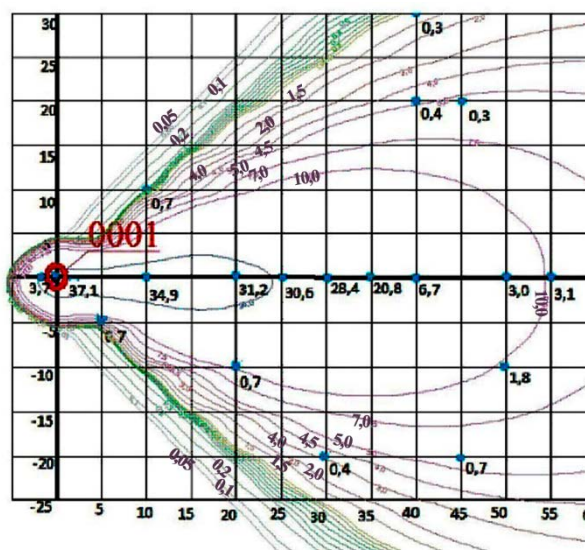


Рисунок 3.4 – Сравнительный анализ результатов эксперимента и расчета концентраций СО

Непосредственно над модельным источником горения на высоте 1,0 м экспериментально измеренная концентрация составила 161,7 мг/м³, а расчетная – 182,3 мг/м³. На расстоянии 10 м от тлеющего торфа в направлении ветра – 34,9 мг/м³ и 37,5 мг/м³ соответственно. Расхождение значений измерений и результатов расчета на расстоянии менее 20 м от источника составило 7–15 %. Расхождение 26-28 % отмечалось на удалении более 40 м от источника в направлении ветра.

По результатам экспериментальных измерений концентрация угарного газа ниже предельно допустимого значения была достигнута на расстоянии 55 м от источника дыма, а по результатам расчетного исследования – на расстоянии 75 м от источника.

В Таблицах 3.5-3.6 приведено сравнение экспериментальных результатов измерения концентраций взвешенных частиц PM₁₀ и PM_{2.5} и результатов численного моделирования при стилизации источника выброса в виде наземного холодного источника.

Таблица 3.5 – Сравнение экспериментальных и расчетных концентраций взвешенных частиц PM_{2.5} в воздухе на разном удалении от источника в летний период при стилизации источника выброса в виде холодного наземного источника.

КТИ	Координаты КТИ, м			C ₁ , мг/м ³	C ₂ , мг/м ³	C ₃ , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	C _{расчет} , мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	23,1	21,2	18,2	20,83 ± 6,13	26,0	25
2	0	1	1,5	22,2	21,3	18,3	20,60 ± 5,07	25,9	26
3	0	2	1,5	21,4	20,2	19,1	20,23 ± 2,86	23,1	12
4	0	5	1,5	16,1	17	16,2	16,43 ± 1,22	18,9	15
5	0	10	1,5	14,2	15,1	14,5	14,60 ± 1,14	10,6	27
6	0	20	1,5	12,4	10,9	10,5	11,27 ± 2,49	8,0	29
7	0	25	1,5	8,9	9,2	10,2	9,43 ± 1,69	6,5	31
8	0	30	1,5	7,3	7,1	7,5	7,30 ± 0,50	5,0	32
9	0	35	1,5	6,1	5,7	6,5	6,10 ± 0,99	4,3	29
10	0	40	1,5	1,9	1,7	2,6	2,07 ± 1,17	1,8	13
11	0	50	1,5	1,8	1,6	2,3	1,90 ± 0,90	1,5	21
12	0	55	1,5	0,9	1,2	1,3	1,13 ± 0,52	1,3	15
13	0	60	1,5	1,1	0,9	0,9	0,97 ± 0,29	0,9	7

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C₁, C₂, C₃ – концентрация загрязнителя, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации загрязнителя, ΔC – абсолютная погрешность, C_{расчет} – расчетная концентрация загрязнителя; D – расхождение в значениях концентрации загрязнителя в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x, y, z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Таблица 3.6 – Сравнение экспериментальных и расчетных концентраций PM_{10} в воздухе на разном удалении от источника в летний период при стилизации источника выброса в виде холодного наземного источника.

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{расчет}$, мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	22,3	23,1	21,4	22,27±2,11	28,5	22
2	0	1	1,5	21,1	22	21,3	21,47±1,17	26,7	19
3	0	2	1,5	19,8	20,8	21	20,53±1,60	23,9	14
4	0	5	1,5	17,2	17,8	18,1	17,70±1,14	20,7	14
5	0	10	1,5	16,5	16,8	16,3	16,53±0,62	12,1	27
6	0	20	1,5	14,3	14,1	13,9	14,10±0,50	10,2	28
7	0	25	1,5	11,4	12,5	12,9	12,27±1,93	8,5	31
8	0	30	1,5	9,5	9,9	10,1	9,4±0,63	6,7	29
9	0	35	1,5	6,8	6,3	6	6,37±1,00	4,5	30
10	0	40	1,5	4,2	4,1	4,4	4,23±0,38	3,2	24
11	0	50	1,5	2,1	2,6	2,6	2,43±0,72	2,8	26
12	0	55	1,5	1,5	1,9	1,6	1,67±0,52	1,6	4
13	0	60	1,5	1,2	1,3	1,4	1,30±0,25	1,2	8

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1 , C_2 , C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{расчет}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x, y, z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Было установлено, что при моделировании распространения взвешенных частиц в окрестности локального источника горения торфа, стилизованного в виде низкого холодного источника, в непосредственной близости от очага горения на расстоянии 5 м и менее, расчетные концентрации оказывались на 12-26 % более завышенными, чем экспериментальные. А на расстоянии более 10 м расчетные концентрации убывали быстрее экспериментальных, выравниваясь в значениях на удалении более 40 м.

В целом отклонение расчетных концентраций от реально измеренных не превышало 32 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели.

Отдельный интерес представляло расчетное моделирование распространения поллютантов от тлеющего источника горения торфа в условиях отрицательной температуры окружающей среды. Натурные эксперименты проводились при температуре воздуха от -3°C до -2°C по вышеописанной методике с использованием брикетированного торфа того же вида и в том же количестве. Было установлено, что при таких условиях мощности выбросов исследуемых загрязнителей, определенные по формуле (3.18), составили:

$$\begin{aligned} M_{\text{CO}} &= \frac{162 \cdot 4 \cdot 11,74}{1000} = 7,6 \text{ г/с} \\ \text{PM}_{2,5} &= \frac{20,6 \cdot 4 \cdot 11,74}{1000} = 0,96 \text{ г/с} \\ \text{PM}_{10} &= \frac{22,6 \cdot 4 \cdot 11,74}{1000} = 1,06 \text{ г/с} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Полученные значения были использованы при выполнении расчетов.

В Таблицах 3.7-3.9 представлены результаты экспериментального и расчетного исследования динамики изменения концентраций загрязнителей CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ в окрестности модельного источника горения торфа при стилизации его в виде наземного холодного источника в условиях отрицательной температуры окружающей среды.

Таблица 3.7 – Сравнение экспериментальных и расчетных концентраций угарного газа в воздухе на разном удалении от источника в зимний период при стилизации источника выброса в виде холодного наземного источника.

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{\text{рас-т}}$, мг/м ³	D, %
	x	y	Z						
2	0	1	1,5	128	129	134	130,33±11,92	142,5	9
1	0	0	1,5	121	123	120	121,33±2,43	134,5	10
3	0	2	1,5	122	121	111	118,10±15,38	122,5	4
4	0	5	1,5	79	75	76	76,83±5,13	84,8	10
5	0	10	1,5	41	45	41	42,65±6,07	39,2	8
6	0	20	1,5	40	43	38	38,33±3,55	27,9	27
7	0	25	1,5	38	36	34	29,33±3,79	21,1	28
8	0	30	1,5	33	37	33	23,00±2,48	17,0	26
9	0	35	1,5	28	27	27	15,67±3,79	12,3	21
10	0	40	1,5	20	20	20	10,67±3,79	8,1	24
11	0	50	1,5	13	13	13	8,67±2,87	6,8	22

12	0	55	1,5	10	10	10	7,00±2,48	5,8	17
13	0	60	1,5	10	9	9	5,33±1,43	4,4	18

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1 , C_2 , C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{\text{расчет}}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x , y , z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Таблица 3.8 – Сравнение экспериментальных и расчетных результатов определения концентрации взвешенных частиц $PM_{2.5}$ в воздухе на разном удалении от источника в зимний период при стилизации источника выброса в виде холодного наземного источника.

КТИ	Координаты КТИ, м			C ₁ , мг/м ³	C ₂ , мг/м ³	C ₃ , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	C _{рас-т} , мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	18,5	16,5	16,7	17,24±2,68	22,2	29
2	0	1	1,5	17,8	17,5	14,5	16,56±4,54	19,8	20
3	0	2	1,5	17,1	15,8	14,1	15,67±3,71	17,7	13
4	0	5	1,5	11,9	12,9	12,5	12,44±1,25	14,7	18
5	0	10	1,5	10,5	10,8	10,3	10,54±0,62	7,4	29
6	0	20	1,5	6,4	6,9	7,2	6,83±1,00	4,8	30
7	0	25	1,5	5,4	5,6	5,7	5,57±0,38	4,0	28
8	0	30	1,5	4,3	4,3	4,0	4,20±0,43	3,1	26
9	0	35	1,5	3,3	3,1	2,9	3,10±0,50	2,1	32
10	0	40	1,5	1,4	1,3	2,0	1,57±0,95	1,4	11
11	0	50	1,5	1,3	1,2	1,8	1,44±0,73	1,2	17
12	0	55	1,5	0,7	0,9	1,0	0,86±0,43	1,0	16
13	0	60	1,5	0,8	0,7	0,7	0,73±0,18	0,8	10

Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C₁, C₂, C₃ – концентрация загрязнителя, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации загрязнителя, ΔC – абсолютная погрешность, C_{расчет} – расчетная концентрация загрязнителя; D – расхождение в значениях концентрации загрязнителя в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x, y, z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.

Таблица 3.9 – Сравнение экспериментальных и расчетных результатов определения концентрации взвешенных частиц PM_{10} в воздухе на разном удалении от источника в зимний период при стилизации источника выброса в виде холодного наземного источника.

КТИ	Координаты КТИ, м			C_1 , мг/м ³	C_2 , мг/м ³	C_3 , мг/м ³	$\bar{C} \pm \Delta C$, мг/м ³	$C_{рас-т}$, мг/м ³	D, %
	x	y	z						
1	0	0	1,5	17,1	15,8	15,5	16,11±2,19	19,8	23
2	0	1	1,5	16,8	16,4	15,9	16,36±1,15	17,4	7
3	0	2	1,5	16,2	15,7	15,3	15,72±1,05	16,3	4
4	0	5	1,5	13,7	14,1	13,3	13,69±1,03	13,0	5
5	0	10	1,5	9,7	9,0	8,2	8,94±1,87	6,3	30
6	0	20	1,5	5,9	6,6	5,5	6,01±1,42	4,3	28
7	0	25	1,5	5,4	5,3	4,2	4,94±1,60	3,5	30
8	0	30	1,5	3,0	4,3	3,1	3,47±1,76	2,4	31
9	0	35	1,5	3,1	2,9	2,2	2,74±1,11	1,9	31
10	0	40	1,5	1,8	1,9	1,5	1,72±0,58	1,2	30
11	0	50	1,5	1,7	1,5	1,3	1,52±0,50	1,0	31
12	0	55	1,5	1,1	1,4	1,3	1,26±0,45	0,9	29
13	0	60	1,5	1,1	0,9	0,9	0,97±0,23	0,7	28
Примечания: КТИ – контрольная точка измерений; C_1, C_2, C_3 – концентрация поллютанта, установленная соответственно в первой, второй и третьей серии экспериментов; $\bar{C}$ – среднее значение концентрации поллютанта, ΔC – абсолютная погрешность, $C_{расчет}$ – расчетная концентрация поллютанта; D – расхождение в значениях концентрации поллютанта в контрольных точках измерения, полученных экспериментальным и расчетным способом; x, y, z – координаты КТИ в Декартовой системе координат.									

Сравнение результатов численного моделирования концентраций исследуемых загрязнителей и результатов натурных измерений для зимнего периода показали ту же тенденцию, что и для летнего периода при стилизации очага тления торфа в виде наземного холодного выброса поллютантов. В целом, ожидаемо, мощность выброса дымовых газов в зимний период была приблизительно на 20 % меньше, чем в летний период, соответственно меньшими были и концентрации угарного газа и взвешенных частиц. Расхождение измеренных и расчетных концентраций угарного газа составило 4-28 %, $PM_{2,5}$ – 10-32 %, PM_{10} – 4-31 %.

Выводы по третьей главе

1. Теоретически обоснована применимость известной К-теории к процессу распространения дымовых газов вблизи тлеющего торфяника. На основании К-теории разработана оригинальная модель распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного источников горения торфа.

2. Проведенные экспериментальные и расчетные исследования показали, что локальный очаг горения торфа, тлеющий в беспламенном режиме, может быть отнесен к наземным холодным источникам выброса, если разница температур отходящих газов и окружающей среды не превышает 50–60 °С. Результаты натурных экспериментов доказали, что в данном случае не наблюдается мощного конвективного подъема дымовых газов из-за относительно низкой разницы их температуры и температуры атмосферного воздуха и относительно низкой мощности выброса.

3. Сопоставление результатов измерительных и численных исследований показало, что при моделировании распространения угарного газа и взвешенных частиц в окрестности локального очага горения торфа, стилизованного в виде низкого холодного источника, в непосредственной близости от него – на расстоянии 5 м и менее – расчетные концентрации поллютантов оказывались на 12-26% более завышенными, чем экспериментальные. А на расстоянии более 10 м расчетные концентрации убывали быстрее экспериментальных, выравниваясь в значениях на удалении более 40 м.

В целом отклонение расчетных концентраций от реально измеренных не превышало 32 %, что свидетельствует об адекватности разработанной модели и позволяет ее использовать для прогнозирования распространения поллютантов вблизи реально действующего торфяного пожара [172-175].

4. В ходе сравнительного анализа результатов экспериментальных измерений и численных исследований было также установлено, что для более легкой примеси (угарного газа) расчетные концентрации менее значительно

отклонялись от измеренных (4-28 %), чем для более тяжелых примесей PM_{10} и $PM_{2.5}$, для которых отклонение достигало 4-32 %.

Это позволяет сделать вывод о том, что характер распространения мелкодисперсных взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ незначительно отличается от аэродинамики газов, хотя они медленнее диффундируют в воздушном пространстве, и изменение профиля концентраций носит более сглаженный характер.

5. Из анализа расчетных данных следует, что при стилизации источника в виде наземного холодного источника при положительной температуре окружающей среды (в летний период) максимум концентрации в приземном слое атмосферы значительно выше, чем при стилизации его в виде горячего источника при той же мощности выброса. Для наземного источника неблагоприятная стратификация является инверсионной, большей частью проявляющейся в ночное время и способствующей накоплению опасных примесей в атмосфере.

4 Методика прогнозирования и мониторинга чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара

4.1 Описание комплексной методики прогнозирования чрезвычайного воздействия продуктов горения торфяного пожара на автотранспортный процесс

В качестве объекта исследования нами была изучена чрезвычайная ситуация, возникшая в результате горения торфяных залежей в Иркутской области осенью-зимой 2015-2016 гг. Известно, что в Белореченском, Тельминском, Железнодорожном, Большееланском, Новожилкинском районах области был введен режим чрезвычайной ситуации с 24.12.2015 по 29.12.2015. В результате высокого задымления автотрассы движение на ФАД Р-255 «Сибирь» было практически остановлено, что вызвало серьезный транспортный коллапс в регионе.

Для прогнозирования опасного воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения (на автотранспортный процесс) мной была разработана методика, позволяющая проводить комплексную оценку формирования опасных концентраций угарного газа (СО) и мелкодисперсных взвешенных частиц, оценку риска для здоровья водителей и пассажиров и оценку снижения дальности видимости.

На основании полученных расчетных данных и рекомендованных критериев введения режима ЧС, установленных Приказом МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях», принимаются решения о введении режима ЧС и о приостановке движения на участке магистрали. Здесь следует отметить, что критерии ввода режима ЧС в зависимости от степени загрязнения окружающей среды нормативно установлены только в случае аварийного выброса химически опасных веществ, и режим ЧС вводится, если концентрация загрязнителя за пределами санитарно-защитной зоны превышает 5 ПДК. В отношении снижения дальности видимости

решение об отнесении явления к ЧС принимается, если видимость на дороге менее 50 м.

В Таблице. 4.1 последовательно изложены этапы реализации методики.

Таблица 4.1 – Последовательность этапов реализации методики.

	Этапы реализации методики	Примечания
1	Сбор исходных данных о качественном и количественном составе поллютантов, выделяющихся при горении торфа.	Определяются экспериментальным и аналитическим путем.
2	Сбор исходных данных о геометрических параметрах торфяного пожара как источника выброса опасных веществ.	Длина и ширина очага возгорания оцениваются визуально непосредственно на месте или с использованием аэрофотосъемки, а затем площадь S , m^2 определяется по формуле: $S = 0,8 \cdot a \cdot b$, где: a – протяженность очага пожара, м; b – ширина очага пожара, м; 0,8 – коэффициент, учитывающий неровность границ очага пожара. Тип торфа и мощность его залегания определяется по данным геологических исследований, проведенных в изучаемой области.
3	Сбор исходных геоинформационных данных местности.	Местоположение очага пожара и рельефные характеристики прилегающих территорий определяются при помощи интернет-сервисов google-map или yandex-map.
4	Характеристика торфяного пожара как источника выброса ЗВ.	Тип источника: площадной (совокупность точечных), неорганизованный. Характеристика горения: открытое поверхностное или подземное. Определяется визуально. Температура в очаге пожара измеряется экспериментально или определяется аналитически.
5	Данные о неблагоприятных погодных и климатических условиях, способствующих развитию ЧС.	Погодные и климатические условия, характерные для исследуемой территории: скорость и направление ветра, температура наружного воздуха, коэффициент стратификации атмосферы, - определяются, исходя из условий ЧС, расположения эпицентра торфяного пожара относительно автомагистрали и населенных пунктов, времени года.
6	Оценка мощности выброса ЗВ от горящего торфяника.	Мощность выброса продуктов горения, г/с, может определяться по формуле: $M = \frac{S \cdot H \cdot \rho \cdot B \cdot \alpha \cdot 1000}{t}$, где: S – площадь очага возгорания торфяника, m^2 ; H – глубина залегания торфа, м; ρ – плотность торфа, kg/m^3 ; B – массовая доля сгоревшего торфа; 1000 – коэффициент перевода г в кг; t – время горения торфа, с; α – удельная масса вредного вещества выделяющегося при сгорании 1 кг торфа, кг; или по формуле:

		$M = \frac{C \cdot W_0 \cdot S}{1000},$ где: C – концентрация поллютанта в дымовых газах, $\text{мг}/\text{м}^3$; W_0 – скорость выхода дымовых газов, $\text{м}/\text{с}$; $1/1000$ – коэффициент перевода из $\text{мг}/\text{м}^3$ в $\text{г}/\text{м}^3$; S – площадь горения, м^2
7	Численное моделирование количественных характеристик распространения опасных продуктов горения торфяного пожара в окрестности автомагистралей и населенных пунктов	Численное моделирование осуществляется при стилизации торфяного пожара, развивающегося в режиме тления, в виде холодного наземного источника. Расчеты осуществляются с использованием программных продуктов «Эколог» (НПФ «Интеграл») и «Mathematica» (Wolfram Research).
8	Построение карт загрязнения воздуха в окрестности пожара опасными компонентами продуктов горения – угарным газом и мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$.	Визуализация результатов расчета осуществляются с использованием программных продуктов «Эколог» (НПФ «Интеграл») и «Mathematica» (Wolfram Research).
9	Оценка риска здоровью участников дорожного движения	Численные исследования проводятся с использованием программного продукта «Риски» (НПФ «Интеграл»).
10	Оценка дальности видимости	Оценка дальности видимости осуществляется по формуле Траберта: $L_v = \alpha^* \cdot \frac{\rho}{q} \cdot r_e,$ где: α^* – безразмерная эмпирическая константа, учитывающая полидисперсность аэрозолей и зависимость их концентрации от координат; q – концентрация аэрозолей в воздухе, $\text{г}/\text{м}^3$; ρ – плотность аэрозолей, $\text{г}/\text{м}^3$; r_e – диаметр или эффективный диаметр аэрозолей, м.
11	Категорирование дорожной ситуации по уровню опасности	Определение категории дорожной ситуации по уровню опасности с помощью предложенных критериев ранжирования, обоснованных с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.
12	Принятие решения о вводе режима ЧС	В соответствии с Приказом МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях»: концентрация химически опасных загрязнителей – более 5 ПДК; видимость – менее 50 м.

4.2 Постановка и реализация решений задачи расчетного прогнозирования распространения опасных продуктов горения торфяного пожара вблизи автомагистрали с использованием К-модели на примере изучения закономерностей развития чрезвычайной ситуации на федеральной автодороге Р-255 «Сибирь»

Как уже упоминалось выше, особенностью торфяных пожаров является подземное горение в режиме тления с выходом продуктов горения не со всей поверхности, а из квазиравномерно распределённых точечных источников, названных нами, по аналогии с известными природными явлениями, «дымовыми гейзерами» (Рисунок 2.1), которые представляют собой, исходя из классических фундаментальных типов стилизации при физическом и математическом моделировании выбросов продуктов горения в атмосферу в нормативном документе [97], - совокупность однотипных наземных точечных источников, что позволяет их стилизовать в виде наземного холодного источника выбросов опасных веществ.

В похожих ситуациях, например, при прогнозировании загрязнения атмосферного воздуха в городах источниками бытового (печного) отопления с большим числом практически однотипных дымовых труб, рассредоточенных на некоторой территории города, выбросы каждой из которых по отдельности (из-за огромного их количества) трудно учитываемы, Берлянд, Генихович, Гиффорд, Ханн и другие ученые [94, 97, 98] рекомендуют выполнять прогноз концентраций поллютантов как для площадного источника, как бы условным суммированием действия совокупности отдельных единичных источников, путем назначения их числа в качестве исходного параметра для проведения расчетного прогноза мощности выброса – приведением мощности выброса поллютантов к псевдоплощадному источнику. Такой подход моделирования нашел, например, широкое применение в передовых отечественных и мировых практиках прогнозов загрязнения атмосферы от огромного количества одновременно эксплуатируемых транспортных средств на городских автомагистралях [99-111].

В исследуемом случае торфяного пожара в Усольском районе имелся достаточно большой объем исходных данных о пожаре, обнародованных управлениями МЧС, Росгидромета и Министерством лесного комплекса по Иркутской области о площади пожара, суточном прогорании торфа, метеорологических условиях. Кроме того,

периодически проводились измерения концентраций угарного газа в близлежащих поселках, и в on-line режиме передавались видеоизображения с места ЧС. На основании анализа этих данных было установлено, что пожар развился на территории площадью приблизительно 20 га, на площади в 1 га находилось от 8 до 21 «дымовых гейзеров», суточное прогорание торфа по приблизительным оценкам составило 22,7-26,8 т. По литературным источникам [93] было выявлено, что при сгорании 1 кг торфа выделяется 0,41 кг СО и 0,12 кг СО₂. В этом случае условная мощность выброса СО от площадного источника составила 108-127 г/с. Расчетные мощности выброса взвешенных частиц, определенные с учетом формул 3.20 и 3.21, находились в диапазоне 14,5-16,5 г/с для РМ_{2,5} и от 15,5-18,5 г/с для РМ₁₀. Анализ видеоматериалов позволил сделать вывод о том, что отдельные «дымовые гейзеры» находились друг от друга на достаточном удалении, чтобы их дымовые факелы не оказывали влияния на газодинамические характеристики друг друга, и что скорость выхода газовой смеси составляла 1,5-2,5 м/с.

На основании этих данных, были разработаны несколько прогнозных сценариев развития ЧС на автомагистрали от воздействия продуктов горения торфяного пожара с целью определения экстремально опасных условий для транспортного процесса. Для примера приведем результаты расчетов по четырем прогнозным сценариям.

Расчетное исследование осуществлялось по двум сценариям (вариантам расчета) для так называемых нормально неблагоприятных метеоусловий (далее ННМУ) – 1-ый и 2-ой сценарии, и по двум сценариям для аномально неблагоприятных метеоусловий (далее АНМУ) – 3-ий и 4-ый сценарии. В качестве исходных данных о характеристике торфяного пожара в первом и втором расчетном сценариях была использована вышеописанная фактически установленная информация. Отличались сценарии друг от друга только характеристиками скорости и направления ветра. Третий и четвертый прогнозный сценарии – гипотетические. Мы предположили, что площадь пожара увеличится в два раза по сравнению с первым и вторым сценариями, скорость ветра снизится до 0,5-1 м/с. Кроме того, четвертый сценарий подразумевал еще одно неблагоприятное условие – образование тумана, способствующего накоплению загрязнителей в приземном воздухе и снижению видимости. Варианты исходных данных для четырех прогнозных сценариев представлены в Таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Исходные данные для четырех вариантов расчета.

Исходные данные для расчета/	Сценарий 1	Сценарий 2	Сценарий 3	Сценарий 4
Определяемые поллютанты	CO, PM _{2.5} , PM ₁₀	CO, PM _{2.5} , PM ₁₀	CO, PM _{2.5} , PM ₁₀	CO, PM _{2.5} , PM ₁₀
Направление ветра	Переменное	В сторону автомагистрали	В сторону автомагистрали	В сторону автомагистрали
Скорость ветра	2-5 м/с	1-2 м/с	0,5-1 м/с	0,5-1 м/с
Отдаленность автомагистрали	2-5 км	2-5 км	2-5 км	2-5 км
Площадь пожара, га	~20 га	~20 га	~40 га	~40 га
Температура воздуха, °C	От -20 до -10 °C	От -20 до -10 °C	От -20 до -10 °C	От -20 до -10 °C
Коэффициент стратификации атмосферы	180	180	250	250
Скорость выхода газовой смеси	1,5-2,5 м/с	1,5-2,5 м/с	1,5-2,5 м/с	1,5-2,5 м/с
Мощность выброса	CO – 108-127 г/с; PM _{2.5} – 14,5-16,5 г/с; PM ₁₀ – 15,5-18,5 г/с	CO – 108-127 г/с; PM _{2.5} – 14,5-16,5 г/с; PM ₁₀ – 15,5-18,5 г/с	CO – 232-271 г/с; PM _{2.5} – 23,5-33 г/с; PM ₁₀ – 34-41,5 г/с	CO – 232-271 г/с; PM _{2.5} – 23,5-33 г/с; PM ₁₀ – 34-41,5 г/с
Туман	-	-	-	+

Результаты расчетов по первому сценарию, когда метеорологические условия способствуют рассеиванию продуктов горения в атмосфере, показывают, что вблизи участка автотрассы, наиболее близкого к эпицентру пожара (расстояние около 1 км), концентрации угарного газа могут достигать уровня 0,37-1,23 мг/м³, а концентрации РМ₁₀ и РМ_{2,5} соответственно 0,08-0,25 мг/м³ и 0,06-0,18 мг/м³. Эти показатели незначительно превышают максимально разовые ПДК (до 1,12 раз по РМ_{2,5}), но существенно превышают среднесуточные: по РМ₁₀ – до 4 раз и по РМ_{2,5} – до 5 раз, что свидетельствует о высоком риске для здоровья населения, проживающего в близлежащих поселках.

Результаты расчетов по второму сценарию, близкому к реальным условиям ЧС, случившейся в Иркутской области вблизи ФАД Р-255 «Сибирь», показывают, что при ветре, дующем в направлении магистрали со скоростью менее или равной 2 м/с, концентрации угарного газа достигают значений 0,56-1,73 мг/м³, а концентрации РМ₁₀ и РМ_{2,5} – соответственно 0,15-0,45 мг/м³ и 0,1-0,3 мг/м³. Таким образом, результаты расчетов свидетельствуют о том, что в таких условиях в придорожной воздушной среде могут формироваться концентрации поллютантов, опасные для здоровья участников дорожного движения с превышением максимально разовых ПДК взвешенных частиц РМ₁₀ до 1,5 раз и РМ_{2,5} до 1,9 раз.

Результаты расчетов распространения угарного газа и взвешенных частиц вблизи торфяного пожара по второму сценарию визуализированы на Рисунках 4.1-4.2.

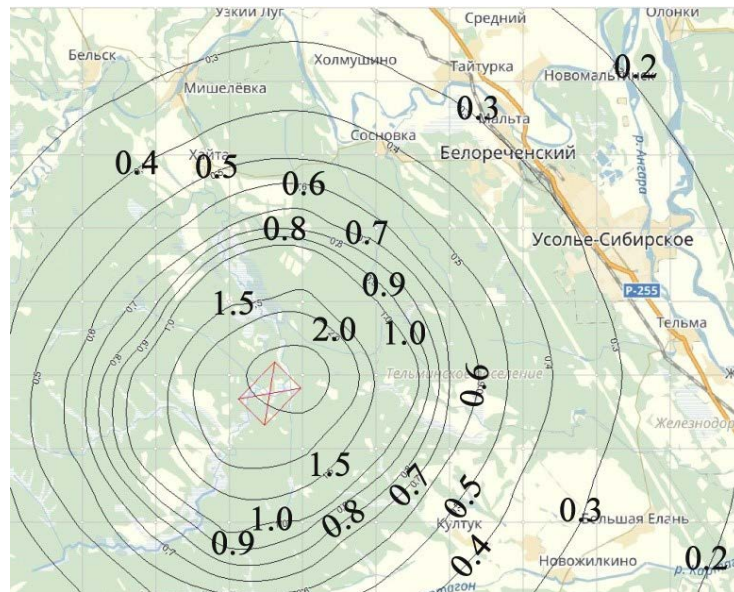


Рисунок 4.1 – Визуализация модельных вычислений распространения угарного газа на локальном уровне в окрестности торфяного пожара по второму сценарию, полученных по К-модели (по показателям превышения ПДК_{МР}), построенной с использованием программного обеспечения «Эколог» фирмы «Интеграл»

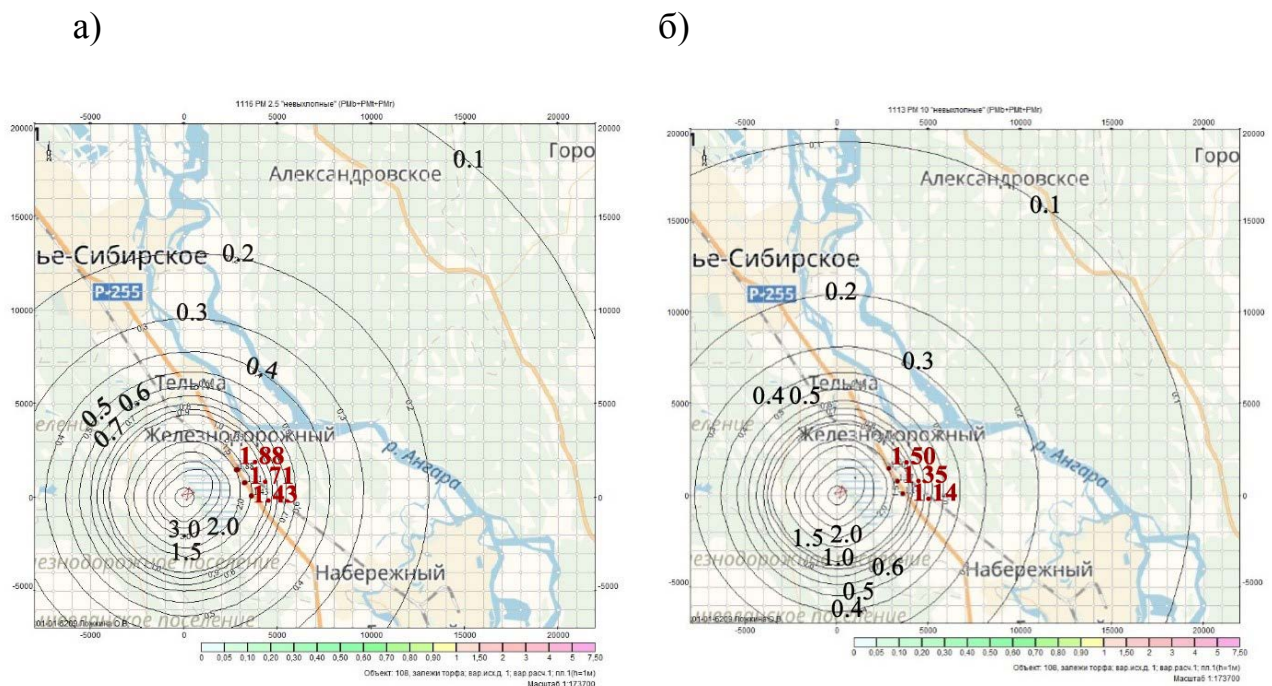


Рисунок 4.2 – Визуализация модельных вычислений распространения взвешенных частиц PM_{10} (а) и $PM_{2.5}$ (б) по второму сценарию на локальном уровне в окрестности торфяного пожара, полученных по К-модели (по показателям превышения ПДК_{МР}), построенной с использованием программного обеспечения «Эколог» фирмы «Интеграл»

Расчеты по третьему гипотетическому прогнозному сценарию развития ЧС проводились из предположений, что площадь пожара в два раза больше, чем по первому и второму сценарию, ветер дует в направлении автомагистрали с опасной скоростью 1-3 м/с, наблюдается температурная инверсия.

Результаты свидетельствуют о том, что при таких аномально неблагоприятных условиях формируются опасно высокие концентрации СО с превышением ПДК_{МР} в 1,2-1,5 раза, РМ₁₀ с превышением ПДК_{МР} в 2,5-7,0 раза и РМ_{2,5} с превышением ПДК_{МР} в 4,5-11,5 раз.

Результаты расчетов распространения угарного газа и взвешенных частиц вблизи торфяного пожара по третьему сценарию визуализированы на Рисунках 4.3-4.4.

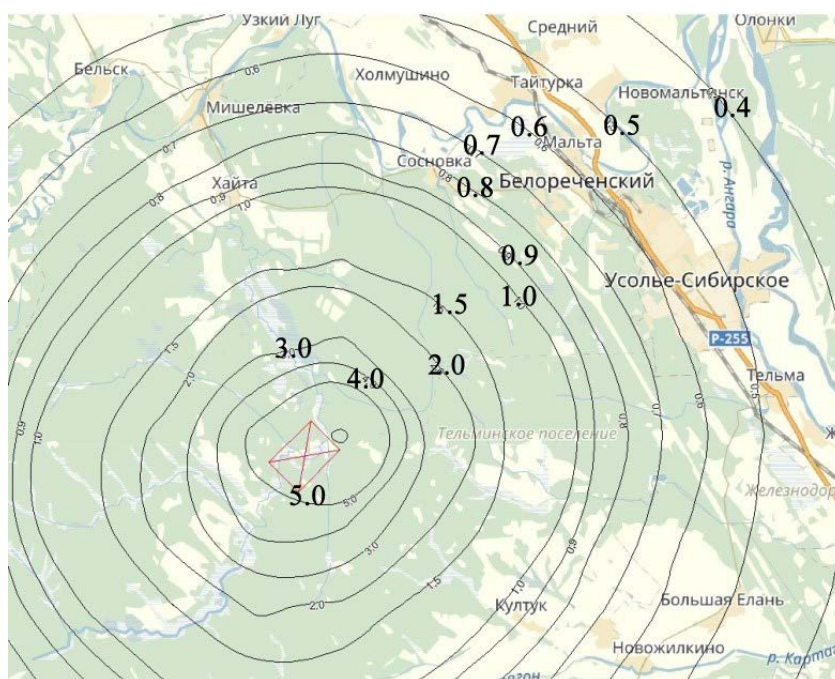
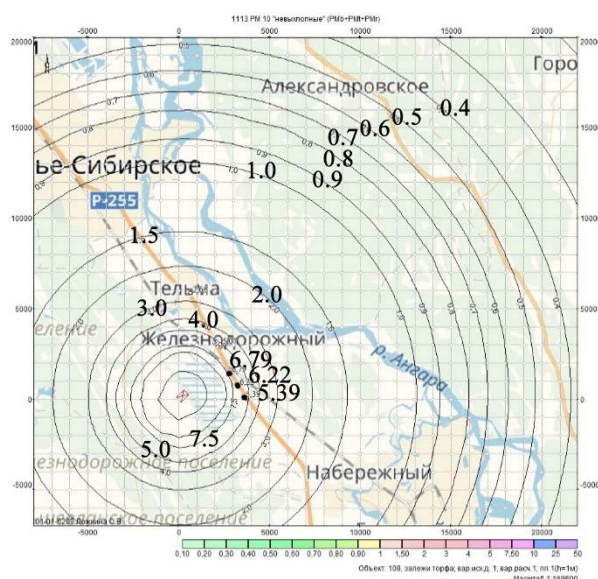


Рисунок 4.3 – Визуализация модельных вычислений распространения угарного газа на локальном уровне в окрестности торфяного пожара по третьему сценарию, полученных по К-модели (по показателям превышения ПДК_{МР}), построенной с использованием программного обеспечения «Эколог» фирмы «Интеграл»

а)



б)

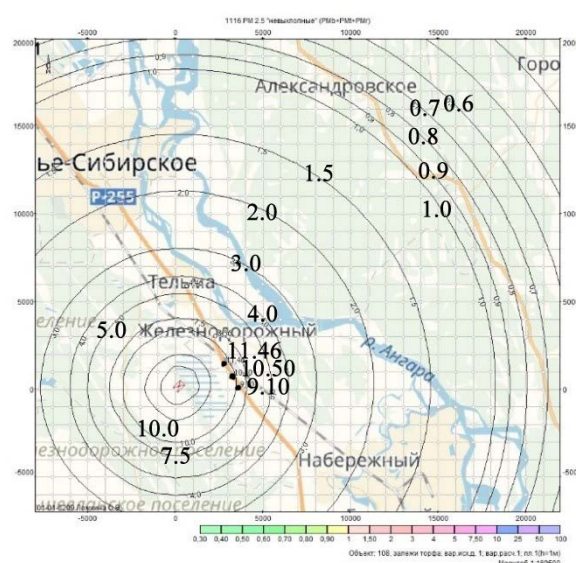


Рисунок 4.4 – Визуализация модельных вычислений по третьему сценарию распространения взвешенных частиц PM_{10} (Рисунок 4.4 а) и $PM_{2.5}$ (Рисунок 4.4 б) на локальном уровне в окрестности торфяного пожара, полученных по К-модели (по показателям превышения $ПДК_{МР}$), построенной с использованием программного обеспечения «Эколог» фирмы «Интеграл»

Как уже отмечалось выше, в разделах 1.2.3 и 1.3.4, особую опасность представляет «суперсмог», образующийся, как правило, в ночное время суток в результате взаимодействия дыма природного пожара и радиационного тумана. Отечественными и зарубежными учеными [115, 131-136] было доказано, что взаимное синергетическое влияние этих явлений приводит, с одной стороны, к концентрированию загрязнителей в приземной атмосфере, а с другой – к уменьшению размера капель воды и, соответственно, к повышению водности и плотности тумана.

Такая ситуация изучалась мной в четвертом сценарии. В результате численных исследований было установлено, что концентрации угарного газа оказались в 1,5-1,6 раз выше, концентрации $PM_{2.5}$ в 1,7-1,9 раз выше, концентрации PM_{10} в 1,5-1,7 раз выше по сравнению с третьим сценарием. Превышение концентраций загрязнителей относительно $ПДК_{МР}$ составило 1,9-2,5 $ПДК$ по CO , 7-20 $ПДК$ по $PM_{2.5}$ и 4-11 $ПДК$ по PM_{10} . Очевидно, что ситуация

образования «суперсмога» в условиях аномально неблагоприятных метеоусловий является чрезвычайной и представляет серьезную опасность для жизнедеятельности людей.

4.3 Применение дифференциально-нейросетевого моделирования для прогнозирования загрязнения воздуха автомагистрали продуктами горения торфяного пожара

4.3.1 Обоснование применимости метода искусственных нейронных сетей для моделирования переноса продуктов горения в окрестности торфяного пожара

Для разработки иерархической системы прогнозирования в разных пространственно-временных масштабах развития ЧС, обусловленных природными пожарами, представляется актуальным привлечение метода искусственных нейронных сетей.

Построение иерархических моделей сопряжено с рядом объективных трудностей: иерархическая система прогнозирования строится на нескольких уровнях, и каждому уровню соответствует свой набор математических моделей с собственными параметрами, начальными и граничными условиями. При классическом подходе при переходе с одного уровня на другой, а также в случае необходимости учета влияния изменившихся внешних условий или воздействия соседних областей, требуется повторное формирование и пересылка больших массивов новой информации в виде чисел.

Профессором А.Н. Васильевым и профессором Д.А. Тарховым (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет им. Петра Великого) была разработана нейросетевая модель прогнозирования загрязнения воздушной среды в мегаполисах на мезо-уровне на примере Санкт-Петербурга [160, 161].

Как отмечалось выше, большинство моделей пространственно-временной эволюции загрязняющих примесей в атмосфере строятся на уравнениях в частных производных с граничными и начальными условиями (назовем их условно

«уравнения»), и оптимизируются или обучаются по результатам экспериментальных измерений ключевых параметров: скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, концентрации загрязнителей на разном удалении от источника (назовем их условно «набор данных»).

Преимуществами разработанного А.Н. Васильевым и Д.А. Тарховым метода является, во-первых, возможность построения самообучающейся по результатам изменяющихся наблюдений нейросетевой модели, а во-вторых, возможность построения иерархии нейросетевых моделей для каждого из случаев («уравнения» или «наборы данных») и в смешанной гетерогенной ситуации («уравнения + наборы данных»). Кроме того, данная модель позволяет передавать информацию из одной расчетной области в другую не в виде большого массива чисел, а в виде готовой параметризованной нейросетевой модели, в которой уже заложены зависимости от возможных изменений внешних условий или результатов измерений.

При моделировании процесса распространения продуктов горения в неблагоприятных метеорологических условиях: во время штиля и температурной инверсии – оправдано использование К-модели.

Однако при установившейся более 2 м/с ветровой нагрузке для моделирования переноса продуктов горения на мезо-уровне обосновано применение более простой по математическому аппарату Гауссовой модели. Используя зависимость Гаусса, нами была разработана нейросетевая модель прогнозирования распространения дымового смога от тлеющего торфяника.

При устойчивой скорости ветра 2-10 м/с шлейф дыма от источника горения торфа приобретает вытянутую колоколообразную геометрическую форму, похожую в сечении на распределение Гаусса, что дает нам основание для использования этой зависимости (Рисунок 4.5).

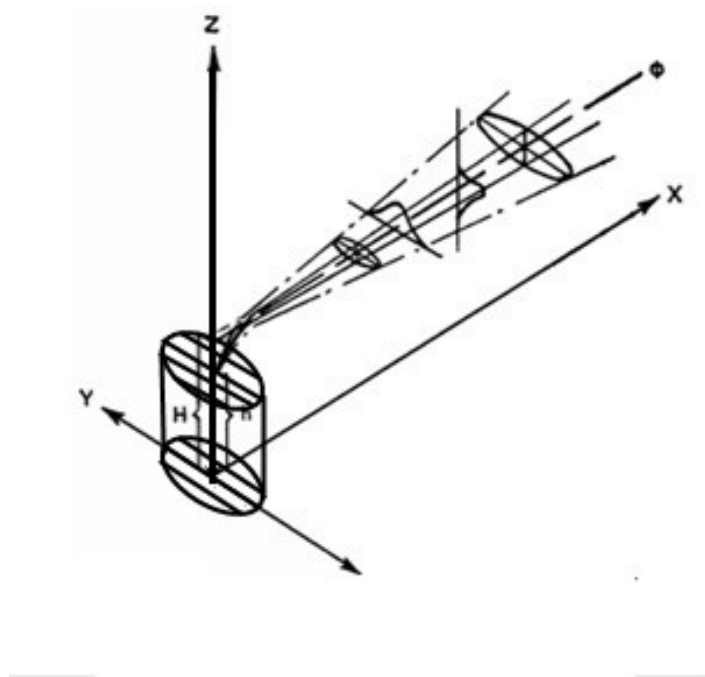


Рисунок 4.5 – Схематическое изображение распространения продуктов горения от торфяного пожара по модели Гаусса: h – высота источника; H – высота начального подъема облака смога

Согласно принятому подходу, изменение концентрации продуктов горения (C) будет подчиняться нормальному закону распределения:

$$C(t, x, y, z) = \frac{M \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-x_0-Ut)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-z_0)^2}{(\sigma_z)^2 t}\right)\right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (4.1)$$

где: x_0, y_0, z_0 – координаты источника эмиссии, м; M – мощность эмиссии, г/с; U – скорость ветра вдоль координатной оси Ox , м/с; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – средние квадратичные отклонения координат поллютанта в момент времени t соответственно вдоль координатных осей Ox, Oy, Oz .

Применение принципа суперпозиции позволяет из (4.1) получить выражение для расчета концентрации поллютанта:

$$C(t, x, y, z) = \int_0^t \frac{Q \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x-x_0-Ut)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y-y_0)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z-z_0)^2}{(\sigma_z)^2 t}\right)\right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z} dt. \quad (4.2)$$

Использование кубатурных формул позволяет избежать сложностей, возникающих при вычислениях интеграла, за счет его замены конечной суммой:

$$C_n(t, x_i, y_i, z_i) = \sum_{i=1}^N R_i \frac{\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{(x_i-x_0-V_x t)^2}{(\sigma_x)^2 t} + \frac{(y_i-y_0)^2}{(\sigma_y)^2 t} + \frac{(z_i-z_0)^2}{(\sigma_z)^2 t}\right)\right)}{(\sqrt{2\pi t})^3 \sigma_x \sigma_y \sigma_z}, \quad (4.3)$$

где: R_i – числовой коэффициент, $x_i \in [0; t]$, $i=0,1,2,3, \dots, n$ – узлы интегрирования.

Уравнение (4.3) для концентрации поллютанта (С) можно рассматривать как модель, соответствующую искусственной нейронной сети с радиальной базисной функцией. В рассматриваемом случае расчета концентрации продуктов горения на разном удалении от торфяного пожара (условного точечного или площадного источника выброса ЗВ) базисная функция – Гауссиан.

При моделировании переноса дымовых газов торфяного пожара на большие расстояния теряют значимость процессы турбулентной диффузии, что позволяет переходить к более простым Гауссовым моделям. Большие возможности для развития численных подходов сценарного моделирования представляют современные нейросетевые методы, преимущество которых является возможность самообучения по результатам наблюдений и расчетам, а также возможность вычислений без повторного решения дифференциальных уравнений в частных производных для разных наборов входных параметров.

4.3.2 Нейросетевой подход в решении задачи прогнозирования загрязнения воздуха автомагистрали продуктами горения торфяного пожара

Подобный подход был развит для моделирования распространения угарного газа, выделяющегося с продуктами горения торфяного пожара, для изучаемой ЧС в рамках совместного гранта РФФИ Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого и Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России.

Разработанный авторами нейросетевой метод моделирования [160, 161] относится к мезо-масштабному типу. Его специфика обусловлена взаимодействием двух объектов исследования – автодороги с интенсивным движением, находящейся в зоне влияния торфяного пожара, и аномально

неблагоприятными для рассеивания опасных загрязнителей погодными условиями. Это определило оригинальность архитектуры вычислительного процесса прогнозирования переноса угарного газа и взвешенных частиц дымового шлейфа торфяного пожара в окрестности автомагистрали.

Разработанная функциональная параметрическая модель в форме нейронных сетей позволила осуществить сценарное моделирование ЧС для разных наборов входных параметров [173-177], в частности, скорости и направления ветра, с использованием гетерогенной расчетно-экспериментальной информации об интенсивности эмиссии продуктов горения от торфяного пожара. Обучалась модель по данным реального транспортного коллапса, наблюдавшегося с 26.10.15 г. по 07.01.16 г. в Иркутской области РФ при горении торфа вблизи автомагистрали федерального значения «Сибирь».

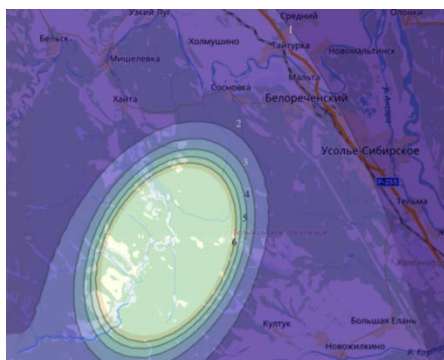
Настройка весов сети линейно и нелинейно входящих параметров в уравнение (4.3) осуществлялась на основе минимизации функционала ошибки, взятого в дискретной форме:

$$J = \sum_{j=1}^P |q(t, \bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j; u, v, w) - q_j(t, u, v, w)|^2, \quad (4.4)$$

где: $\{(\bar{x}_j, \bar{y}_j, \bar{z}_j)\}_{j=1}^P$ – множество точек в области Ω , где известны измеренные значения концентрации $\{q_j\}_{j=1}^P$ угарного газа.

На Рисунке 4.6 представлены результаты модельных вычислений по нейросетевой модели распространения угарного газа на мезо-уровне в окрестности торфяного пожара по второму сценарию (а) и по третьему сценарию (б) (по значению концентраций, мг/м³). При этом модель настраивалась (обучалась) по ранее полученной гетерогенной экспериментально-расчетной информации о концентрациях СО в различных рецепторных точках (Таблица 4.2).

а)



б)

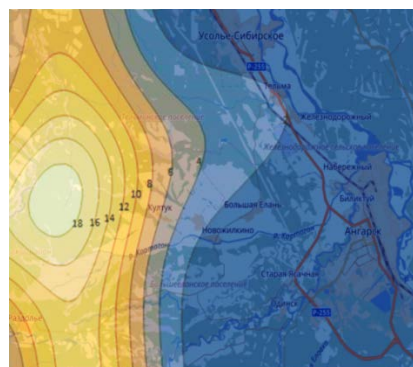


Рисунок 4.6 – Визуализация модельных вычислений распространения угарного газа на мезо-уровне в окрестности торфяного пожара по второму сценарию (а) и по третьему сценарию (б), по нейросетевой модели (по значению концентраций, $мг/м^3$), построенной с использованием программного обеспечения Mathematica компании Wolfram Research (число нейронов $N=4$)

Важным преимуществом апробированного нейросетевого подхода моделирования является возможность использования гетерогенных данных: упрощенных уравнений атмосферной диффузии веществ в виде дифференциальных уравнений в частных производных, данных расчета на основе функции нормального распределения Гаусса, результатов полевых измерений концентрации СО в окрестности торфяного пожара. Разработанный метод является перспективным для развития систем контроля, прогнозирования опасного загрязнения воздуха продуктами горения природных пожаров с целью предупреждения и минимизации ущерба, оказываемого ими на жизнедеятельность, в том числе транспортную деятельность населения [176-178].

Выводы по четвертой главе

1. Разработана методика для прогнозирования чрезвычайного воздействия продуктов горения торфяного пожара на условия и участников дорожного движения с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц, снижения дальности видимости, риска для здоровья водителей и пассажиров.

2. Проведено обучение и адаптация разработанной модели распространения продуктов горения вблизи тлеющего торфяника к реальным объектам по данным изучения закономерностей развития ЧС на ФАД Р-255 «Сибирь», вызванной

торфяным пожаром, по четырем прогнозным сценариям, различающимся набором исходных данных об очаге пожара и метеорологических условиях.

3. Установлено, что для так называемых нормально неблагоприятных (достаточно часто регистрируемых) метеорологических условий (стратификация атмосферы $\sim 180\text{--}200$, скорость ветра ~ 2 м/с, направление ветра – в сторону автодороги) концентрация СО в придорожном воздухе может достигать значений $0,56\text{--}1,73$ мг/м³, а концентрации РМ₁₀ и РМ_{2,5} соответственно $0,15\text{--}0,45$ мг/м³ (превышение ПДК_{МР} до 1,5 раз) и $0,1\text{--}0,3$ мг/м³ (превышение ПДК_{МР} до 1,9 раз).

Расчетные оценки, выполненные для вероятных аномально неблагоприятных метеоусловий и состояния атмосферы (стратификация атмосферы ~ 250 , скорость ветра менее 1 м/с, направление ветра – в сторону автодороги), существенно затрудняющих протекание естественных физических процессов конвективного газообмена, показывают, что в таких условиях формируются повышенные концентрации СО с превышением ПДК_{МР} в 1,2-1,5 раза и опасно высокие концентрации РМ₁₀ с превышением ПДК_{МР} в 2,5-7,0 раза и РМ_{2,5} с превышением ПДК_{МР} в 4,5-11,5 раз.

Посредством численных исследований было выявлено, что особую опасность представляет ситуация образования «суперсмога» в результате взаимодействия дыма природного пожара и радиационного тумана. В этом случае имеет место взаимное влияние водного аэрозоля и поллютантов, приводящее к одновременному концентрированию (аккумуляции) загрязнителей в приземной атмосфере и уменьшению размера капель воды, сопровождающемуся повышением влажности и плотности тумана. Прогнозные оценки показали, что превышение концентраций поллютантов относительно ПДК_{МР} составило 1,9-2,5 ПДК по СО, 7-20 ПДК по РМ_{2,5} и 4-11 ПДК по РМ₁₀. Очевидно, что ситуация образования «суперсмога» в условиях аномально неблагоприятных метеоусловий является чрезвычайной и представляет серьезную опасность для жизнедеятельности людей.

4. Полученные прогнозные значения хорошо коррелировали с результатами натурных измерений Росгидромета, что свидетельствовало об эффективности

разработанной методики и позволило использовать расчетные значения концентраций угарного газа и взвешенных частиц наряду с измеренными для построения модели загрязнения воздуха дымовыми газами на мезо-уровне с помощью современного метода гетерогенного нейросетевого моделирования с использованием в качестве радиальной базисной функции Гауссиана.

Разработанная функциональная параметрическая модель в форме нейронных сетей, позволяющая осуществлять прогнозное моделирование ЧС для разных наборов входных параметров, перспективна для развития систем контроля, прогнозирования опасного загрязнения воздуха продуктами горения природных пожаров с целью предупреждения и минимизации ущерба, оказываемого ими на жизнедеятельность, в том числе транспортную деятельность населения.

5 Оценка опасного воздействия продуктов горения (СО, РМ₁₀ и РМ_{2.5}) на участников и условия дорожного движения

5.1 Обоснование критериев ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности с учетом риска для здоровья и снижения дальности видимости

Как уже отмечалось выше, опасное действие продуктов горения природных пожаров, в первую очередь, угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц РМ_{2.5} и РМ₁₀ на условия и участников транспортного процесса заключается, во-первых, в негативном воздействии на самочувствие и психоэмоциональное состояние водителей и пассажиров, а, во-вторых, в существенном ограничении видимости из-за задымления, что в совокупности повышает риск возникновения ДТП, а при неблагоприятных метеорологических условиях может привести к серьезным авариям.

В действующем ведомственном Приказе МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях» критерии ввода режима ЧС в зависимости от степени загрязнения окружающей среды установлены только для аварийного выброса химически опасных веществ: режим ЧС вводится, если концентрация загрязнителя за пределами санитарно-защитной зоны превышает 5 ПДК. В отношении снижения дальности видимости решение об отнесении явления к ЧС принимается, если видимость на дороге менее 50 м. Установленные критерии могут использоваться как референтные, однако для адекватного прогнозирования ЧС на автомагистрали от воздействия продуктов горения торфяного пожара потребовалась разработка более детальных, научно обоснованных критериев ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

Для оценки риска острого воздействия продуктов горения торфяного пожара (в зависимости от концентрации поллютантов) на участников дорожного движения обосновано использование действующего на территории Российского

Федерации «Руководства Р 2.1.10.1920-04 по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду», а также ряда дополнительных методик, утвержденных Роспотребнадзором, которые положены в основу программного продукта «Риски» фирмы «Интеграл» (Санкт-Петербург), входящего в программный комплекс «Эколог». При установлении величины потенциального риска острого действия используется модель индивидуальных порогов действия, а в качестве эффекта оценивается вероятность проявления рефлекторных реакций (Приложение Б). При ингаляционном воздействии угарного газа к рефлекторным реакциям относятся утомляемость, головная боль, снижение физической активности, боль в груди (вследствие воздействия на сердечно-сосудистую систему), а взвешенных частиц – проявление респираторных (кашель, слезотечение, чихание из-за раздражения верхних дыхательных путей) и сердечно-сосудистых (головная боль, головокружение, боль в груди) симптомов [179, 180]. Данный подход оправдан при уровне загрязнения окружающей среды до 15–20 ПДК [179, 180].

В Таблице 5.1 приведены характеристики потенциального риска острого воздействия опасных продуктов горения на здоровье населения. Риск негативного воздействия зависит от природы опасного вещества (оксид углерода относится к четвертому классу опасности, а взвешенные частицы – к третьему), концентрации поллютантов и времени экспозиции. Максимально разовые концентрации и риск острого воздействия определяются для 20-30-минутной экспозиции.

Таблица 5.1 – Ранжирование риска острого воздействия опасных продуктов горения на здоровье населения.

Риск		Негативные эффекты	Взвешенные частицы	Оксид углерода
< 0,02	Приемлемый	Возможны редкие случаи дискомфортных состояний и рефлекторных реакций у сверхчувствительных групп населения	Незначительная вероятность проявления респираторных симптомов у сверхчувствительных групп населения	Незначительная вероятность снижения физической активности у лиц, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями
0,02–0,16	Удовлетворительный	Возможны частые случаи дискомфортных состояний и рефлекторных реакций у чувствительных групп населения	Увеличение вероятности проявления респираторных симптомов и усиления заболеваний сердца и легких у чувствительных лиц	Возрастание вероятности снижения физической активности вследствие проявления сердечно-сосудистых симптомов (боль в груди) у лиц, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями
0,17–0,49	Неудовлетворительный	Систематическое проявление дискомфортных состояний и рефлекторных реакций у всех групп населения	Увеличение респираторных симптомов и усиление заболеваний сердца и легких в общей популяции; возможна преждевременная смерть людей с заболеваниями сердца и легких, а также лиц пожилого возраста	Снижение физической активности вследствие проявления сердечно-сосудистых симптомов (боль в груди) у лиц, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями
0,5–0,85	Опасный	Массовое проявление дискомфортных состояний и рефлекторных реакций у всех групп населения; появление опасных патологических изменений, специфически связанных с воздействием фактором	Выраженное усиление заболеваний сердца и легких, серьезное увеличение респираторных эффектов в общей популяции; увеличение вероятности преждевременной смерти людей с заболеваниями сердца и легких, а также лиц пожилого возраста	Выраженное усиление сердечно-сосудистых симптомов (боль в груди) у лиц, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями; снижение физической активности в общей популяции
0,86–1,0	Чрезвычайно опасный	Проявление острого отравления, тенденция к росту смертности	Значительное увеличение тяжести респираторных и сердечно-сосудистых симптомов в общей популяции; преждевременная смерть людей с заболеваниями сердца и легких, а также лиц пожилого возраста	Значительное усиление сердечно-сосудистых симптомов (боль в груди) у лиц, страдающих сердечно-сосудистыми заболеваниями; значительное снижение способности выполнять физическую нагрузку у здоровых лиц

В вопросе ранжирования дорожной ситуации в зависимости от условий видимости я руководствовался ПДД РФ, где дается четкое определение понятия «недостаточная видимость» («недостаточная видимость – видимость дороги менее 300 м в условиях тумана, дождя, снегопада и тому подобного, а также в сумерки»), рекомендациями по соблюдению скоростного режима в условиях недостаточной видимости, изложенными в Строительных правилах СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги». Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* с Изменением № 1 (Приложение Б) и Приказом МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях», где в качестве такового приведено значение видимости – 50 м и менее. Предложенные мною критерии ранжирования дорожной ситуации в зависимости от видимости на дороге представлены в Таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Ранжирование дорожной ситуации в зависимости от видимости на дороге.

Ситуация	Приемлемая	Удовлетв.	Неудовлетв.	Опасная	Чрезвычайная
Видимость, м	≥ 800	300–799	130–299	51–129	≤ 50

Оценка снижения дальности видимости в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы осуществлялась с использованием подхода Траберта, описанного в разделе 2.4 рукописи диссертации.

5.2 Прогнозирование чрезвычайных ситуаций на автомагистрали от воздействия продуктов горения торфяного пожара (CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$) на примере исследования ЧС на федеральной автодороге Р-255 «Сибирь»

В Таблице 5.3 приведены данные экспериментальных измерений, полученные Иркутским управлением Росгидромета в ходе наблюдений во время ЧС зимой 2016-2017 гг., а также результаты прогнозных вычислений концентраций угарного газа и взвешенных частиц, полученные с помощью разработанной методики, по второму, третьему и четвертому сценариям, описанным в разделе 4.2 диссертации.

Таблица 5.3 – Сравнение измеренных и расчетных концентраций поллютантов.

	Сценарий	п. Тельма	п. Железнодорожный	ФАД Р-255 «Сибирь», 1820 км	ФАД Р-255 «Сибирь», 1822 км	ФАД Р-255 «Сибирь», 1824 км
СО _{изм} , мг/м ³ (доли ПДК)	Данные измерений	0,5 (0,1)	0,97 (0,19)	1,42 (0,28)	1,15 (0,23)	1,01 (0,20)
СО _{расчет} , мг/м ³ (доли ПДК)	2	0,56 (0,112)	1,22 (0,244)	1,73 (0,346)	1,57 (0,314)	1,31 (0,262)
	3	3,17 (0,634)	6,09 (<u>1,218</u>)	8,15(<u>1,63</u>)	7,47 (<u>1,494</u>)	6,47 (<u>1,294</u>)
	4	4,81(0,96)	9,23 (<u>1,85</u>)	12,63 (<u>2,53</u>)	10,2 (<u>2,04</u>)	10,35 (<u>2,07</u>)
PM _{2.5} расчет, мг/м ³ (доли ПДК)	2	0,1 (0,625)	0,21 (<u>1,31</u>)	0,3 (<u>1,88</u>)	0,27 (<u>1,69</u>)	0,23 (<u>1,44</u>)
	3	0,71 (<u>4,44</u>)	1,37 (<u>8,56</u>)	1,83 (<u>11,44</u>)	1,68 (<u>10,5</u>)	1,46 (<u>9,13</u>)
	4	1,15 (<u>7,19</u>)	2,18 (<u>13,6</u>)	3,18 (<u>19,88</u>)	2,97 (<u>18,56</u>)	2,58 (<u>16,13</u>)
PM ₁₀ расчет, мг/м ³ (доли ПДК)	2	0,15 (0,5)	0,32 (<u>1,07</u>)	0,45 (<u>1,5</u>)	0,41 (<u>1,37</u>)	0,34 (<u>1,13</u>)
	3	0,79 (<u>2,63</u>)	1,57 (<u>5,23</u>)	2,04 (<u>6,8</u>)	1,87 (<u>6,23</u>)	1,62 (<u>5,4</u>)
	4	1,26 (<u>4,2</u>)	2,67 (<u>8,9</u>)	3,27 (<u>10,9</u>)	2,99 (<u>9,96</u>)	2,59 (<u>8,63</u>)

Результаты вычислений хорошо согласуются с экспериментальными данными. Отклонения расчетных концентраций от измеренных не превышали 11–27 %, что подтверждает обоснованность применения разработанной методики для прогнозирования развития ЧС.

В Таблице 5.4 приведены расчетные показатели дальности видимости и риска немедленного рефлекторного воздействия продуктов горения на самочувствие участников дорожного движения по второму, третьему и четвертому сценариям, определенные для учетных контрольных точек на ФАД Р-255 «Сибирь» [181, 182]. Кроме того, произведено категорирование контрольных участков автодороги по степени опасности условий дорожного движения по предложенным критериям ранжирования дорожной ситуации в зависимости от концентрации атмосферных поллютантов (по риску немедленных рефлекторных эффектов у участников транспортного процесса) и дальности видимости. Каждая категория имеет свою цветовую маркировку.

Таблица 5.4 – Расчетные значения дальности видимости и рисков острого воздействия продуктов горения торфяного пожара на самочувствие участников дорожного движения по второму, третьему и четвертому прогнозным сценариям.

Показатель опасности	Сценарий	п. Тельма	п. Железнодорожный	ФАД Р-255 «Сибирь», 1820 км	ФАД Р-255 «Сибирь», 1822 км	ФАД Р-255 «Сибирь», 1824 км
Риск здоровью СО	2	0,001	0,001	0,006	0,006	0,001
	3	0,029	0,115	0,184	0,157	0,136
	4	0,067	0,212	0,309	0,242	0,242
Риск здоровью PM _{2,5}	2	0,001	0,029	0,097	0,067	0,036
	3	0,54	0,864	0,945	0,933	0,885
	4	0,788	0,971	0,994	0,994	0,977
Риск здоровью PM ₁₀ расчет	2	0,001	0,023	0,045	0,036	0,023
	3	0,212	0,618	0,788	0,726	0,655
	4	0,5	0,885	0,933	0,919	0,864
Дальность видимости, м	2	538	255	179	199	235
	3	82	42	32	34	40
	4	18	11	7	8	9

Цветовая маркировка дорожной ситуации

Приемлемая	Удовлетворительная	Неудовлетворительная	Опасная	Чрезвычайно опасная

Критерии ранжирования дорожной ситуации по степени опасности обоснованы с учетом действующих нормативно-правовых актов Российской Федерации: статья 30 «Временное ограничение или прекращение движения транспортных средств по автомобильным дорогам» Федерального закона от 08.11.2007 № 257-ФЗ «Об автомобильных дорогах и о дорожной деятельности в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями и дополнениями от 27.12.2018); статья 14 «Временное ограничение или прекращение движения транспортных средств по автомобильным дорогам» Федерального закона от 10.12.1995 № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения» (с изменениями и дополнениями от 30.12.2018); статья 10 «Мониторинг дорожного движения» Федерального закона от 29.12.2017 № 443-ФЗ «Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»; «Правила дорожного движения Российской Федерации» (утверждены постановлением Совета Министров – Правительства Российской Федерации от 23 октября 1993 г. № 1090), а также ведомственных приказов (Приказ МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях») и официально утвержденных отраслевых правил и руководств: Строительные правила СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги». Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* с Изменением №1»; Р 2.1.10.1920-04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду».

Прогнозная оценка дорожной ситуации на участке ФАД Р-255 «Сибирь» от поселка Тельма до 1824 км по второму сценарию показывает, что условия движения могут быть признаны относительно удовлетворительными по уровню химического загрязнения, но неудовлетворительными по показателю дальности видимости (менее 300 м), что требует снижения скорости движения до 60 км/ч и запрещения обгона (Правила дорожного движения РФ, СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги»).

Результаты прогнозирования по третьему и четвертому расчетным сценариям указывают на то, что в этих случаях влияние дымовых газов торфяного пожара оказывается чрезвычайным для автотранспортного процесса. Показатели риска острого рефлекторного действия опасных мелкодисперсных частиц стремятся к максимальному значению, что свидетельствует о значительном увеличении тяжести респираторных и сердечно-сосудистых симптомов среди участников дорожного движения, а также о возможности преждевременной смерти людей с хроническими заболеваниями сердца и легких и лиц пожилого возраста. При дальности видимости ниже критической (50 м) для исключения риска ДТП целесообразно прекратить движение по опасному участку.

Выводы по пятой главе

1. Разработана новая методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, комплексно связывающая показатели загрязнения воздуха продуктами горения торфяного пожара с показателями риска для здоровья и показателем снижения дальности видимости и позволяющая осуществлять ранжирование дорожной ситуации по уровню опасности в зависимости от значения этих показателей.

2. Предложены критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности, обоснованные с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости. Критерии ранжирования обоснованы с учетом действующих нормативно-правовых актов РФ, ведомственных приказов, официально утвержденных отраслевых правил и руководств. Предложено условное ранжирование дорожной ситуации по пяти категориям (неопасная, удовлетворительная, неудовлетворительная, опасная, чрезвычайно опасная) в зависимости от степени риска для здоровья и снижения дальности видимости, обусловленных загрязнением воздуха продуктами горения торфяного пожара.

3. Эффективность предложенного подхода доказана его апробацией на примере прогнозирования возникновения чрезвычайных ситуаций на

федеральной автодороге Р-255 «Сибирь», обусловленных воздействием продуктов горения торфяного пожара (CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$).

Расчетные оценки показывают, что при аномально неблагоприятных метеоусловиях и состоянии атмосферы (стратификация атмосферы ~ 250 , скорость ветра менее 1 м/с, направление ветра – в сторону автодороги), когда концентрации CO превышают предельно допустимые значения в 1,2-1,5 раза, концентрации PM_{10} – в 2,5-7,0 раз, концентрации $\text{PM}_{2.5}$ – в 4,5-11,5 раз (третий прогнозный сценарий), и в условиях образования «суперсмога» в результате взаимодействия дыма природного пожара и тумана, когда концентрации CO превышают предельно допустимые значения в 1,9-2,5, концентрации $\text{PM}_{2.5}$ – в 7-20 раз и концентрации PM_{10} – в 4-11 раз (четвертый сценарий), влияние компонентов дыма торфяного пожара оказывается чрезвычайным для автотранспортного процесса как по показателю риска острого воздействия на водителей и пассажиров, так и показателю снижения дальности видимости. В такой опасной ситуации для исключения риска ДТП целесообразно прекратить движение по опасному участку.

Заключение

1. Количество лесных пожаров в течение последних 50 лет многократно возросло в Российской Федерации и в мире. В нашей стране эта проблема чрезвычайно актуальна для регионов Сибири и Дальнего Востока. Особую опасность представляют природные пожары, развивающиеся вблизи населенных пунктов и автомобильных магистралей: в Австралии в феврале 2009 года по причине задымления на автотрассе в результате лесного пожара в ДТП погибли 16 человек; в Северной Флориде (США) в январе 2008 г. и январе 2009 г. также из-за высокоплотного дыма от лесного пожара произошли две крупнейшие автодорожные аварии, в результате первой столкнулись 70 автомобилей, 5 погибших, 38 раненых, в результате второй – 11 погибших и 18 раненых. На территории Российской Федерации тоже имели место дорожные ЧС, вызванные природными пожарами. Осенью 2015 г. и зимой 2016 г. в Иркутской области в течение нескольких месяцев действовал крупнейший торфяной пожар, повлекший возникновение ЧС (транспортного коллапса) в декабре 2015 г. на ФАД Р-255 «Сибирь». Благодаря своевременным организационным мерам удалось избежать серьезных аварий с гибелью и ранением людей.

2. Опасное действие продуктов горения природных пожаров на условия и участников транспортного процесса заключается, во-первых, в негативном воздействии угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц на самочувствие и психоэмоциональное состояние водителей и пассажиров, проявляющимся в головной боли, головокружении, беспокойстве, раздражении верхних дыхательных путей и слизистых оболочек глаз, а во-вторых, в существенном ограничении видимости, что в совокупности, повышает риск возникновения ДТП, а при неблагоприятных метеорологических условиях может привести к серьезным авариям на дорогах. Особую опасность представляют ситуации комбинированного действия дыма и тумана в условиях температурной инверсии атмосферы, взаимное синергетическое влияние которых проявляется в образовании приземного «суперсмога», состоящего из большого количества

мелкодисперсных капель воды и взвешенных частиц. В такой ЧС формируются условия нулевой видимости (менее 3 метров).

3. Проведенный анализ показал, что несмотря на то, что в нашей стране и за рубежом большое внимание по отдельности уделялось развитию методов моделирования природных пожаров и методов численного моделирования переноса загрязнителей в атмосфере, методическое обеспечение расчетного прогнозирования развития ЧС, связанных с опасным воздействием продуктов горения лесных пожаров на условия и участников транспортных процессов, практически отсутствует, что не позволяет объективно оценивать и прогнозировать, а следовательно, и адекватно реагировать на дорожные ЧС в окрестности действующих природных пожаров, в том числе торфяных.

4. В качестве объекта исследования в диссертационной работе рассматривалась реальная ЧС (режим ЧС был введен с 24.12.15 по 29.12.2015), возникшая в Усольском районе Иркутской области РФ при длительном (с октября 2015 г. по февраль 2016 г.) торфяном пожаре вблизи автомагистрали «Сибирь». В результате в районе возник транспортный коллапс, имевший широкий общественный резонанс.

Особенностями торфяного пожара как источника создания ЧС на автомобильных дорогах, находящихся в зоне задымления, являются:

1) тлеющий режим горения без открытого огня при недостатке кислорода с обильным выделением угарного газа (СО) и опасных канцерогенных взвешенных частиц (в том числе $PM_{2.5}$ и PM_{10});

2) относительно низкая температура продуктов горения по сравнению с пламенными природными пожарами;

3) высокая длительность торфяных пожаров (такие пожары могут действовать в течение нескольких месяцев и даже в зимний период);

4) высокая опасность формирования густого смога в сочетании с туманом при неблагоприятных метеорологических условиях.

Выявлено, что серьезную опасность представляют подземные торфяные пожары, для которых характерны медленное развитие процесса, большая

длительность (до нескольких месяцев, особенно зимой), высокая задымленность. При наличии покрова очаг пожара находится в глубине осушенной залежи, а выход продуктов горения с дымом осуществляется не со всей площади пожара, а из точечных дымовых устьев, что позволило применить в отношении них термин *«дымовые гейзеры»*.

5. Разработана новая методика оценки и прогнозирования чрезвычайно опасного воздействия торфяных пожаров на условия и участников дорожного движения, которая реализуется в четыре этапа. На первом этапе осуществляется сбор фактических данных о торфяном пожаре как источнике выброса поллютантов с учетом всех необходимых параметров. На втором этапе оценивается мощность выброса и осуществляется расчетное прогнозирование распространения угарного газа и взвешенных частиц вблизи автомагистралей, находящихся в непосредственной близости от торфяного пожара. На третьем этапе оценивается влияние продуктов горения на здоровье людей по показателю риска острого воздействия и влияние дыма на снижение дальности видимости на автодороге. На четвертом этапе на основании результатов расчетного прогноза и предложенных критериев ранжирования дорожной ситуации по степени опасности в полном согласовании с нормативными и руководящими документами, действующими в Российской Федерации, в том числе Федерального закона от 10.12.1995 № 196-ФЗ «О безопасности дорожного движения», Приказа МЧС России от 08.07.2004 № 329 «Об утверждении критериев информации о чрезвычайных ситуациях», вырабатываются научно обоснованные решения о действиях в сложившейся ЧС.

6. Ключевым этапом создания новой комплексной методики явилась разработка модели распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) от тлеющего торфяника, что потребовало изучения физико-химических механизмов выброса и распространения в атмосфере опасных продуктов горения торфяного пожара и в связи с невозможностью проведения натурных измерений в условиях действующего подземного торфяного пожара вследствие опасности провала на начальном этапе

– экспериментально-расчетного исследования закономерностей переноса в воздушной среде токсичных компонентов от модельного источника горения торфа, имитирующего единичный «дымовой гейзер».

7. На основании К-теории, и результатов экспериментальных измерений предложена оригинальная модель распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного источников горения торфа.

Экспериментально доказано, что локальный очаг горения торфа, тлеющий в беспламенном режиме, может быть отнесен к наземным холодным источникам выброса, если разница температур отходящих газов и окружающей среды не превышает 50–60 °С. В этом случае практически отсутствует начальный мощный конвективный подъем дымовых газов.

8. Сопоставление результатов измерительных и численных исследований показало, что при моделировании распространения угарного газа и взвешенных частиц в окрестности локального очага горения торфа, стилизованного в виде низкого холодного источника, для более легкой примеси (угарного газа) расчетные концентрации отклонялись от измеренных на 4-28 %, для более тяжелых примесей PM_{10} и $PM_{2.5}$ отклонение достигало 4-32 %, а сам профиль изменения концентрации с расстоянием носил более сглаженный характер. Это в целом свидетельствует об адекватности разработанной модели и позволяет ее использовать для прогнозирования распространения поллютантов вблизи реально действующего торфяного пожара.

9. Проведено обучение и адаптация разработанной модели распространения продуктов горения вблизи тлеющего торфяника к реальным объектам по данным изучения закономерностей развития ЧС на ФАД Р-255 «Сибирь», вызванной торфяным пожаром, по четырем прогнозным сценариям, различающимся набором исходных данных об очаге пожара и метеорологических условиях.

Расчетные оценки, выполненные для вероятных аномально неблагоприятных метеоусловий и состояния атмосферы, существенно затрудняющих протекание естественных физических процессов конвективного

газообмена, показывают, что в таких условиях формируются повышенные концентрации СО с превышением ПДК_{МР} в 1,2–1,5 раза и опасно высокие концентрации РМ₁₀ с превышением ПДК_{МР} в 2,5–7,0 раза и РМ_{2.5} с превышением ПДК_{МР} в 4,5–11,5 раз.

Посредством численных исследований было выявлено, что особую опасность представляет ситуация образования «суперсмога» в результате взаимодействия дыма природного пожара и радиационного тумана. В этом случае концентрация СО может достигать 1,9–2,5 ПДК_{МР}, концентрация РМ_{2.5} – 7–20 ПДК_{МР}, концентрация РМ₁₀ – 4–11 ПДК_{МР}. Таким образом, в условиях «суперсмога» складывается чрезвычайно опасная ситуация для жизнедеятельности людей.

10. Для разработки иерархической системы прогнозирования развития чрезвычайной дорожной ситуации на мезо-уровне, был привлечен метод искусственных нейронных сетей с использованием в качестве радиальной базисной функции Гауссиана.

Разработанная функциональная параметрическая модель в форме нейронных сетей позволяет осуществлять прогнозное моделирование ЧС для разных наборов входных параметров с использованием гетерогенных данных (упрощенных уравнений атмосферной диффузии веществ в виде дифференциальных уравнений в частных производных, данных расчета на основе функции нормального распределения Гаусса, результатов натурных измерений), перспективна для развития систем контроля, прогнозирования опасного загрязнения воздуха продуктами горения природных пожаров с целью предупреждения и минимизации ущерба, оказываемого ими на жизнедеятельность, в том числе транспортную деятельность населения.

11. Впервые обоснованы критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости, обоснованные с учетом действующих нормативно-правовых актов РФ, ведомственных приказов, официально утвержденных отраслевых правил и руководств

Прогнозирование опасного воздействия продуктов горения (CO , PM_{10} и $\text{PM}_{2.5}$) на участников транспортного процесса предлагается осуществлять по оценке риска острого рефлекторного воздействия на здоровье водителей и пассажиров, а на условия движения – по снижению дальности видимости на дороге с помощью разработанного подхода, основанного на формуле Траберта, связывающего концентрацию аэрозольных частиц и степень замутненности атмосферы.

12. Новая методика прогнозирования опасного воздействия продуктов горения природных пожаров на участников и условия транспортного процесса комплексно связывает показатели чрезвычайного загрязнения воздуха (с учетом типовых и геометрических характеристик источника возгорания, метеорологических условий, рельефа местности) с показателями риска для здоровья и показателем снижения дальности видимости, в зависимости от значения которых осуществляется ранжирование дорожной ситуации по пяти условным категориям (приемлемая, удовлетворительная, неудовлетворительная, опасная, чрезвычайно опасная), что позволяет вырабатывать своевременные управленческие решения по предупреждению и реагированию на подобные угрозы чрезвычайного характера.

13. В качестве расширения применимости результатов диссертационной работы рекомендуется использовать разработанную методику для прогнозирования опасного воздействия угарного газа на спасателей и пожарных, ведущих оперативные работы в непосредственной близости с очагами горения торфа.

Список сокращений и условных обозначений

ЧС – чрезвычайная ситуация;

ГПС – государственная противопожарная служба;

МЧС – Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий;

РФ – Российская Федерация;

ФСГС – Федеральная служебная государственная статистика;

ФАЛХ – Федеральное агентство лесного хозяйства;

ДФО – Дальневосточный федеральный округ;

СФО – Сибирский федеральный округ;

ПДК – предельно-допустимая концентрация;

ПДК_{МР} – максимально-разовое значение предельно-допустимой концентрации;

ПДК_{СС} – среднесуточное значение предельно-допустимой концентрации;

ХОБЛ – хроническая обструктивная болезнь легких;

ДТП – дорожно-транспортное происшествие;

ДПС – дорожно-патрульная служба;

ТС – транспортное средство;

США – Соединенные Штаты Америки;

РАН – Российская Академия наук;

ДВ – дальность видимости;

ГИБДД – государственная инспекция безопасности дорожного движения;

СНиП – строительные нормы и правила;

СП – свод правил;

РД – руководящий документ;

ДГ – дымовые газы;

КТИ – контрольная точка измерений;

ННМУ – нормально неблагоприятные метеоусловия;

АНМУ – аномально неблагоприятные метеоусловия;

ФАД – федеральная автомобильная дорога;

PM₁₀ – мелкодисперсные взвешенные частицы диаметром 10 мкм;

PM_{2,5} – мелкодисперсные взвешенные частицы диаметром 2,5 мкм;

СО – оксид углерода;

СО₂ – диоксид углерода.

Словарь терминов

Дорожное движение – совокупность общественных отношений, возникающих в процессе перемещения людей и грузов с помощью транспортных средств или без таковых в пределах дорог (ФЗ от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. от 26.07.2017) «О безопасности дорожного движения»).

Безопасность дорожного движения – состояние данного процесса, отражающее степень защищенности его участников от дорожно-транспортных происшествий и их последствий (ФЗ от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. от 26.07.2017) «О безопасности дорожного движения»).

Дорожно-транспортное происшествие – событие, возникшее в процессе движения по дороге транспортного средства и с его участием, при котором погибли или ранены люди, повреждены транспортные средства, сооружения, грузы, либо причинен иной материальный ущерб (ФЗ от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. от 26.07.2017) «О безопасности дорожного движения»).

Обеспечение безопасности дорожного движения – деятельность, направленная на предупреждение причин возникновения дорожно-транспортных происшествий, снижение тяжести их последствий (ФЗ от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. от 26.07.2017) «О безопасности дорожного движения»).

Участник дорожного движения – лицо, принимающее непосредственное участие в процессе дорожного движения в качестве водителя транспортного средства, пешехода, пассажира транспортного средства (ФЗ от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. от 26.07.2017) «О безопасности дорожного движения»).

Чрезвычайная ситуация – это обстановка, сложившаяся на определенной территории или акватории в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которая может повлечь или повлекла за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей (ФЗ от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 03.08.2018) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»).

Список литературы

1. Одум, Ю. Экология / Ю. Одум. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 328 с.
2. Словарь терминов МЧС. [Электронный ресурс]. – Официальный сайт МЧС России. – Режим доступа: <http://www.mchs.gov.ru/dop/terms>
3. Об утверждении методических рекомендаций по проведению государственной инвентаризации лесов: приказ федерального агентства лесного хозяйства от 10 ноября 2011 г. №472. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://legalacts.ru/doc/prikaz-rosleskhoza-ot-10112011-n-472-ob/>
4. Мазуркин, П.М. Моделирование многолетней динамики изменения площади лесных пожаров / П. М. Мазуркин, Т. Е. Каткова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2013. – №1 (6). – С.31-37.
5. Мазуркин, П.М. Анализ многолетней динамики удельной площади лесных пожаров / П. М. Мазуркин, Т. Е. Каткова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2013. – №2 (7). – С.37-43.
6. Горбатенко, В.И. Оценка роли климатических факторов в возникновении и распространении лесных пожаров на территории Томской области / В.И. Горбатенко, А.А. Громницкая, Д.А. Константинова и др. // Вестник Томского государственного университета. – 2015. – № 395. – С. 233-240.
7. Баранова, Е.В. Последствия лесных пожаров в Иркутской области / Е.В. Баранова // Экономика. Право. Менеджмент: сборник трудов молодых исследователей БГУ. – 2015. – 1(3). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://izdatelstvo.bgu.ru/epm/search.aspx>
8. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2010 году». – М.: МЧС России; ФГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2011. – 299 с.
9. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2011 году». – [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: http://www.mchs.gov.ru/activities/results/Itogi_deyatelnosti_MCHS_Rossii_za_2011_g

10. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2012 году». – М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – 341 с.

11. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2013 году». – М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2014. – 344 с.

12. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2014 году». – М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2015. – 350 с.

13. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2015 году». – М.: МЧС России. ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2016. – 390 с.

14. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2016 году». – М.: МЧС России; ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2017. – 360 с.

15. Впервые в России официальные цифры по лесным пожарам близки к реальным. [Электронный ресурс]. – Официальный сайт Всемирного фонда дикой природы (WWF). – 2014. – Режим доступа: <https://wwf.ru/resources/news/lesa/vpervye-v-rossii-ofitsialnye-tsifry-po-lesnym-pozharam-blizki-k-realnym/>

16. Единая межведомственная информационно-статистическая система РФ. – [Электронный ресурс]. – Официальный сайт Единой межведомственной

информационно-статистической системой РФ. – Режим доступа: <https://www.fedstat.ru>

17. Ерицов, А.М. Катастрофические лесные пожары последних лет / А.М. Ерицов, С. Н. Волков, В. Д. Ломов // Лесной Вестник. – 2016. – № 5. – С. 106-110.
18. Athanasiou, M. Fire behaviour of the large fires of 2007 in Greece / M. Athanasiou, G. Xanthopoulos. // In proceedings: VI International Conference on Forest Fire Research, D. X. Viegas (Ed.), 2010. Режим доступа: https://www.m-athanasiou.gr/pdf/icffr_2010_submission_114.pdf
19. Petropoulos, G.P. A Comparison of Spectral Angle Mapper and Artificial Neural Network Classifiers Combined with Landsat TM Imagery Analysis for Obtaining Burnt Area Mapping / G.P. Petropoulos, K.P. Vadrevu, G. Xanthopoulos, G. Karantounia // Sensors (Basel). – 2010. – V. 10(3). – P. 1967-1985.
20. Xanthopoulos, G. Olympic flames / G. Xanthopoulos // Wildfire. – 2007. – V. 16. – P. 10-18.
21. Gitas, I.Z. Contribution of remote sensing to disaster management activities: a case study of the large fires in the Peloponnese, Greece / I. Z. Gitas, A. Polychronaki, T. Katagis, G. Malinis // Int. J. Rem. Sens. – 2008. – V. 29. – P. 184.
22. Bochetti, L. A MODIS assessment of the summer 2007 extent burnt in Greece / L. Bochetti, D. Roy, P. Barbosa, R. Boca, C. Justice // Int. J. Rem. Sens. – 2008. – V. 29. – P. 243-246.
23. Forest Fire in Greece // Int. ForestFireNews (IFFN). – 2008. – № 37. – P. 2-17. Режим доступа: http://gfmc.online/iffn/iffn_37/02-IFFN-37-Greece.pdf
24. Cameron, P.A. Black Saturday: the immediate impact of the February 2009 bushfires in Victoria, Australia / P. A. Cameron, B. Mitra, M. Fitzgerald // Med. J. Aust. – 2009. – V. 191(1). – P. 11-16.
25. Pfitzer, B. Three Years After Black Saturday: Long-Term Psychosocial Adjustment of Burns Patients as a Result of a Major Bushfire / B. Pfitzer, L.J. Katona, S.J. Lee, M. O'Donnell // J. Burn. Care Res. – 2016. – V. 37(3). – P. 44-53.

26. Rowluk, A. Public values for integration in natural disaster management and planning: A case study from Victoria, Australia / A. Rowluk, R. M. Ford, F.L. Neolaka, K. J. Williams // *J. Environ. Manage.* – 2017. – V. 185. – P. 11-20.
27. Jacobs, S.J. Heat stress during the Black Saturday event in Melbourne, Australia / S. J. Jacobs, T. Vihma, A. B. Pezza // *Int. J. Biometeorol.* – 2015. – V. 59(6). – P. 759-770.
28. Mannakkara, S. Build back better: implementation in Victorian bushfire reconstruction / S. Mannakkara, S. Wilkinson, R. Potangaroa // *Disasters.* – 2014. – V. 38(2). – P. 267-290.
29. Radeloff, V.C. Rapid growth of the US wildland-urban interface raises wildfire risk / V. C. Radeloff, D. P. Helmers, H. A. Kramer // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* – 2018. – V. 115(13). – P. 3314-3319.
30. Mills, D. Projecting Age-Stratified Risk of Exposure to Inland Flooding and Wildfire Smoke in the United States under Two Climate Scenarios / D. Mills, R. Jones, C. Wobus // *Environ. Health Perspect.* – 2018. – V. 126(4). – P. 881-883.
31. Balmes, J.R. Where There's Wildfire, There's Smoke / J.R. Balmes // *N. Engl. J. Med.* – 2018. – V. 378(10). – P. 881-883.
32. Fann, N. The health impacts and economic value of wildland fire episodes in the U.S.: 2008–2012 / N. Fann, B. Alman, R. A. Broome // *Sci. Total Environ.* – 2018. – V. 610-611. – P. 802-809.
33. Medicare Program; Medicare Shared Savings Program: Extreme and Uncontrollable Circumstances Policies for Performance Year 2017. Interim final rule with comment period. Centers for Medicare & Medicaid Services (CMS), HHS // *Fed. Regist.* – 2017. – V. 82(246). – P. 60912-60919.
34. Kim, Y. Long-run health consequences of air pollution: Evidence from Indonesia's forest fires of 1997 / Y. Kim, S. Knowles, J. Manley, V. Radoias // *Econ. Hum. Biol.* – 2017. – V. 26. – P. 186-198.
35. Van Woesik, R. Coral reef death during the 1997 Indian Ocean dipole linked to Indonesian wildfires / R. Van Woesik // *Science.* – 2004. – V. 303(5662). – P. 1297.

36. Abram, N.J. Coral reef death during the 1997 Indian Ocean Dipole linked to Indonesian wildfires / N. J. Abram, M. K. Gagan, M. T. McCulloch, J. Chappell, W. S. Hantoro // *Science*. – 2003. – V. 301(5635). – P. 952-955.
37. Sheldon, T.L. The Impact of Indonesian Forest Fires on Singaporean Pollution and Health / T. L. Sheldon, C. Sankaran // *Am Econ Rev*. – 2017. – V. 107(5). – P. 526-529.
38. Aditama, T.Y. Impact of haze from forest fire to respiratory health: Indonesian experience / T.Y. Aditama // *Respirology*. – 2000. – V. 5(2). – P. 169-174.
39. Awang, M.B. Air quality in Malaysia: impacts, management issues and future challenges / M. B. Awang, A. B. Jaafar, A. M. Abdullah // *Respirology*. – 2000. – V. 5(2). – P. 183-196.
40. Hutchinson, J.A. The San Diego 2007 wildfires and Medi-Cal emergency department presentations, inpatient hospitalizations, and outpatient visits: An observational study of smoke exposure periods and a bidirectional case-crossover analysis / J. A. Hutchinson, J. Vargo, M. Milet, N. H. F. French // *PLoS Med*. – 2018. – V. 15(7).
41. Haikerwal, A. Fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure during a prolonged wildfire period and emergency department visits for asthma / A. Haikerwal, M. Akram, M.R. Sim, M. Meyer, M. J. Abramson // *Respirology*. – 2016. – V. 21(1). P. 88-94.
42. Alman, B.L. The association of wildfire smoke with respiratory and cardiovascular emergency department visits in Colorado in 2012: a case crossover study / B. L. Alman, G. Pfister, H. Hao, J. Stowell // *Environ Health*. – 2016. – V. 5(1). – P. 64.
43. Youssef, H. Non-accidental health impacts of wildfire smoke / H. Youssef, C. Liousse, L. Roblou // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2014. – V. 11(11). – P. 11772-11804.
44. Black, C. Wildfire smoke exposure and human health: Significant gaps in research for a growing public health issue / C. Black, Y. Tesfaigzi, J. A. Bassein, L. A. Miller // *Environ. Toxicol. Pharmacol*. – 2017. – V. 55. – P. 186-195.

45. Liu, J.C. A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke Pereira / J. C Liu, G. Uhl, S. A. Bravo, M. A. Bell // *Environ. Res.* – 2015. – V. 136. – P. 120-132.
46. Шарапов, Р.В. Лесные пожары 2010 года и их причины / Р.В. Шарапов // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности.* – 2010. – № 7. – С. 68-71.
47. Миронова, Е.М. Анализ статистических данных по лесным пожарам 2010 г. в регионах России / Е.М. Миронова // *Геодезия и картография.* – 2014. – № 8. – С. 54-56.
48. Ревич, Б.А. Волны жары, качество атмосферного воздуха и смертность населения Европейской части России летом 2010 года: результаты предварительной оценки / Б. А. Ревич // *Экология человека.* – 2011. – №7. – С. 3-9.
49. Revich, B. Excess mortality during heat waves and cold spells in Moscow, Russia / B. Revich, D. Shaposhnikov // *Occup. Environ. Med.* – 2008. – V. 65. – № 10. – P. 691-696.
50. Revich, B. The effects of particulate and ozone pollution on mortality in Moscow, Russia / B. Revich, D. Shaposhnikov // *Air Qual. Atmos.* – 2010. – V. 3. – № 3. – P. 117-123.
51. Shaposhnikov, D. Heat Wave and Wildfire Air Pollution Related Mortality in the Summer of 2010 in Moscow / D. Shaposhnikov, B. Revich // *Epidemiology.* – 2014. – V. 25. – № 3. – P. 359-364.
52. Ревич, Б.А. Изменение качества атмосферного воздуха в Москве в 2006-2012 гг. и риски для здоровья населения / Б.А. Ревич, Д.А. Шапошников, С.Л. Авалиани, Е. А. Лезина, Е. Г. Семутникова. // *Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем.* – 2015. – Т. 26. – № 1. – С. 91-122.
53. Царев, В.А. Экономический ущерб, нанесенный природными пожарами в России в 2010 году / В.А. Царев // *Лесотехнический журнал.* – 2012. – № 3. – С. 147-155.
54. Fildes, B. Model licence re-assessment procedure for older and disabled drivers / B. Fildes, N. Pronk, J. Langford // *Sydney: Austroads.* – 2000. – V. – 32. – P. 118-123.

55. Charlton, J. Influence of chronic illness on crash involvement of motor vehicle drivers // J. Charlton, S. Koppel // Clayton: Monash University Accident Research Centre. – 2004. – V. 2. – P. 213.
56. Dobbs, B.M. Screening and assessment of medically at-risk drivers / B.M. Dobbs, D. Carr // Public Policy & Aging Report. – 2005. – V. 15. – P. 6–12. URL: <https://doi.org/10.1093/ppar/15.2.6>
57. Carr, E.G. The evolution of applied behavior analysis into positive behavior support / E.G. Carr // Journal of the Association for Persons with Severe Handicaps. – V. 22. – P. 115-117.
58. Koepsell, T. D. Medical conditions and motor vehicle collision injuries in older adults / T. D. Koepsell, M. E. Wolf, L. McCloskey // Journal of the American Geriatrics Society. – 1994. – V. 42. – P. 695-700.
59. Kagan, A. Diabetes fitness to drive: A systematic review of the evidence with a focus on older drivers / A. Kagan, G. Hashemi, N. Korner-Bitensky // Canadian Journal of Diabetes. – 2010. – V. 34. – P. 233-242.
60. Seeger, R. Driving ability and fitness to drive in people with diabetes mellitus / R. Seeger, R. Lehmann // Therapeutische Umschau. – 2011. – V. 68. – P. 249-252.
61. Owsley, C. Older drivers and cataract: Driving habits and crash risk / C. Owsley, B. Stalvey, J. Wells, M. E. Sloane // The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences. – 1999. – V. 54. – P. 203-211.
62. Owsley, C. Visual processing impairment and risk of motor vehicle crash among older adults / C. Owsley, K. Ball, G. McGwin // JAMA. – 1999. – V. 279. – P. 1083-1088.
63. Haymes, S.A. Risk of falls and motor vehicle collisions in glaucoma / S.A. Haymes, R.P. LeBlanc, M.T. Nicolela // Investigative Ophthalmology & Visual Science. – 2007. – V. 48. – P. 1149-1155.
64. Teran-Santos, J. Cooperative group Burgos-Santander: The association between sleep apnea and the risk of traffic accidents / J. Teran-Santos, A. Jimenez-Gomez, J. Cordero-Guevara // New England Journal of Medicine. – 1999. – V. 340. – P. 847-851.

65. Sims, R.V. Exploratory study of incident vehicle crashes among older drivers / R.V. Sims, G. McGwin, R.M. Allman // *Journals of Gerontology. Series A Biological Sciences and Medical Sciences*. – 2000. – V. 55. – P. 22-27.
66. Tervo, T. The driver's illness as a cause of traffic accidents / T. Tervo, T. Jaakkola, P. Sulander // *Duodecim*. – 2011. – V. 127. – P. 1147-1153.
67. Ozcoidi, M. Medical pathology and vehicle driving. Guide for medical advising. / M. Ozcoidi, E. Valdes, M. L. Simon, J. C. Gonzalez // *Madrid: Direccion General de Trafico*. – 2002. – V. 145. – P. 117-124.
68. Prada, C. Traffic accidents in the Spanish population / C. Prada, R. Perez, M. C. del Rio Gracia, F. J. Alvarez-Gonzalez // *Medical Clinic*. – 1995. – V. 105. – P. 601-604.
69. Driving for work: Fitness to drive. Report of the Royal Society for the Prevention of Accidents. – Birmingham, 2018. URL: www.rosipa.com.
70. LeRoy, A. Multiple Medications and Vehicle Crashes: Analysis of Databases / A. LeRoy, D. Pharm, M. Lee Morse // *Final Report DOT HS 810 858*. – Herndon, 2008. – P. 261.
71. Alonso, F. Reported prevalence of health conditions that affect drivers / F. Alonso, C. Esteban, J. Sanmarthn, S.A. Useche // *Cogent Medicine*. – 2017. – V. 4. – doi.org/10.1080/2331205X.2017.1303920
72. Deadly 70-Car Pileup On Smoky Fla. Highway. January 9, 2008. URL: <https://www.cbsnews.com/news/deadly-70-car-pileup-on-smoky-fla-highway/>
73. Gabbert, B. Fog and wildfire smoke cause crashes in Florida, 9 dead / B. Gabbert – January 29, 2012. – URL: <http://wildfiretoday.com/2012/01/29/fog-and-wildfire-smoke-cause-crashes-in-florida-9-dead/>
74. Tucker, E. Wildfire smoke continues to affect Highway 93 for Alberta, B.C. drivers Monday / E. Tucker – August 7, 2017. – URL: <https://globalnews.ca/news/3652845/highway-93-conditions-monday-verdant-creek-wildfire/>
75. Ерицов, А.М. Катастрофические лесные пожары последних лет / А.М. Ерицов, С.Н. Волков, В.Д. Ломов // *Лесной Вестник*. – 2016. – № 5. – С. 106-110.

76. Черных, А.И. Аналитическая оценка последствий лесных, торфяных пожаров в муниципальных образованиях Иркутской области / А.И. Черных, В.В. Гармышев // В сборнике: Безопасность – 2018. – 2018. – С. 119-121.

77. Копылов, Н.П. Современные технологии борьбы с лесоторфяными пожарами на основе опыта их тушения в 2014-2015 гг. на территории Бурятии, Тверской и Иркутской областей / Н.П. Копылов, Е.А. Москвлин, Д.В. Федоткин // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сборник научных трудов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию создания первого в Республике Беларусь научного подразделения в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и пожаров. – 2016. – С. 196-203.

78. Удилов, Т.В. Исходные данные для математического моделирования процессов возгорания торфяников Иркутской области / Т.В. Удилов, В.Н. Винокуров, В.И. Александрой // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 95.

79. Гришин А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф / А.М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2008. – № 2 (3). – С. 85-95.

80. Гришин А.М. О математическом моделировании торфяных пожаров / А.М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2008. – № 3 (4). – С. 105-114.

81. Гришин, А.М. Анализ действия лесных и степных пожаров на города и поселки и новая детерминированно-вероятностная модель прогноза пожарной опасности в населенных пунктах / А.М. Гришин, П.В. Пугачева // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2009. – № 3 (7). – С. 99-108.

82. Гришин, А.М. Экспериментальное определение теплофизических, термокинетических и фильтрационных характеристик торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79. – № 3. – С. 131-136.

83. Гришин, А.М. Экспериментальное исследование процессов зажигания и горения торфа / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков, Ю.И. Прейс // Инженерно-физический журнал. – 2006. – Т. 79. – № 3. – С. 137-142.
84. Гришин, А.М. Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. – 37. – № 1. – С. 65-76.
85. Гришин, А.М. О потухании лесных горючих материалов при постоянных и переменных воздействиях потока инертного газа на зону горения / А. М. Гришин, А. Н. Голованов // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. – 37. – № 5. – С. 75-80.
86. Гришин, А.М. О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влиянии на режимы воспламенения и горения / А. М. Гришин, А. Н. Голованов, В. В. Медведев // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т. 42. – № 4(248). – С. 127-135.
87. Гостинцев, Ю.А. Численное моделирование конвективных движений над большими пожарами при различных атмосферных условиях / Ю.А. Гостинцев, Н.П. Копылов, А.М. Рыжов, И.Р. Хасанов // Физика горения и взрыва. – 1991. – № 6 – С. 10-17.
88. Гостинцев, Ю.А. Мощный турбулентный термик в устойчиво стратифицированной атмосфере. Численное моделирование / Ю.А. Гостинцев, А.Ф. Солодовников // Прикладная механика и техническая физика. – 1987. – № 1. – С. 47-53.
89. Гостинцев, Ю.А. Численное моделирование процессов при горении газовых смесей в открытой атмосфере / Ю.А. Гостинцев, С.А. Губин, В.А. Шаргатов // Химическая физика. – 1985. – Т. 4. – № 11. – С. 1554.
90. Weber, R.O. Modeling fire spread through fuel beds / R.O. Weber // Prog. Everg.Combust.Sci. – 1990. – V. 17. – P. 65-82.
91. Linn, R.R. A Transport Model for Prediction of Wildfire Behavior / R.R Linn. – Los-Alamos National Laboratory (USA). – 1997. – P. 195.

92. Porterie, B. Wild fire Propagation / B. Porterie, D. Morvan, M. Larini, J.C. Lorand // A Two-Dimensional Multiphase Approach. Physics of combustion and explosion. – 1998. – № 2. – P. 261-278.

93. Сухоиванов, А.Ю. Моделирование процессов переноса в атмосфере и воздействия на окружающую среду вредных продуктов горения, образующихся при пожаре: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.26.03 / Сухоиванов Алексей Юрьевич. – СПб.: СПбУ МВД России, 2001. – 169 с.

94. Берлянд, М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 272 с.

95. Генихович, Е.Л. Модель распространения атмосферных примесей типа «источник-рецептор» для оценки по климатическим данным антропогенной нагрузки на окружающую среду в мезо- и региональном масштабе / Е.Л. Генихович, И.Г. Грачева, Д.Ю. Румянцев, Е.А. Яковлева // Труды Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова. – 2016. – № – 580. – С. 33-53.

96. Генихович, Е.Л. Разработка мезомасштабной/региональной химической транспортной модели ГГО (ХТМ_ГГО) / Е.Л. Генихович, И.Г. Грачева, А.Д. Зив, Д.Ю. Румянцев // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2016. – № 580. – С. 54-81.

97. Берлянд, М.Е. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. / М.Е. Берлянд, Н.К. Гасилина, Е.Л. Генихович, Р.И. Оникул, В.А. Глухарев. – Л.: ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ, 1987. – 93 с.

98. Об утверждении методов расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе: приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 года № 273. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71642906/>

99. Ложкина, О.В. Методология прогнозирования и мониторинга чрезвычайного воздействия транспорта на городскую среду и население: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.26.02 / Ложкина Ольга Владимировна. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2018. – 369 с.

100. Марченко, В.С. Методика оценки чрезвычайного локального загрязнения оксидами азота приземной воздушной среды вблизи автодорог: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.26.02 / Марченко Василий Сергеевич. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2015. – 166 с.

101. Невмержицкий, Н.В. Методика оценки и прогнозирования экстремального загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $PM_{2.5}$: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.26.02 / Невмержицкий Николай Владимирович. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России, 2017. – 158 с.

102. Ложкин, В.Н. Управление экологической безопасностью городского транспорта. Исследование эффективности управления экологической безопасностью городского транспорта на примере Санкт-Петербурга / В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина. – LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 195 с.

103. Lozhkina, O.V. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models / O.V. Lozhkina, V.N. Lozhkin // Transportation Research Part D: Transport and Environment. – 2015. – № 36. – P. 178-189.

104. Ложкин, В.Н. Прогнозирование загрязнения воздуха отработавшими газами двигателей судов и автотранспорта / В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина // Транспорт Российской Федерации. – 2017. – №1(68). – С. 59-62.

105. Ложкин, В.Н. Информационный процесс контроля чрезвычайных условий проявления дорожной и экологической опасности городского транспорта / В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2016. – № 4. – С. 119-126.

106. Ложкина, О.В. К вопросу о развитии информационно-коммуникационного процесса управления экологической безопасностью автомобильного транспорта в городах / О.В. Ложкина, В.Н. Ложкин, И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – №4(40). – С. 91-98.

107. Ложкин, В.Н. Исследование воздействия автотранспорта на воздушную среду на примере кольцевой автомагистрали Санкт-Петербурга / В.Н. Ложкин, Н.С. Буренин, С.В. Лукьянов, О.В. Ложкина // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 4. – С. 117-122.

108. Ложкина, О.В. Постановка и результаты численных исследований возникновения чрезвычайного локального загрязнения воздуха NO_x вблизи автодорог на примере Санкт-Петербурга / О.В. Ложкина, В.С. Марченко, О.В. Сорокина // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2014. – № 4. – С. 1-7.

109. Невмержицкий, Н.В. Расчетная методика и компьютерная программа для оценки и прогнозирования загрязнения воздуха на автомагистралях мелкодисперсными взвешенными частицами PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$ / Н.В. Невмержицкий, О.В. Ложкина, В.Н. Ложкин // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 2 (55). – С. 206-209.

110. Ложкин, В.Н. О решении обратной задачи моделирования опасного воздействия частиц $\text{PM}_{2,5}$ и PM_{10} в окрестности автомагистрали / В.Н. Ложкин, Н.В. Невмержицкий, О.В. Ложкина // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России, 2015. – № 2. – С. 13-23.

111. Lozhkina, O.V. Motor transport related harmful $\text{PM}_{2,5}$ and PM_{10} : from on-road measurements to the modelling of air pollution by neural network approach on street and urban level [Электронный ресурс] / O.V. Lozhkina, V.N. Lozhkin, N.V. Nevmerzhitsky, D.A. Tarhov, A.N. Vasilyev // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. – 772. – № 1. – Режим доступа:

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/772/1/012031/meta>

112. Савчук, О.Н. Экспериментальные исследования по определению продуктов горения ингредиентов технологического процесса предприятий по производству средств защиты растений, при возгорании которых образуются опасные химические вещества / О.Н. Савчук, П.А. Егоров // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2014. – № 1 (9). – С. 42-48.

113. Савчук, О.Н. Методология выбора "сценария аварии" при прогнозировании последствий аварий на объектах, вызывающих химическое заражение / О.Н. Савчук, П.А. Егоров // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2013. – № 1. – С. 6-12.

114. Савчук, О.Н. Программное обеспечение расчета концентрации вредного вещества и оценки возможности возникновения химических аварий на объектах, содержащих материалы, при возгорании которых образуются опасные химические вещества / О.Н. Савчук, С.Ю. Антонов, П.А. Егоров // Научное обозрение. – 2012. – № 6. – С. 282-284.

115. Scott, L. Modelling smoke transport from wildland fires: a review / L. Scott, L. Achtemeier, K. Narasimhan, L. Yongqiang, M. Tara // International Journal of Wildland Fire. doi.org/10.1071/WF11116.

116. Lavdas L.G. An Atmospheric Dispersion Index for Prescribed Burning / L.G. Lavdas // USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Research Paper SE-256, 1986.

117. Lavdas L.G. Program VSMOKE / L.G. Lavdas // USDA Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, General Technical Report SRS-6, 1996.

118. Sestak, M.L. Simple approach smoke estimation model / M. L. Sestak, A. R. Riebau. SASEM // US Bureau of Land Management, Technical Note 382, 1988.

119. Sung, G.B. Modeling air pollution due to forest fire / G. B. Sung, K. H. Lye // Journal of Engineering Science. – 2005. – V. 1. – P. 81-96.

120. Парамонов С.Г. Моделирование загрязнения в тоновых районах / С.Г. Парамонов // Проблемы окружающей среды. – М.: ВИНТИ, 1993. – С. 53-62.

121. Susan, M. Summary and analysis of approaches linking visual range, PM2.5 concentrations, and air quality health impact indices for wildfires / M. Susan, O'Neill, W. Peter Lahm, J. Mark Fitch & Mike Broughton // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2013. V 63:9. – P. 1083-1090.

122. Klinpratoom Panyaping. Visibility Measurement for Air Quality Monitoring and Estimation of Atmospheric Particulate Matter in a Basin of Thailand //

Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on waste management, water pollution, air pollution, indoor climate. – 2014. – P. 434-436.

123. Beijing air pollution. // SothChina Morning Post. – 2015. – Available at: <http://www.scmp.com/topics/beijing-air-pollution>

124. Zhao, H. Characteristics of visibility and particulate matter (PM) in an urban area of Northeast China / H. Che, X. Zhang et al. // Atmospheric Pollution Research. – 2013. – V. 4. – P. 427-434.

125. Wang, J. Quantitative relationship between visibility and mass concentration of PM 2.5 in Beijing / J. Wang, Yu Zhang, M. Shao // Journal of Environmental Sciences. – 2006. – V. 18. – P. 475-481.

126. Khairullah, S. Trajectory and Concentration PM10 on Forest and Vegetation Peat-Fire HYSPLIT Model Outputs and Observations (Period: September – October 2015) / S. Khairullah, E. S. Makmur // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2017. – V. 58 – doi:10.1088/1755-1315/58/1/012038.

127. Janhall, S. Biomass burning aerosol emissions from vegetation fires: particle number and mass emission factors and size distributions / S. Janhall, M. O. Andreae, and U. Posch. // Atmos. Chem. Phys. – 2010. – V. 10. – P. 1427-1439.

128. Hardy C. Smoke Management Guide for Prescribed and Wildland Fire / C. Hardy, R. D. Ottmar, J. L. Peterson, J. E. Core, and P. Seamon. Smoke Management Guide for Prescribed and Wildland Fire // National Wildfire Coordinating Group Fire Use Working Team. PMS-420-2. – 2001. – URL: <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/5388>

129. Achtemeier, G.L. On the origins of "superfog" – a combination of smoke and water vapor that produces zero visibility over roadways / G.L. Achtemeier // In: Second International Wildland Fire Ecology And Fire National Smoke Management Website. – 2003. – URL: <http://www.nifc.gov/smoke>

130. Mang, L. Regression Analyses between Recent Air Quality and Visibility Changes in Megacities at Four Haze Regions in China / L. Mang, J. Tao¹, C.-Y. Chan. // Aerosol and Air Quality Research. – 2012. V. 12. – P. 1049-1061.

131. Achtemeier, G.L. Smoke modeling in support of management of forest landscapes in the Eastern United States / G.L. Achtemeier // Proceedings of the 3rd Fire in Eastern Oak Forests Conference. – 2009. – С. 88-106.

132. Kunkel, B.A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models / B.A. Kunkel // Journal of Climate and Applied Meteorology. – 1984. – V. 23. – P. 34-41.

133. Kokkola, H. Romakkaniemi, S; Laaksonen, A. On the formation of radiation fogs under heavily polluted conditions. / H. Kokkola, S. Romakkaniemi, A. Laaksonen, // Atmospheric Chemistry and Physics. – 2003. – V. 3. P. 581-589.

134. Achtemeier, G.L. Measurements of moisture in smoldering smoke / G.L. Achtemeier // International Journal of Wildland Fire. – 2006. – V. 15. – P. 517-525.

135. Берлянд, М.Е. К теории трансформации воздушных масс и образования речных туманов / М.Е. Берлянд, Р.И. Оникул // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 1968. – № 238. – С. 3-13.

136. Берлянд, М.Е. К теории образования радиационных туманов и их влияния на распространение примесей / М.Е. Берлянд, Я.С. Канчан // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – 1973. – № 293. – С. 3-20.

137. Иванюта, Л.А. Экология торфяных мерзлотных почв низинных болот юга Иркутской области: диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук: 03.00.16 / Иванюта Людмила Александровна. – Иркутск: ИГУ, 1999. – 149 с.

138. Шинкеева, Н.А. Характеристика группового состава органического вещества отдельных репрезентативных торфов таежной зоны Западной Сибири / Н.А. Шинкеева, С.Г. Маслов, В.С. Архипов // Вестник ТГПУ. – 2009. – № 3 (81). – С. 116-119.

139. Архипов, В.С. Состав и свойства типичных видов торфа центральной части Западной Сибири / В.С. Архипов, С.Г. Маслов // Химия растительного сырья. – 1998. – № 4. – С. 9-16.

140. Веретенникова, Е.Э. Распределение свинца и ртути в торфяных залежах Западной Сибири (болота Васюганья) / Е. Э. Веретенникова, Е. А. Головацкая // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – С. 181-187.
141. Гюльмалиев, А.М. Структура и свойства органической массы горючих ископаемых / А. М. Гюльмалиев, С. Г. Гагарин, Г. С. Головин // Химия твердого топлива. – 2004. – № 6. – С. 10-31.
142. Гундар, С.В. Об энергетическом балансе беспламенного горения органической части почвы при лесных пожарах / С.В. Гундар // Вопросы лесной пирологии. – Красноярск, 1974. – С. 74-82.
143. Гундар, С.В. О газообмене при почвенных пожарах / С.В. Гундар // Проблемы лесной пирологии. – Красноярск: Институт леса и древесины им. В. Н. Сукачева СО АН СССР, 1974. – С. 137-146.
144. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов / Э.В. Конев – Новосибирск: Наука, 1977. – 239 с.
145. Белоусова, Е.П. Природные факторы возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области / Е. П. Белоусова, И. В. Латышева, С. В. Латышев, К. А. Лощенко, А. С. Щерблюкин // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2016. – Т. 8 – № 4. – С. 390-399.
146. Дубровин, Д.В. Загрязнение атмосферы в результате горения лесных горючих материалов в селитебной, ландшафтно-рекреационной, пригородной зонах городов и населенных пунктов Иркутской области / Д.В. Дубровин, В.В. Гармышев, С.С. Тимофеева // XXI век. Техносферная безопасность. – 2018. – Т. 3. – № 2 (10). – С. 35-43. DOI: 10.21285/2500-1582-2018-2-35-43
147. Хорошавин, Л.Б. Торф: возгорание торфа, тушение торфа и торфокомпозиты / Л.Б. Хорошавин, О.А. Медведев, В.А. Беляков, Е.В. Михеева, В.С. Руднов, Е.А. Байтимилова. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС, 2013. – 256 с.
148. Вомпэрский, С.Э. Условия и последствия пожаров в сосняках на осушенных болотах / С.Э. Вомпэрский, Т.В. Глухова, М.В. Смагина, А.Г. Ковалев // Лесоведение. – 2007. – Т. 6. – С. 35-44.

149. Винокуров, В.Н. О математическом моделировании процессов возгорания торфа и динамики торфяного пожара / В. Н. Винокуров, Т. В. Удилов, В. И. Александров // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 1-7.

150. Ложкин, В.Н. Дифференциально-нейросетевой подход моделирования чрезвычайно опасного загрязнения воздуха автомагистрали торфяным пожаром в условиях низких температур / В. Н. Ложкин, В. Д. Тимофеев, О. В. Ложкина, А. Н. Васильев, Д. А. Тархов // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в Арктическом регионе: материалы Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29 сентября 2016 года. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2016. – С. 55-59.

151. Ложкин, В.Н. Методика прогнозирования чрезвычайно опасного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали торфяным пожаром / В.Н. Ложкин, В.Д. Тимофеев, О.В. Ложкина, А.Н. Иванов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 3 (39). – С. 89-97.

152. Vasilyev, A. Neural network approach in information process for predicting highway area air pollution by peat fire / A. Vasilyev, V. Lozhkin, O. Lozhkina, D. Tarkhov, V. Timofeev // CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org): Selected Papers of the XI International Scientific-Practical Conference Modern Information Technologies and IT-Education (SITITO 2016), Moscow, Russia, November 25-26, 2016. – Vol. 1761. – P. 386-392. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1761/paper49.pdf>

153. Lozhkin, V.N. Using K-theory in geographic information investigations of critical-level pollution of atmosphere in the vicinity of motor roads / V. Lozhkin, O. Lozhkina, A. Ušakov // World Applied Sciences Journal. – 2013. – V. 23. – № 13. – P. 96-100.

154. Lozhkina, O.V. Estimation of road transport related air pollution in Saint Petersburg using European and Russian calculation models / O.V. Lozhkina,

V.N. Lozhkin // Transportation Research Part D: Transport And Environment. – Elsevier Science Publishing Company, Inc. – 2015. – V. 36. –P. 178-189.

155. Lozhkina, O.V. Estimation of nitrogen oxides emissions from petrol and diesel passenger cars by means of on-board monitoring: effect of vehicle speed, vehicle technology, engine type on emission rates / O.V. Lozhkina, V.N. Lozhkin// Transportation Research Part D: Transport and Environment. –Elsevier Science Publishing Company, Inc. – 2016. – V. 47. – P. 251-264.

156. Ложкина, О.В. Прогнозирование воздействия двигателей автомобилей на атмосферу городов (на примере Санкт-Петербурга) / О. В. Ложкина, В. Р. Новиков, Д. В. Осипов, В. Н. Ложкин // Двигателестроение. – 2010. – № 4. – С. 19-21.

157. Ложкина, О.В. Перспективы сокращения экологического ущерба от автотранспорта в городах российской федерации на примере Санкт-Петербурга / В. Н. Ложкин, О. В. Ложкина // Биосфера. – 2011. – Т. 3, № 3. – С. 409-418.

158. Ложкина, О.В. Анализ физико-математических моделей атмосферной диффузии применительно к оценкам воздействия автотранспорта на городскую среду / О. В. Ложкина, В. В. Попов, А. Д. Кузнецова // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. – 2012. – № 1. – С. 59-66.

159. Лукьянов, С.В. Экспериментально-аналитические исследования загрязнения атмосферы вблизи КАД Санкт-Петербурга / С.В. Лукьянов, В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 2. – С. 7-14.

160. Васильев, А.Н. Принципы и техника нейросетевого моделирования / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов. – СПб.: Нестор-История, 2014. – 218 с.

161. Васильев, А.Н. Параметрические нейросетевые модели классических и неклассических задач для уравнения теплопроводности / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. – 2012. – Т. 3, № 153. – С.136-144.

162. Васильев, А.Н. Многоуровневые модели городской транспортной системы и ее воздействие на окружающую среду в мегаполисах / А.Н. Васильев, Д.А. Тархов, Т.А. Шемякина // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: материалы XV Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2015. – С. 84-87.

163. Васильев, А.Н. Нейросетевая модель загрязнения атмосферного воздуха Санкт-Петербурга по данным мониторинга. Мезоуровень / А.Н. Васильев // проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: материалы XV Международной научно-технической конференции. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 2015. – С. 100-104.

164. Kampe, H.J. 1952. Traberts`s formula and the determination of the water content in clouds / H. J. Kampe, H. K. Weickmann // Journal of Meteorology. – 1952. – V.9. – P. 167-171.

165. Бартенева, О.Д. Экспериментальные исследования оптических свойств приземного слоя атмосферы / О. Д. Бартенева, Е. Н. Довгялло, Е. А. Полякова // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. – 1967. – С. 220-244.

166. Оникул, Р.И. О расчете дальности видимости при существенном антропогенном аэрозольном загрязнении воздуха у земной поверхности / Р.И. Оникул, Е.А. Яковлева // Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: информационный бюллетень. – СПб.: НПК «Атмосфра», 2010. – № 1–2 (41–42). – С. 143-164.

167. Берлянд, М.Е. Туманы / М.Е. Берлянд, П.А. Воронцов, П.Н. Красиков, В.Я. Никандров, Н.В. Петренко. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 388 с.

168. Jiusto J.E., 1974. Remarks on Visibility in Fog / J.E. Jiusto // Journal of Applied Meteorology. – 1974. – V.13 – P. 608-610.

169. Гаврилов В.А. Прозрачность атмосферы и видимость / В.А. Гаврилов. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – 167 с.

170. Берлянд, М.Е. Моделирование загрязнения атмосферы из низких и холодных источников / М.Е. Берлянд, Е.Л. Генихович, Р.И. Оникул. // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 5. – С. 5-17.

171. Тимофеев, В.Д. Методика прогнозирования чрезвычайно опасного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали торфяным пожаром / В.Н. Ложкин, В.Д. Тимофеев, О.В. Ложкина, А.Н. Иванов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 3 (39). – С. 89-97.

172. Timofeev, V.D. Physical and mathematical modeling of pollutant emissions when burning peat / A. Vasilyev, V. Lozhkin, D. Tarkhov, O. Lozhkina, V. Timofeev // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. – 2017. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/919/1/012001/pdf>

173. Timofeev, V.D. Differential neural network approach in information process for prediction of roadside air pollution by peat fire / V. Lozhkin, D. Tarkhov, V. Timofeev, O. Lozhkina, A. Vasilyev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, – 2016. – V. 158. – №1. – P. 2-7. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1761/paper49.pdf>

174. Тимофеев, В.Д. Дифференциально-нейросетевой подход моделирования чрезвычайно опасного загрязнения воздуха автомагистрали торфяным пожаром в условиях низких температур / В.Н. Ложкин, В.Д. Тимофеев, О.В. Ложкина, А.Н. Васильев, Д.А. Тархов // Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы. Арктика – регион стратегических интересов: правовая политика и современные технологии обеспечения безопасности в арктическом регионе: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2016. – С. 55-59.

175. Тимофеев, В.Д. Дифференциально-нейросетевой подход в информационном процессе прогнозирования загрязнения воздуха автомагистрали торфяным пожаром / В.Д. Тимофеев, В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина, Е.С. Кобелев, А.Н. Васильев // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 29-30 сентября 2016 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2016. – С. 206-208.

176. Тимофеев, В.Д. Нейросетевой подход в информационном процессе прогнозирования загрязнения торфяным пожаром воздуха в районе

автомагистрали / А.Н. Васильев, В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина, Д.А. Тархов, В.Д. Тимофеев // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2016. – № 3. – С. 181-187.

177. Тимофеев, В.Д. Нейросетевые модели загрязнения торфяным пожаром воздуха в районе автомагистрали / А.Н. Васильев, В.Н. Ложкин, О.В. Ложкина, Д.А. Тархов, В.Д. Тимофеев // Проблемы информатики в образовании, управлении, экономике и технике: материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Пенза: АННОО «Приволжский Дом знаний», 2016. – С. 109-116.

178. Тимофеев, В.Д. Нейросетевой подход в решении задач прогнозирования загрязнения воздуха торфяным пожаром / В. Д. Тимофеев, В. Н. Ложкин, Е. С. Кобелев, Д. А. Тархов, А. Н. Васильев // Сборник статей XV Всероссийской научной конференции «Нейрокомпьютеры и их применение». Тезисы докладов. – Москва: ФГБОУ ВО МГППУ, 2017. – С. 104-106.

179. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.

180. Методические рекомендации МосМР 2.1.9.004-03. Критерии оценки риска для здоровья населения приоритетных химических веществ, загрязняющих окружающую среду [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/3715847>

181. Тимофеев, В.Д. Методика прогнозирования чрезвычайного воздействия продуктов горения торфяного пожара на безопасность дорожного движения / О. В. Ложкина, В. Д. Тимофеев, В. Н. Ложкин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2018. – №3 (47). – С.79-85.

182. Тимофеев, В.Д. Опасное воздействие «суперсмога» торфяного пожара и тумана на условия и участников дорожного движения / О.В. Ложкина, В.Д. Тимофеев, В.Н. Ложкин // Транспорт России: проблемы и перспективы: материалы Международной научно-практической конференции 13-14 ноября 2018 г. Институт проблем транспорта им. Н. С. Соломенко РАН. – СПб.: СПбУ ГПС МЧС России. – 2018. – Т. 2. – С.48-51.

Приложение А

Таблица А.1 – Нормативные значения содержания угарного газа и взвешенных частиц PM_{10} и $PM_{2.5}$ в воздухе, установленные Всемирной организацией здравоохранения, в Российской Федерации, Соединенных штатах Америки и Европейском Союзе.

Показатель*	ВОЗ	РФ	ЕС	США
$ПДК_{CO_{mp}}, \text{мг/м}^3$	5	4	4	5
$ПДК_{CO_{cc}}, \text{мг/м}^3$	3	2	1	3
$ПДК_{CO_{cg}}, \text{мг/м}^3$	4	4	3	4
$ПДК_{PM_{2.5mp}}, \text{мкг/м}^3$	-	160	-	-
$ПДК_{PM_{2.5cc}}, \text{мкг/м}^3$	25	35	25	35
$ПДК_{PM_{2.5cg}}, \text{мкг/м}^3$	10	25	12	12** 15****
$ПДК_{PM_{10mp}}, \text{мкг/м}^3$	-	300	-	-
$ПДК_{PM_{10cc}}, \text{мкг/м}^3$	50	60	50*****	150*****
$ПДК_{PM_{10cg}}, \text{мкг/м}^3$	20	35	20	-
<i>Примечания: *ПДК_{CO_{mp}}, ПДК_{PM_{2.5mp}} и ПДК_{PM_{10mp}} – допустимые максимально-разовые концентрации в воздухе угарного газа, мг/м³, и частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10}, мкг/м³ (20-минутное осреднение); ПДК_{CO_{cc}}, мг/м³, ПДК_{PM_{2.5cc}} и ПДК_{PM_{10cc}} – допустимые среднесуточные концентрации в воздухе частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10}, мкг/м³ (24-часовое осреднение); ПДК_{CO_{cg}}, мг/м³, ПДК_{PM_{2.5cg}} и ПДК_{PM_{10cg}} – допустимые среднегодовые концентрации в воздухе частиц $PM_{2.5}$ и PM_{10}, мкг/м³ (годовое осреднение); **Первичный стандарт (обеспечивает защиту здоровья уязвимых групп населения: астматиков, детей и пожилых людей); ***Вторичный стандарт (обеспечивает защиту общественного благосостояния, в том числе защиту от пониженной видимости и нанесения ущерба здоровью животных, сельскохозяйственным культурам, растительности, зданиям и сооружениям); ****Показатель не может быть превышен более 35 раз в году; *****Показатель не может быть превышен более 1 раза в году.</i>				

Приложение Б

Таблица Б.1 – Рекомендуемая скорость движения на автомобильных дорогах в соответствии с правилами дорожного движения и СП 34.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-85* (с Изменением № 1)».

Расчетная скорость, км/ч	Наименьшее расстояние видимости, м		
	До остановки	До встречного автомобиля	При обгоне
120	250	450	800
100	200	350	700
90	200	300	650
80	150	250	600
60	85	170	500
50	75	130	400
40	55	110	-
30	45	90	-
20	25	50	-

Приложение В

Для прогнозирования риска возникновения рефлекторных эффектов при загрязнении атмосферного воздуха используют следующие уравнения:

1-ый класс опасности: $Prob = -9,15 + 11,66 \cdot \lg(C_i/\text{ПДК}_{\text{МР}})$

2-ой класс опасности: $Prob = -5,51 + 7,49 \cdot \lg(C_i/\text{ПДК}_{\text{МР}})$

3-ий класс опасности: $Prob = -2,35 + 3,73 \cdot \lg(C_i/\text{ПДК}_{\text{МР}})$

4-ый класс опасности: $Prob = -1,41 + 2,33 \cdot \lg(C_i/\text{ПДК}_{\text{МР}})$,

Где C_i – концентрация воздействующего вещества; $\text{ПДК}_{\text{МР}}$ – максимальная разовая предельно допустимая концентрация; $Prob$ – величина, связанная с риском здоровью по закону нормального вероятностного распределения. Риск определяется по значению пробит-функции (см. Таблицу В.1).

Таблица В.1 – Нормальное вероятностное распределение.

Prob	Risk	Prob	Risk
-3,0	0,001	0,1	0,540
-2,5	0,006	0,2	0,579
-2,0	0,023	0,3	0,618
-1,9	0,029	0,4	0,655
-1,8	0,036	0,5	0,692
-1,7	0,045	0,6	0,726
-1,6	0,055	0,7	0,758
-1,5	0,067	0,8	0,788
-1,4	0,081	0,9	0,816
-1,3	0,097	1,0	0,841
-1,2	0,115	1,1	0,864
-1,1	0,136	1,2	0,885
-1,0	0,157	1,3	0,903
-0,9	0,184	1,4	0,919
-0,8	0,212	1,5	0,933
-0,7	0,242	1,6	0,945

Prob	Risk	Prob	Risk
-0,6	0,274	1,7	0,955
-0,5	0,309	1,8	0,964
-0,4	0,345	1,9	0,971
-0,3	0,382	2,0	0,977
-0,2	0,421	2,5	0,994
-0,1	0,460	3,0	0,999
0,0	0,500		

Приложение Г

УТВЕРЖДАЮ

Начальник отдела диссертационных
советов и докторантуры Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра
Великого»



д.т.н., профессор

А.В. Митяков

«10» 06 2019 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы Владимира
Дмитриевича Тимофеева на тему «Методика прогнозирования
чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами
горения торфяного пожара» по специальности 05.26.02 – безопасность в
чрезвычайных ситуациях (транспорт)**

Мы, нижеподписавшиеся

профессор кафедры высшей математики Института прикладной
математики и механики Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук
Александр Николаевич Васильев,

профессор кафедры высшей математики Института прикладной
математики и механики Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет Петра Великого», доктор технических наук
Дмитрий Альбертович Тархов, –

настоящим актом подтверждаем, что следующие результаты
диссертационного исследования В.Д. Тимофеева:

- модель распространения поллютантов (угарного газа и
мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного
очагов горения торфа, основанная на современных теоретических

представлениях о механизмах горения торфа, переносе загрязняющих веществ в атмосфере и результатах измерений;

- методика прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц, —

использованы в промежуточных и заключительном отчетах о научно-исследовательской работе на тему «Информационные модели на основе иерархических гетерогенных нейронных сетей в исследовании влияния объектов транспортной инфраструктуры на окружающую среду», реализованной при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, № проекта 14-01-00733 А, 2015-2016 гг.

Профессор кафедры высшей математики
Института прикладной математики и
механики ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический
университет Петра Великого»,
доктор технических наук



А.Н. Васильев

Профессор кафедры высшей математики
Института прикладной математики и
механики ФГАОУ ВО «Санкт-
Петербургский политехнический
университет Петра Великого»,
доктор технических наук



Д.А. Тархов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника ФКУ
«ЦУКС ГУ МЧС России по г.
Санкт-Петербургу»
полковник вн. сл.

А.Г. Пономарев
«06» 06 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Владимира Дмитриевича Тимофеева на тему «Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами горения торфяного пожара» по специальности 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт) в практическую деятельность ФКУ «Центр управления в кризисных ситуациях главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу»

Комиссия в составе:

председателя – начальника дежурной смены отдела взаимодействия с органами управления функциональных и территориальных подсистем РСЧС федерального округа, майор вн. сл. Чудилов А.А.

членов комиссии:

заместителя начальника отдела-начальник дежурной смены отдела организации оперативной службы федерального казенного учреждения «Центр управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу» майор вн. службы Путинцев Вячеслав Юрьевич

заместителя начальника отдела-начальник дежурной смены отдела организации оперативной службы федерального казенного учреждения «Центр управления в кризисных ситуациях Главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу» майор вн. службы Венгеров Дмитрий Александрович

настоящим подтверждает использование результатов диссертационного исследования В.Д. Тимофеева, а именно:

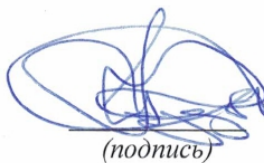
- методики прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара с

оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц;

- критериев ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности, обоснованные с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

в практической деятельности ФКУ «Центр управления в кризисных ситуациях главного управления МЧС России по г. Санкт-Петербургу» для прогнозирования чрезвычайной ситуации от воздействия продуктов горения торфяных пожаров

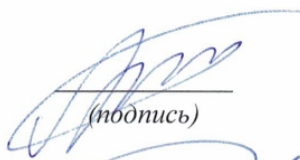
Председатель:



(подпись)

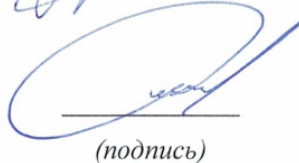
Чудилов А.А.

Члены комиссии:



(подпись)

Путинцев В.Ю.



(подпись)

Венгеров Д.А.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель начальника
ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский
университет ГПС МЧС России,
доктор политехнических наук

Т. В. Мусиенко

«26»

20 19 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Владимира Дмитриевича Тимофеева на тему «Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами горения торфяного пожара» по специальности 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт)

в учебную и научно-исследовательскую деятельность ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.

Комиссия в составе:

председателя – начальника кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, доцента, подполковника внутренней службы Сытдыкова Максима Равильевича;

членов комиссии:

профессора кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации Ложкина Владимира Николаевича;

доцента кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата педагогических наук, доцента, полковника внутренней службы Ивановой Елены Сергеевны;

доцента кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства, кандидата технических наук, полковника внутренней службы Филановского Александра Марковича, -

настоящим подтверждает, что следующие результаты диссертационного исследования В.Д. Тимофеева на тему «Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами горения торфяного пожара» внедрены в учебный процесс кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России, а именно:

1. Модель распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного очагов горения торфа, основанная на современных теоретических представлениях о механизмах горения торфа, переносе загрязняющих веществ в атмосфере и результатах измерений.

2. Методика прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц.

3. Критерии ранжирования дорожной ситуации по уровню опасности, обоснованные с учетом риска для здоровья водителей и пассажиров автотранспортных средств и снижения дальности видимости.

Второй результат внедрен в тему 1 «Введение. Техносфера Земли. Классификация технических систем. Виды и факторы техногенного риска», «Надежность технических систем и техногенный риск» (специальность 20.05.01 – «Пожарная безопасность»).

Первый, второй и третий результаты внедрены в тему 5 «Классификация чрезвычайных ситуаций, аварий и катастроф. Причины возникновения и прогнозирование чрезвычайных ситуаций в техносфере, на промышленных предприятиях и транспорте» дисциплины «Надежность технических систем и техногенный риск» (специальность 20.05.01 – «Пожарная безопасность»).

Первый, второй и третий результаты использованы в отчетах о НИР:
- «Контроль и прогнозирование чрезвычайно опасного воздействия торфяного пожара на автотранспортный процесс» (№ гос. регистрации АААА-А17-117121340096-9).

Начальник кафедры пожарной,
аварийно-спасательной техники и
автомобильного хозяйства, кандидат
технических наук, доцент, подполковник
внутренней службы

 М.Р. Сытдыков

Профессор кафедры пожарной,
аварийно-спасательной техники и
автомобильного хозяйства, доктор
технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки Российской
Федерации

 В.Н. Ложкин

Доцент кафедры пожарной, аварийно-
спасательной техники и автомобильного
хозяйства, кандидат педагогических наук,
доцент, полковник внутренней службы

 Е.С. Иванова

Доцента кафедры пожарной, аварийно-
спасательной техники и автомобильного
хозяйства, кандидат технических наук,
полковник внутренней службы

 А.М. Филановский



НИИ АТМОСФЕРА

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
“Научно-исследовательский институт
охраны атмосферного воздуха”
АО “НИИ Атмосфера”**

194021, г.Санкт-Петербург, ул.Карбышева, 7, тел./факс: (812) 297-8662
E-mail: info@nii-atmosphere.ru, http://www.nii-atmosphere.ru
ОКПО: 23126426, ОГРН: 1097847184555, ИНН/КПП: 7802474128 / 780201001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор АО

«Научно-исследовательский инсти-
тут охраны атмосферного воздуха»

О.А. Марцынковский



_____ 2019 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Владимира Дмитриевича Тимофеева на тему «Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами горения торфяного пожара» по специальности 05.26.02 – безопасность в чрезвычайных ситуациях (транспорт) в практическую деятельность АО «Научно-исследовательский институт охраны атмосферного воздуха»

Комиссия в составе:

председателя – начальника лаборатории методологии нормирования выбросов в атмосферу, заместителя начальника отдела методических основ нормирования и установления технических нормативов выбросов, кандидата географических наук Николая Сергеевича Буренина;

членов комиссии:

научного сотрудника лаборатории нормирования выбросов в атмосферу Вадима Станиславовича Панфилова;

ведущего инженера лаборатории нормирования выбросов в атмосферу Ирины Николаевны Нахимовской; -

настоящим Актом подтверждает, что следующие результаты диссертационного исследования В.Д. Тимофеева

- модель распространения поллютантов (угарного газа и мелкодисперсных взвешенных частиц) вблизи точечного и площадного очагов горения торфа, основанная на современных теоретических

представлениях о механизмах горения торфа, переносе загрязняющих веществ в атмосфере и результатах измерений;

- методика прогнозирования чрезвычайного загрязнения воздуха в окрестности автомагистрали продуктами горения торфяного пожара с оценкой условий формирования опасно высоких концентраций угарного газа и взвешенных частиц, –

были использованы при обосновании Национального стандарта Российской Федерации ГОСТ Р 56162 – 2019 «ВЫБРОСЫ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРУ. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории» и «Методики определения выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух от автотранспортных потоков, движущихся по автомагистралям Санкт-Петербурга» (утв. распоряжением Комитета по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности Правительства Санкт-Петербурга N 33-р от 19.01.2019) для уточнения характеристик загрязнения придорожного воздуха от внешних источников.

Начальник лаборатории методологии
нормирования выбросов в атмосферу,
заместитель начальника отдела
методических основ нормирования и
установления технических нормативов
выбросов, к.г.н.



Н.С. Буренин

Старший научный сотрудник
лаборатории нормирования выбросов в
атмосферу



В.С. Панфилов

Ведущий инженер лаборатории
нормирования выбросов в атмосферу



И.Н. Нахимовская