

Научная статья

УДК 614.841.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-47-64

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ ОТ МОДЕЛЬНЫХ ОЧАГОВ ГОРЕНИЯ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Ложкина Ольга Владимировна;

✉ Орловцев Сергей Викторович.

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

✉osv-01@yandex.ru

Аннотация. Обоснование моделей распространения и переноса в воздушном пространстве токсичных компонентов дыма от очагов горения травянистой растительности является ключевой задачей при разработке методики прогнозирования развития чрезвычайных ситуаций на автомагистралях, находящихся в зоне опасного воздействия продуктов горения ландшафтных пожаров. Представлены результаты экспериментальных и численных исследований распространения опасных продуктов горения (оксида углерода и мелкодисперсных взвешенных частиц $PM_{2,5}$) в окрестности четырех модельных очагов горения травянистой растительности (клевера лугового, овсяницы луговой, костреца безостого, смеси трав тимофеевки луговой и клевера лугового). В ходе сравнительного анализа результатов экспериментальных и численных исследований по модели Гаусса для всех образцов травянистой растительности было выявлено, что расчетные концентрации СО отклонялись от измеренных не более чем на 24,7 %. Расхождение расчетных концентраций СО и $PM_{2,5}$, полученных по модели Гаусса и к-модели, составило соответственно 2,1–33,3 % и 8,9–31,3 %. Полученные результаты свидетельствуют об адекватности примененных расчетных моделей и подтверждают перспективность их использования для прогнозирования распространения поллютантов от очагов горения травянистой растительности.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, травяные пожары, дым, угарный газ, мелкодисперсные взвешенные частицы, моделирование распространения поллютантов в атмосфере

Для цитирования: Ложкина О.В., Орловцев С.В. Экспериментально-расчетное исследование распространения поллютантов от модельных очагов горения травянистой растительности // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 2 (74). С. 47–64. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-47-64

Scientific article

EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL STUDY OF POLLUTANTS SPREAD FROM MODEL GRASS FIRE SPOTS

Lozhkina Olga V.;

✉Orlovtshev Sergey V.

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

✉osv-01@yandex.ru

Abstract. Adaptation of pollutants' transportation models from burning vegetations is a key task in developing a methodology for predicting the development of emergency situations on highways located in the zone of hazardous impact of combustion products of landscape fires. The paper describes the results of experimental and numerical investigations of the dispersion of hazardous combustion products (carbon monoxide and fine suspended particles $PM_{2,5}$) from 4 model grass fire spots (*Trifolium pratense*, *Festuca pratensis*, *Bromus inermis*, a mixture of *Phleum pratense* and *Trifolium pratense*). The comparative analysis of the results

of experimental and numerical investigations using the Gaussian model for all grass samples has shown that the calculated concentrations of CO deviated from the measured ones by no more than 24,7 %. The discrepancy between the calculated concentrations of CO and PM_{2,5} obtained by means of the Gaussian model and the k-model was 2,1–33,3 % and 8,9–31,3 %, respectively. The results confirm the adequacy of the applied calculation models and their potential for predicting the dispersion of pollutants from grass fires.

Keywords: emergencies, grass fires, smoke, carbon monoxide, fine particulate matter, modeling pollutants dispersion in the atmosphere

For citation: Lozhkina O.V., Orlovtsiev S.V. Experimental and computational study of pollutants spread from model grass fire spots // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 2 (74). P. 47–64. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-2-47-64.

1 Введение

Травяные пожары являются разновидностью природных ландшафтных пожаров и практически всегда связаны с неосторожным обращением человека с огнем. Они крайне опасны: для них характерно быстрое распространение и перенос горящих частиц на относительно большие расстояния (до 200 м при сильном ветре), образование большого количества дыма, опасность перехода на лес и жилые постройки населенных пунктов. Также данные пожары представляют угрозу безопасности дорожного движения, снижают биологическое разнообразие и устойчивость природных экосистем [1–4]. Образующиеся токсичные продукты горения, включая угарный газ, мелкодисперсные взвешенные частицы (PM), формальдегид, полициклические ароматические углеводороды, создают угрозу здоровью людей, негативно воздействуя на дыхательную, сердечно-сосудистую, нервную системы человека [5–8].

Нарушение правил пожарной безопасности нередко приводит к травяным пожарам. Согласно официальным данным космического мониторинга, приведенным ФБУ «Авиалесоохрана», по состоянию на 15 мая 2025 г. на территории Российской Федерации (https://public.aviales.ru/main_pages/openform1.shtml?2025-05-15) с начала года зафиксировано уже 10 595 ландшафтных (природных) пожаров. Так, например, в конце апреля и начале мая 2025 г. в Архангельской обл. произошли сразу два крупных травяных пожара: один – на заливных лугах недалеко от д. Усть-Ваге Виноградовского округа (сгорели 2 га сухой травы), второй – рядом с д. Большое Тойнокурье, вблизи автодороги М-8, пожар был заснят водителями (рис. 1).



а

б

Рис. 1. Травяные пожары в Архангельской обл.:
а – вблизи д. Усть-Ваге в Виноградовском округе, 28.04.2025;
б – в окрестности автодороги М-8 вблизи д. Большое Тойнокурье, 03.05.2024
(<https://vk.com/agps29>; <https://29.ru/text/incidents/2025/05/03/75416936/>)

В условиях глобального потепления климата, как отмечают многие специалисты, риск возникновения природных пожаров возрастает [9, 10], поэтому проблема исследования условий и закономерностей возникновения и развития ландшафтных пожаров, влияния их на природные экосистемы и изменение климата, влияния дыма и опасных продуктов горения на здоровье людей, транспортную деятельность находит отражение в трудах российских и зарубежных ученых [11–18].

Исаевой Л.К. с коллегами было установлено, что во время масштабных торфяных и низовых пожаров в Московской и прилегающих областях в 2002 г. около 750 тыс. чел. находились длительное время на задымленных территориях и могли подвергнуться опасному воздействию продуктов горения природных пожаров, а в 2010 г. – около 500 тыс. чел. [11]. Этой же группой специалистов методом газожидкостной хроматографии было проведено исследование содержания канцерогена бенз(а)пирена в почве, листьях кустарников, хвое, ягодах и грибах вблизи выгоревших торфяников и было установлено, что его концентрация в почве в десятки и сотни раз больше предельно-допустимой концентрации (ПДК), а в листьях кустарников и хвое деревьев содержится больше бензапирена, чем в ягодах и грибах: 21,2, 24,2, 4,9 и 4,1 мкг/кг соответственно [12].

Самсонов Ю.Н. и В.А. Иванов с коллегами в 2010–2012 гг. опубликовали результаты исследований дисперсного, химического и морфологического состава аэрозольных частиц – компонентов дыма 18 натурных модельных очагов ландшафтных пожаров на лесной территории в Красноярском крае [13, 14]. Было установлено, что при сгорании 1 га лесного горючего материала в атмосферу выделилось 0,2–1 т мелкодисперсных взвешенных частиц (~1–7 % от сгоревшей биомассы); содержание частиц в дыме непосредственно над очагом пожара составило от 10–15 до 80–100 мг/м³, содержание частиц с аэродинамическим диаметром менее 3 мкм составило 80 %, и они практически полностью состояли из органического вещества и элементного углерода (черного углерода).

В Санкт-Петербургском университете ГПС МЧС России проводились экспериментальные и численные исследования распространения продуктов горения от модельных очагов горения торфа и торфяных пожаров [15–19]. В работе [19] установлено, что при торфяном пожаре на площади ~40 га при скорости эмиссии дыма 1,5–2,5 м/с, мощности эмиссии СО 232–271 г/с, PM_{2,5} – 23,5–33 г/с, PM₁₀ – 34–41,5 г/с, скорости ветра 0,5–1 м/с на автодороге, находящейся на удалении 2–5 км от пожара, могут формироваться повышенные концентрации СО в 1,2–1,5 раза, превышающие ПДК_{МР}, и опасно высокие концентрации PM₁₀ и PM_{2,5}, превышающие ПДК_{МР} в 2,5–7,0 раз и 4,5–11,5 раз соответственно.

Специалисты Управления исследований и разработок Агентства по охране окружающей среды США на протяжении многих лет изучают процессы загрязнения воздуха продуктами горения стихийных природных пожаров и санкционированных профилактических палов растительности с целью разработки методов инвентаризации выбросов поллютантов (опасных компонентов дыма) и обоснования применимости различного инструментального оборудования для качественно-количественного анализа компонентов дыма в натурных полевых и лабораторных исследованиях [20, 21].

В целом можно отметить, что, несмотря на актуальность проблемы, недостаточно изучено влияние видов растительности на развитие процесса горения, качественно-количественный состав продуктов горения и дымообразование; недостаточно исследованы процессы распространения загрязняющих веществ в приземном воздухе дыма от ландшафтных пожаров. В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явилось экспериментально-расчетное исследование распространения поллютантов от модельных очагов горения травянистой растительности разных видов.

2 Объекты и методы исследования

2.1 Экспериментальные полевые исследования

В Пушкинском р-не Санкт-Петербурга в июне 2024 г. в ясную погоду с площади 4 м² были отобраны широко распространенные в Северо-Западном регионе и других регионах Российской Федерации образцы травянистой растительности:

- 1) Клевер луговой.
- 2) Овсяница луговая.
- 3) Кострец безостый.

4) Смесь трав тимофеевки луговой и клевера лугового в соотношении 10:1.

На рис. 2 приведены фотоснимки с места покоса образцов.

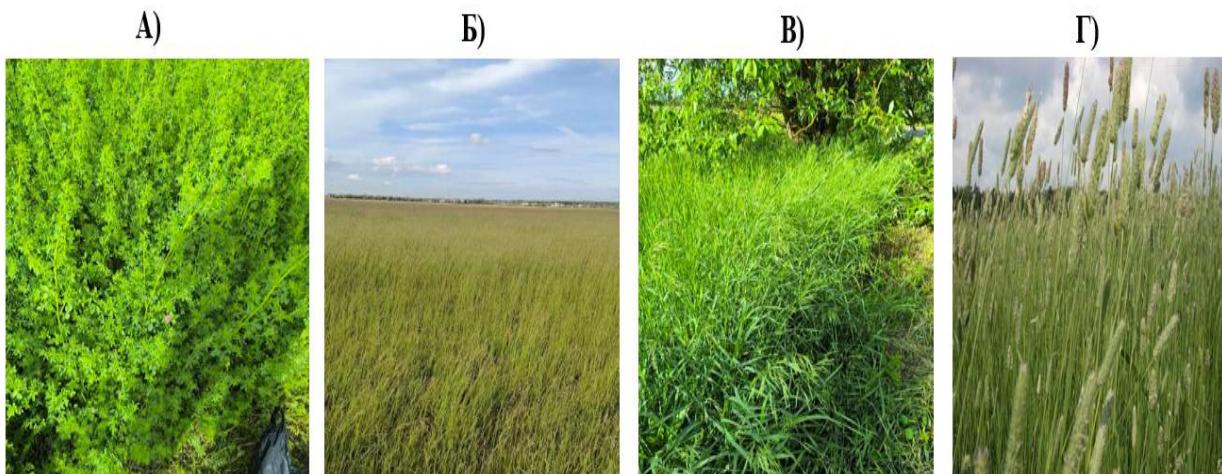


Рис. 2. Фотоснимки, сделанные на месте покоса образцов травянистой растительности:

- а) клевера лугового;
- б) овсяницы луговой;
- в) костреца безостого;
- г) тимофеевки луговой и клевера лугового

Все образцы взвешивались сразу после покоса (с естественным влагосодержанием) и после полного высыхания на лабораторных весах ПЕТВЕС ЕТ-В3000-Г (ООО ПетВес, Санкт-Петербург).

Огневые полевые испытания проводились в октябре 2024 г. в п. Шушары Пушкинского р-на Санкт-Петербурга в ясную погоду при температуре воздуха +7 °C, влажности воздуха 93 %, северо-западном ветре, скорость которого составила 2–4 м/с. Образцы травянистой растительности равномерно размещались на прямоугольном огнеупорном поддоне 1,25 x 0,95 м, поджигались с одного края, так чтобы огонь распространялся по растительному горючему материалу (РГМ) в направлении ветра. После каждого огневого эксперимента зольный остаток удалялся и проводился эксперимент для другого образца.

По направлению ветра от модельного очага горения были установлены метки с шагом 1 м для обозначения контрольных точек проведения замеров. В контрольных точках проводили измерение содержания CO и мелкодисперсных аэрозолей. Результаты экспериментального исследования распространения аэрозолей представлены в статье авторов [22]. Время при проведении экспериментов контролировалось секундомером Агат 010 с точностью 0,2 с. Полевые эксперименты проводились с использованием поверенного газоаналитического оборудования, характеристики приборов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Технические характеристики газоаналитических приборов,
использованных для измерения концентрации оксида углерода**

| Прибор | Производитель | Датчик | Диапазон измерений | Погрешность измерений |
|----------------------|---|----------------------|-------------------------|-----------------------|
| ПГА-200 | ЗАО «НПП «Электростандарт» / Россия | Электрохимический | 0–120 мг/м ³ | ±5 мг/м ³ |
| Инфракар 5М3Т.02Л | ООО «Альфа-динамика» / Россия | Оптико-адсорбционный | 0–7 % | ±3 % |

На рис. 3 для наглядности представлен процесс измерения концентраций поллютантов вблизи модельного очага горения образца клевера лугового.



**Рис. 3. Процесс измерения концентраций поллютантов
вблизи модельного очага горения образца клевера лугового**

2.2 Расчетные исследования

Расчетные исследования распространения компонентов дыма (СО и мелкодисперсных взвешенных частиц PM_{2,5}) в окрестности модельных очагов горения травянистой растительности проводили с использованием модели Гаусса [3, 23, 24] и градиентной модели (к-модели), базирующейся на уравнении турбулентной диффузии и ряде гидродинамических уравнений, разработанной советско-российскими учеными [25, 26].

Гауссова модель – широко используемый в мировой практике подход для прогнозирования распространения загрязняющих веществ от источника выброса, в том числе продуктов горения от небольших природных пожаров (эта модель положена в основу программных продуктов VSMOKE и SASEM) и бытовых пожаров [3, 23]. На рис. 4 представлена иллюстрация применимости Гауссова распределения для описания концентрационных профилей загрязняющих веществ в шлейфе дыма точечного очага горения.

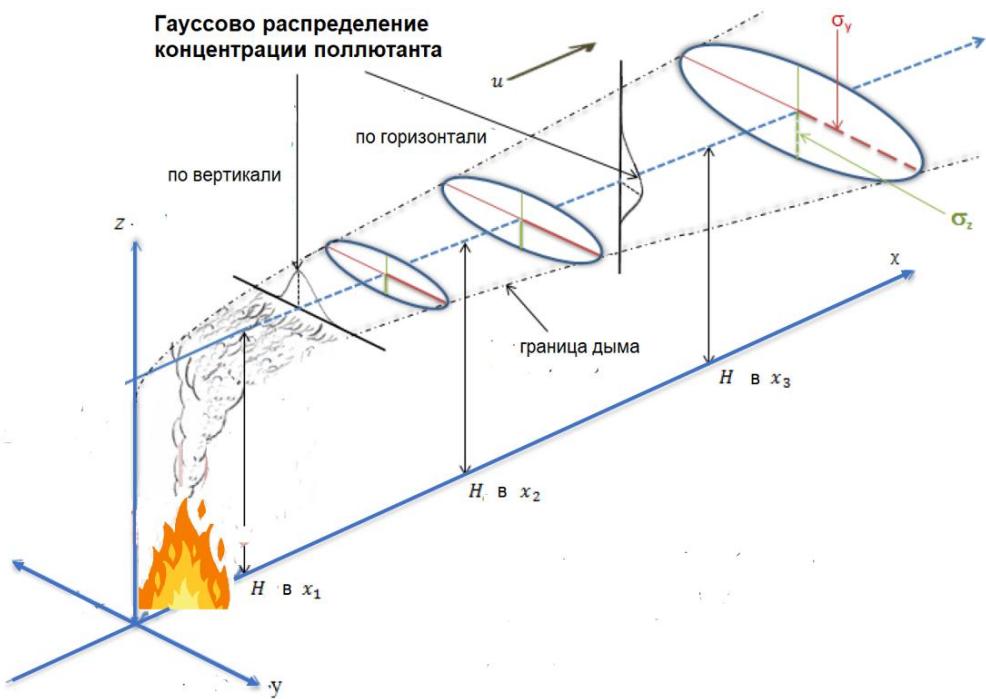


Рис. 4. Схематическое изображение распространения загрязняющих веществ от источника горения и иллюстрация применимости Гауссова распределения для описания концентрационных профилей загрязняющих веществ в шлейфе дыма

Уравнение для нахождения концентрации загрязняющего вещества в некоторой точке с координатами (x, y, z) имеет следующий вид [22, 23]:

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

где $C(x, y, z)$ – содержание загрязняющего вещества в точке с координатами x, y, z ; Q – удельный выброс загрязняющего вещества в атмосферу, г/с; H – высота источника над поверхностью, м; U – скорость ветра, м/с; σ_y, σ_z – соответственно коэффициенты горизонтальной и вертикальной дисперсии в направлениях, перпендикулярных направлению ветра, м, они зависят от стабильности атмосферы и от расстояния до источника; предполагается, что ось x ориентирована по направлению ветра.

Максимальная концентрация загрязняющего вещества ($\text{г}/\text{м}^3$) на оси симметрии шлейфа дыма на расстоянии x (по направлению ветра) от источника рассчитывается по формуле:

$$C_{max}(x) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z U}. \quad (2)$$

Концентрация загрязняющего вещества на уровне земли на расстоянии x (по направлению ветра) от источника находится по формуле:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_x U} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right). \quad (3)$$

Следует отметить, что сначала в Советском Союзе, а затем в России наибольшее распространение получила к-модель, разработанная в Главной геофизической обсерватории им. А.В. Войкова (модель ГГО) под руководством профессора М.Е. Берлянда [25, 26].

и положенная в основу официальных методических документов для расчета распространения поллютантов в воздухе: ОНД-86 – методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий, и пришедшем ей на смену документе «Методы расчета рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе» (утверждены приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 6 июня 2017 г. № 273).

Если разность температур дымовых газов и наружного воздуха $\Delta T > 50^{\circ}\text{C}$, максимальное значение концентрации загрязняющего вещества (C , $\text{г}/\text{м}^3$), которое достигается на удалении x по оси дымового шлейфа, рассчитывается по формуле [19]:

$$C = \frac{AQFmn\eta V_D^{1/6}}{H^2 W_0^{1/2} \Delta T^{1/5}}, \quad (4)$$

где Q – удельный выброс загрязняющего вещества в атмосферу, $\text{г}/\text{с}$; H – высота источника над поверхностью, м; V_D – удельный объем выброса дымовых газов, $\text{м}^3/\text{с}$; W_0 – скорость выброса дымовых газов, $\text{м}/\text{с}$; F – безразмерный коэффициент, который характеризует скорость осаждения взвешенных частиц и зависит от их дисперсности, равен 1 для газов и мелкодисперсных аэрозолей размером менее 10 $\mu\text{м}$; A – коэффициент стратификации атмосферы, η – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа на распространение загрязняющих веществ, если перепад высот не превышает 50 м на один километр, $\eta = 1$; m и n – безразмерные коэффициенты, учитывающие температурные и геометрические характеристики источника выброса.

Расчетное прогнозирование по модели ГГО проводили с использованием программного продукта «Эколог» (ООО «НПФ Интеграл», Санкт-Петербург).

3 Результаты и обсуждение

3.1 Экспериментальное исследование распространения угарного газа от модельных очагов горения травянистой растительности

На основе анализа научных публикаций было установлено, что при сгорании 1 кг растительных горючих материалов может выделяться от 75 до 120 г СО и от 10 до 15 г мелкодисперсных взвешенных частиц [21, 27, 28]. Исходя из этих данных и фактического времени горения образцов растительного горючего материала (РГМ), были рассчитаны удельные выбросы СО и РМ в атмосферу. Объем продуктов горения был рассчитан исходя из элементного состава РГМ [29, 30].

Характеристики процессов горения и эмиссии СО и РМ четырех образцов растительности приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики процессов горения и эмиссии СО и РМ образцов растительного горючего материала

| Образец РГМ | Вид РГМ | Масса РГМ, кг | Длительность горения, с | $m(\text{CO})$, г | $m(\text{PM})$, г | $Q(\text{CO})$, $\text{г}/\text{с}$ | $Q(\text{PM})$, $\text{г}/\text{с}$ | $V_{\text{пп}}$, м^3 | V_D , $\text{м}^3/\text{с}$ |
|-------------|---|---------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 | Клевер луговой | 1,211 | 506 | 90,8–136,2 | 12,1–18,2 | 0,179–0,269 | 0,024–0,036 | 9,23 | 0,018 |
| 2 | Овсяница луговая | 0,742 | 144 | 55,7–83,6 | 7,4–11,1 | 0,39–0,58 | 0,051–0,077 | 5,94 | 0,041 |
| 3 | Кострец безостый | 1,907 | 257 | 129–193,5 | 17,2–25,8 | 0,5–0,75 | 0,067–0,1 | 15,26 | 0,059 |
| 4 | Смесь тимофеевки луговой и клевера (10:1) | 2,521 | 329 | 188,8–283,2 | 25,2–37,8 | 0,57–0,86 | 0,077–0,115 | 20,18 | 0,061 |

Примечание: m (СО) – масса СО, выделившегося при сгорании РГМ, г; m (PM) – масса мелкодисперсных взвешенных частиц, г, выделившихся при сгорании РГМ; Q (СО) – удельный выброс СО в атмосферу, г/с; Q (PM) – удельный выброс PM в атмосферу, г/с; $V_{\text{пп}}$ – объем продуктов горения, м³; V_d – удельный объем выброса дымовых газов, м³/с

Процесс горения 2, 3 и 4 образцов растительности протекал похожим образом: сухой РГМ быстро вспыхивал, огонь быстро распространялся по всей площади, длительность пламенной фазы составила соответственно 48, 93 и 113 с, а фазы тления – 96, 164 и 216 с. В случае первого образца при проведении огневых экспериментов были сложности с инициированием горения, кроме того, возникающие очаги быстро затухали. Образцы 2, 3, 4 сгорели полностью. Около трети образца 1 не сгорело.

Значения измеренных концентраций оксида углерода в шлейфе дыма от модельных очагов горения четырех образцов травянистой растительности на удалении от 1 до 10 м приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Усредненные массовые концентрации оксида углерода (г/м³)
в шлейфе дыма на расстоянии от 1 до 10 м от модельного очага горения**

| X, м | Клевер луговой | Овсяница луговая | Кострец безостый | Смесь тимофеевки луговой и клевера (10:1) |
|------|----------------|------------------|------------------|---|
| 1 | 0,469±0,041 | 0,488±0,053 | 0,824±0,072 | 993,25±0,098 |
| 2 | 0,218±0,019 | 0,265±0,034 | 0,470±0,061 | 0,724±0,098 |
| 3 | 0,126±0,011 | 0,148±0,013 | 0,287±0,045 | 0,435±0,058 |
| 4 | 0,075±0,006 | 0,103±0,009 | 0,163±0,014 | 0,292±0,025 |
| 5 | 0,049±0,006 | 0,069±0,008 | 0,105±0,027 | 0,191±0,016 |
| 6 | 0,037±0,012 | 0,047±0,006 | 0,093±0,012 | 0,124±0,013 |
| 7 | 0,028±0,012 | 0,034±0,003 | 0,083±0,009 | 0,085±0,007 |
| 8 | 0,014±0,01 | 0,025±0,003 | 0,059±0,005 | 0,073±0,006 |
| 9 | 0,010±0,005 | 0,024±0,002 | 0,035±0,003 | 0,049±0,004 |
| 10 | 0,007±0,003 | 0,012±0,005 | 0,024±0,003 | 0,027±0,004 |

Полученные результаты натурных измерений были использованы в дальнейшем для обоснования применимости модели Гаусса и к-модели для прогнозирования распространения поллютантов от очагов горения травянистой растительности.

**3.2 Расчетное исследование распространения СО и PM_{2,5}
от модельных очагов горения травянистой растительности**

Численные исследования были осуществлены для четырех образцов травянистой растительности на основании экспериментальных данных (табл. 2).

Моделирование распространения СО и PM_{2,5} от очагов горения по модели Гаусса было проведено для трех (из шести) категорий устойчивости атмосферы по Паскуиллу-Тернеру, а именно C-D, D и E, характеризующихся конкретными метеорологическими условиями (скоростью ветра, дневной инсоляцией, ночной облачностью), определяющими закономерности переноса и рассеивания атмосферных примесей [19, 20]. Категория C-D отвечает умеренно-нейтральной конвекции (турбулентности), D – нейтральной конвекции (турбулентности), E – умеренной устойчивости атмосферы или инверсии (табл. 4). Условия проведения эксперимента соответствовали категориям C-D и D. Расчеты для категории E проводились с целью получения данных о распространении поллютантов в приземной атмосфере при неблагоприятных для рассеивания метеоусловиях.

Таблица 4

**Метеорологические условия, характерные для категорий устойчивости атмосферы С-Д, Д и Е
(по Паскуиллу-Тернеру) [19, 20]**

| Категория устойчивости атмосферы | Скорость ветра, м/с | Дневная инсоляция, В/м ² | Ночная облачность |
|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|-------------------|
| C-D | 2–5 | 350–700 (умеренная) | – |
| D | 3–6 | <350 В/м ² (слабая) | – |
| E | 2 | – | Низкая облачность |

Расчетные значения концентраций CO и PM_{2,5} на удалении от 1 до 100 м от модельных очагов горения четырех образцов растительного горючего материала, рассчитанные по формулам (2), (3) (модели Гаусса) для категорий устойчивости атмосферы C-D, D и E, приведены в табл. 5–8.

Таблица 5

Расчетные значения концентраций CO и PM_{2,5} на разном удалении от очага горения клевера лугового для категорий устойчивости атмосферы С-Д, Д и Е

| x, м | Категория стабильности атмосферы | | | | | |
|------|----------------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--|
| | C-D | | D | | E | |
| | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ |
| 1 | 0,564–0,847 | 75,067– 112,762 | 0,696–1,046 | 92,708– 139,261 | 2,487–3,737 | 331,099– 497,359 |
| 2 | 0,159–0,239 | 21,215–31,867 | 0,248–0,372 | 32,963–49,515 | 0,835–1,255 | 111,194– 167,029 |
| 3 | 0,067–0,101 | 8,914–13,39 | 0,074–0,112 | 9,915–14,894 | 0,356–0,535 | 47,421–71,233 |
| 4 | 0,044–0,066 | 5,864–8,808 | 0,045–0,067 | 5,948–8,934 | 0,198–0,297 | 26,337–39,563 |
| 5 | 0,034–0,051 | 4,531–6,806 | 0,032–0,049 | 4,325–6,496 | 0,132–0,199 | 17,608–26,45 |
| 6 | 0,019–0,029 | 2,592–3,893 | 0,023–0,034 | 3,015–4,529 | 0,12–0,18 | 15,970–23,99 |
| 7 | 0,014–0,022 | 1,908–2,865 | 0,017–0,026 | 2,303–3,46 | 0,087–0,131 | 11,588–17,408 |
| 8 | 0,011–0,016 | 1,442–2,167 | 0,013–0,02 | 1,783–2,678 | 0,07–0,106 | 9,364–14,067 |
| 9 | 0,009–0,013 | 1,172–1,761 | 0,01–0,016 | 1,373–2,063 | 0,047–0,07 | 6,243–9,378 |
| 10 | 0,006–0,01 | 0,848–1,274 | 0,0054–0,008 | 0,714–1,073 | 0,0014–0,0021 | 0,184–0,276 |
| 20 | 0,003–0,005 | 0,463–0,695 | 0,004–0,006 | 0,505–0,758 | 0,012–0,018 | 1,637–2,46 |
| 30 | 0,002–0,003 | 0,238–0,357 | 0,002–0,003 | 0,281–0,422 | 0,008–0,012 | 1,032–1,55 |
| 40 | 0,0011–0,0018 | 0,16–0,24 | 0,0014–0,0021 | 0,186–0,279 | 0,005–0,008 | 0,703–1,056 |
| 50 | 0,00078–0,0012 | 0,104–0,156 | 0,00091– 0,0014 | 0,121–0,182 | 0,004–0,006 | 0,532–0,8 |
| 60 | 0,00058–0,0088 | 0,078–0,117 | 0,00074– 0,0011 | 0,098–0,147 | 0,003–0,004 | 0,378–0,567 |
| 70 | 0,00042–0,0063 | 0,056–0,084 | 0,00054– 0,00082 | 0,073–0,109 | 0,002–0,003 | 0,295–0,443 |
| 80 | 0,00033–0,0012 | 0,044–0,066 | 0,00042– 0,00063 | 0,055–0,083 | 0,0017–0,0026 | 0,227–0,34 |
| 90 | 0,00026–0,00039 | 0,035–0,052 | 0,00034– 0,0005 | 0,045–0,067 | 0,0014–0,002 | 0,183–0,274 |
| 100 | 0,00022–0,00033 | 0,029–0,044 | 0,0003–0,0004 | 0,039–0,059 | 0,0012–0,0018 | 0,159–0,239 |

Таблица 6

Расчетные значения концентраций СО и PM_{2,5} на разном удалении от модельного очага горения овсяницы луговой для категорий устойчивости атмосферы С-D, D и Е

| x, м | Категория стабильности атмосферы | | | | | |
|------|----------------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|
| | C-D | | D | | E | |
| | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ |
| 1 | 1,256–1,869 | 164,31–248,076 | 1,552–2,308 | 202,923–306,373 | 5,542–8,242 | 724,723–1094,19 |
| 2 | 0,355–0,528 | 46,435–70,108 | 0,552–0,821 | 72,15–108,933 | 1,861–2,768 | 243,385–367,464 |
| 3 | 0,149–0,222 | 19,512–29,459 | 0,166–0,247 | 21,703–32,767 | 0,794–1,18 | 103,797–156,713 |
| 4 | 0,098–0,146 | 12,835–19,378 | 0,1–0,149 | 13,018–19,655 | 0,441–0,656 | 57,648–87,038 |
| 5 | 0,076–0,113 | 9,918–14,974 | 0,072–0,108 | 9,466–14,291 | 0,295–0,438 | 38,541–58,191 |
| 6 | 0,043–0,064 | 5,673–8,565 | 0,05–0,075 | 6,6–9,963 | 0,267–0,398 | 34,957–52,777 |
| 7 | 0,032–0,047 | 4,175–6,304 | 0,039–0,057 | 5,042–7,612 | 0,194–0,288 | 23,365–38,297 |
| 8 | 0,024–0,036 | 3,158–4,768 | 0,03–0,044 | 3,902–5,892 | 0,157–0,233 | 20,497–30,947 |
| 9 | 0,02–0,029 | 2,565–3,873 | 0,023–0,034 | 3,006–4,539 | 0,104–0,155 | 13,665–20,631 |
| 10 | 0,014–0,021 | 1,856–2,802 | 0,012–0,018 | 1,563–2,361 | 0,031–0,046 | 0,402–0,606 |
| 20 | 0,008–0,012 | 1,013–1,529 | 0,008–0,013 | 1,105–1,668 | 0,027–0,041 | 3,585–5,412 |
| 30 | 0,004–0,006 | 0,521–0,786 | 0,005–0,007 | 0,615–0,929 | 0,017–0,026 | 2,259–3,41 |
| 40 | 0,0026–0,0039 | 0,35–0,528 | 0,003–0,005 | 0,407–0,615 | 0,012–0,017 | 1,538–2,322 |
| 50 | 0,0017–0,0026 | 0,228–0,344 | 0,002–0,003 | 0,265–0,401 | 0,009–0,013 | 1,165–1,759 |
| 60 | 0,0013–0,0019 | 0,170–0,257 | 0,0016–0,0024 | 0,215–0,324 | 0,006–0,009 | 0,827–1,248 |
| 70 | 0,00094–0,0014 | 0,123–0,186 | 0,0012–0,0018 | 0,159–0,24 | 0,005–0,007 | 0,645–0,974 |
| 80 | 0,00073–0,001 | 0,096–0,144 | 0,00093–0,0014 | 0,121–0,183 | 0,004–0,006 | 0,496–0,749 |
| 90 | 0,00058–0,00086 | 0,076–0,114 | 0,00075–0,0011 | 0,098–0,148 | 0,003–0,005 | 0,4–0,603 |
| 100 | 0,00048–0,00072 | 0,063–0,096 | 0,00066–0,00098 | 0,086–0,131 | 0,0026–0,004 | 0,348–0,526 |

Таблица 7

Расчетные значения концентраций СО и PM_{2,5} на разном удалении от модельного очага горения костреца безостого для категорий устойчивости атмосферы С-D, D и Е

| x, м | Категория стабильности атмосферы | | | | | |
|------|----------------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|
| | C-D | | D | | E | |
| | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ |
| 1 | 1,62–2,43 | 216–323 | 1,987 | 266,25–399,375 | 7,107 | 951,786 |
| 2 | 0,458–0,686 | 61,1–91,648 | 0,707–1,06 | 94,667–142 | 2,37–3,55 | 319,640–479,46 |
| 3 | 0,192–0,288 | 25,673–38,51 | 0,213–0,32 | 28,476–42,714 | 1,018–1,527 | 136,632–204,476 |
| 4 | 0,127–0,190 | 16,888–25,332 | 0,128–0,192 | 17,081–25,621 | 0,565–0,848 | 75,710–113,565 |
| 5 | 0,098–0,147 | 13,05–19,575 | 0,093–0,14 | 12,42–18,63 | 0,378–0,567 | 50,617–75,926 |
| 6 | 0,056–0,084 | 7,464–11,197 | 0,055–0,083 | 8,658–12,99 | 0,343–0,515 | 45,909–68,863 |
| 7 | 0,041–0,061 | 5,494–8,241 | 0,049–0,074 | 6,615–9,922 | 0,249–0,374 | 33,312–49,968 |
| 8 | 0,031–0,047 | 4,155–6,232 | 0,038–0,057 | 5,12–7,68 | 0,201–0,302 | 26,919–40,379 |
| 9 | 0,025–0,038 | 3,375–5,062 | 0,029–0,044 | 3,944–5,917 | 0,134–0,201 | 17,946–26,919 |
| 10 | 0,018–0,027 | 2,437–3,659 | 0,015–0,023 | 2,056–3,084 | 0,108–0,162 | 14,405–21,608 |
| 20 | 0,009–0,015 | 1,33–1,99 | 0,011–0,017 | 1,453–2,179 | 0,035–0,053 | 4,708–7,061 |

| x, м | Категория стабильности атмосферы | | | | | |
|------|----------------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|
| | C-D | | D | | E | |
| | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ |
| 30 | 0,0051–0,0077 | 0,684–1,026 | 0,006–0,009 | 0,809–1,214 | 0,022–0,033 | 2,966–4,45 |
| 40 | 0,0034–0,0051 | 0,459–0,689 | 0,004–0,006 | 0,535–0,803 | 0,015–0,023 | 2,02–3,03 |
| 50 | 0,0022–0,0033 | 0,299–0,449 | 0,0026–0,004 | 0,349–0,524 | 0,011–0,017 | 1,53–2,295 |
| 60 | 0,0017–0,0025 | 0,223–0,335 | 0,0021–0,0032 | 0,282–0,424 | 0,008–0,012 | 1,08–1,628 |
| 70 | 0,0012–0,0018 | 0,161–0,242 | 0,0016–0,0023 | 0,209–0,313 | 0,006–0,009 | 0,847–1,271 |
| 80 | 0,0009–0,0014 | 0,125–0,188 | 0,0012–0,0018 | 0,16–0,239 | 0,005–0,007 | 0,651–0,977 |
| 90 | 0,0007–0,0011 | 0,1–0,15 | 0,001–0,0014 | 0,129–0,193 | 0,004–0,006 | 0,525–0,787 |
| 100 | 0,0006–0,001 | 0,083–0,125 | 0,0008–0,0013 | 0,114–0,171 | 0,0035–0,005 | 0,457–0,686 |

Таблица 8

Расчетные значения концентраций CO и PM_{2,5} на разном удалении от модельного очага смеси трав тимофеевки луговой и клевера лугового (10:1) для категорий устойчивости атмосферы C-D, D и E

| x, м | Категория стабильности атмосферы | | | | | |
|------|----------------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|---|
| | C-D | | D | | E | |
| | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ | C (CO), г/м ³ | C (PM _{2,5}), мг/м ³ |
| 1 | 1,836–2,771 | 248,076–370,502 | 2,268–3,422 | 306,373–457,57 | 8,1–12,221 | 1094,19–1634,18 |
| 2 | 0,519–0,783 | 70,108–104,707 | 0,806–1,212 | 108,933–162,692 | 2,72–4,104 | 367,464–548,81 |
| 3 | 0,218–0,329 | 29,459–43,1 | 0,243–0,366 | 32,767–48,938 | 1,16–1,75 | 156,713–234,051 |
| 4 | 0,143–0,216 | 19,379–28,942 | 0,145–0,22 | 19,655–29,355 | 0,644–0,972 | 87,038–129,992 |
| 5 | 0,111–0,167 | 14,974–22,364 | 0,106–0,16 | 14,291–21,344 | 0,431–0,65 | 58,19–86,908 |
| 6 | 0,063–0,096 | 8,565–12,792 | 0,074–0,111 | 9,963–14,88 | 0,391–0,589 | 52,777–78,824 |
| 7 | 0,047–0,07 | 6,304–9,415 | 0,056–0,085 | 7,612–11,368 | 0,283–0,428 | 38,297–57,196 |
| 8 | 0,035–0,053 | 4,768–7,121 | 0,044–0,066 | 5,892–8,799 | 0,229–0,346 | 30,947–46,219 |
| 9 | 0,029–0,043 | 3,873–5,785 | 0,034–0,051 | 4,539–6,779 | 0,153–0,23 | 20,631–30,813 |
| 10 | 0,021–0,031 | 2,802–4,184 | 0,017–0,026 | 2,361–3,526 | 0,0045–0,0068 | 0,606–0,906 |
| 20 | 0,011–0,017 | 1,529–2,284 | 0,012–0,19 | 1,668–2,491 | 0,04–0,06 | 5,412–8,083 |
| 30 | 0,006–0,009 | 0,786–1,174 | 0,007–0,01 | 0,929–1,387 | 0,03–0,038 | 3,41–5,093 |
| 40 | 0,004–0,006 | 0,528–0,788 | 0,005–0,007 | 0,615–0,918 | 0,017–0,026 | 2,322–3,439 |
| 50 | 0,0025–0,0038 | 0,344–0,514 | 0,003–0,004 | 0,401–0,598 | 0,013–0,02 | 1,759–2,627 |
| 60 | 0,0019–0,0029 | 0,257–0,383 | 0,0024–0,0036 | 0,324–0,485 | 0,009–0,014 | 1,248–1,863 |
| 70 | 0,0014–0,002 | 0,186–0,277 | 0,0018–0,0026 | 0,24–0,358 | 0,007–0,011 | 0,974–1,455 |
| 80 | 0,001–0,0016 | 0,144–0,216 | 0,0014–0,002 | 0,183–0,274 | 0,006–0,008 | 0,749–1,118 |
| 90 | 0,00085–0,0013 | 0,114–0,171 | 0,0011–0,0016 | 0,148–0,22 | 0,006–0,008 | 0,603–0,901 |
| 100 | 0,0007–0,0011 | 0,096–0,143 | 0,00097–0,0015 | 0,131–0,195 | 0,0039–0,006 | 0,526–0,785 |

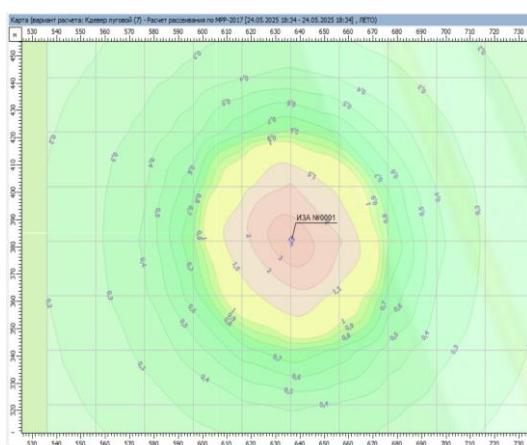
Сравнение данных табл. 4 и табл. 5–8 показывает, что наиболее близкие к экспериментальным расчетные концентрации CO в дыме получены для категорий устойчивости атмосферы C-D и D, что соответствовало условиям проведения эксперимента. Расчетные концентрации CO для устойчивости атмосферы C-D для образцов клевера лугового, костреца безостого, смеси тимофеевки луговой и клевера на удалении более 2 м от очага горения, а для образца овсяницы луговой на удалении более 3 м от очага горения отличались от экспериментальных значений не более чем на 21,6 %, 26,5 %, 26 % и 16,6 % соответственно. Расчетные концентрации CO для устойчивости атмосферы D для всех образцов РГМ (клевера лугового, овсяницы луговой, костреца безостого, смеси тимофеевки луговой и клевера) на удалении 3 м и более от очага горения отличались от экспериментальных данных не более чем на 11,1 %, 20,1 %, 10,8 % и 24,7 % соответственно. Согласованность данных

экспериментальных измерений и значений, полученных по модели Гаусса, подтверждает обоснованность применения этого подхода для прогнозирования распространения поллютентов от очагов горения растительных горючих материалов при разных метеорологических условиях.

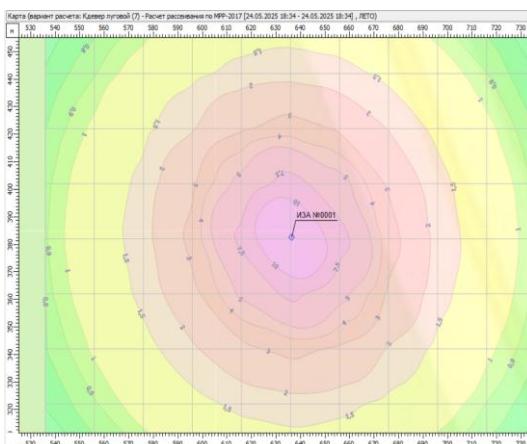
Расчетные исследования показывают, что при небольшой мощности эмиссии СО от небольшого точечного очага горения в диапазоне 0,39–0,86 г/с при относительно небольшой ветровой нагрузке (3–6 м/с) содержание угарного газа в дыме снижается до предельно допустимой максимально разовой концентрации ($\text{ПДК}_{\text{МР}}$), равной 5 мг/м³, на расстоянии 30–40 м от источника, а содержание $\text{PM}_{2,5}$ уменьшается до соответствующей $\text{ПДК}_{\text{МР}}$ (160 мкг/м³) на удалении 80–100 м от источника. При скорости ветра менее 2 м/с (ослабленном турбулентном обмене) концентрации СО достигает $\text{ПДК}_{\text{МР}}$ на расстоянии более 40–70 м, а концентрации $\text{PM}_{2,5}$ – на расстоянии более 90 м от очага горения.

Далее были выполнены расчеты с применением отечественного методологического подхода, разработанного в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова [22] и реализованного в программном продукте «Эколог» (ООО «НПФ Интеграл», Санкт-Петербург). В расчетном сценарии были заданы неблагоприятные метеорологические условия, способствующие аккумуляции вредных веществ в приземном воздушном слое: скорость ветра <2 м/с, коэффициент стратификации атмосферы – 180–200.

Результаты расчетного прогнозирования распространения оксида углерода и мелкодисперсных взвешенных частиц $\text{PM}_{2,5}$, полученные по модели ГГО для неблагоприятных для рассеивания поллютентов метеоусловий, визуализированы виде полей приземных концентраций в долях соответствующих $\text{ПДК}_{\text{МР}}$ на рис. 5–8.



а)



б)

**Рис. 5. Карты распространения СО (а) и $\text{PM}_{2,5}$ (б)
от модельного очага горения клевера лугового (шаг сетки 20 м)**

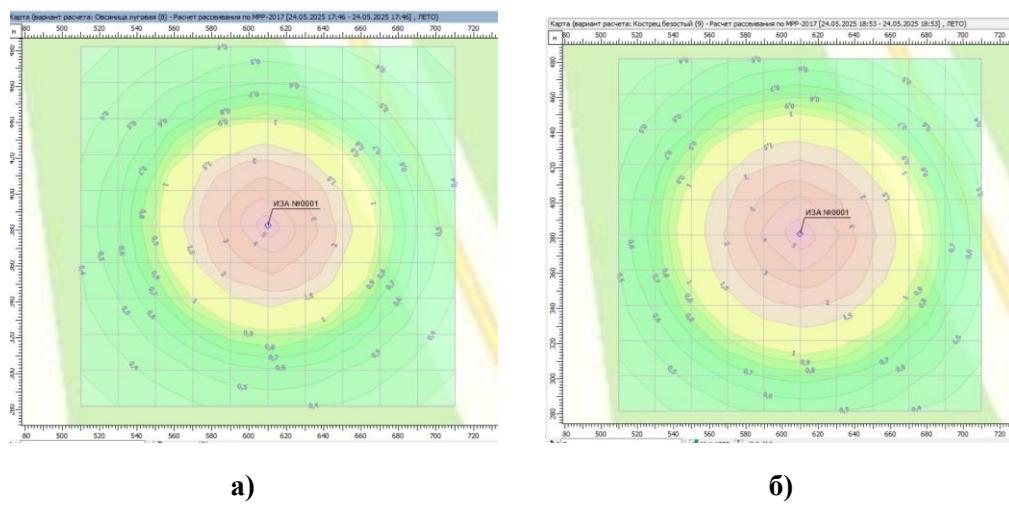


Рис. 6. Карты распространения CO (а) и PM_{2,5} (б) от модельного очага горения овсяницы луговой (шаг сетки 20 м)

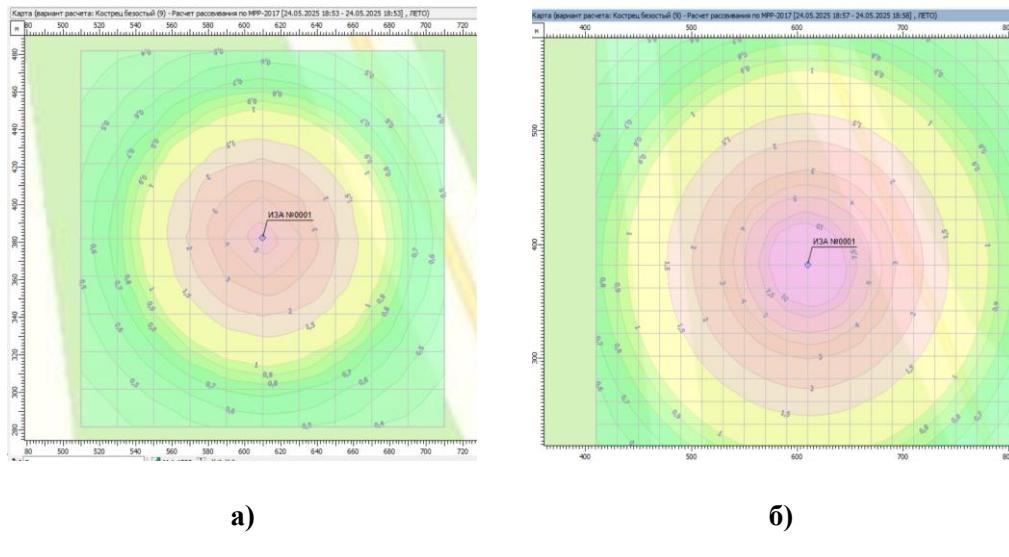
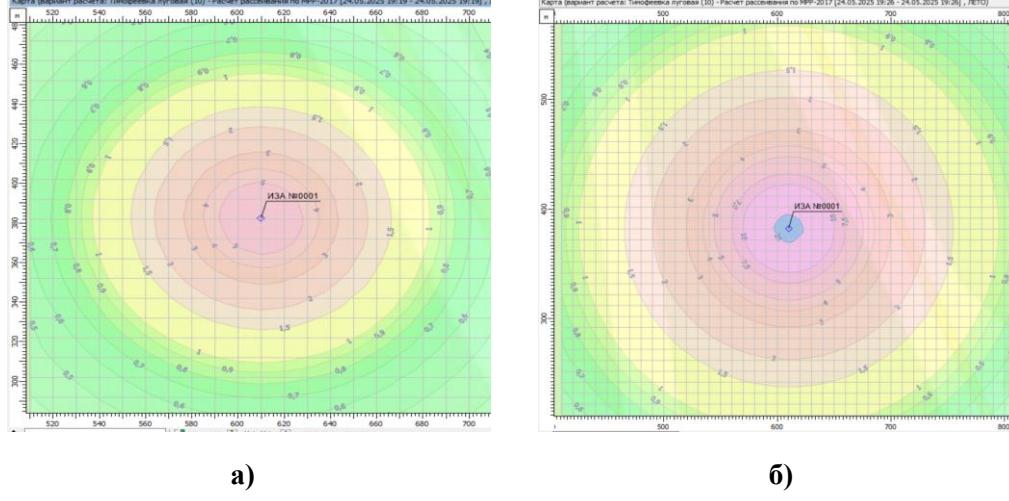


Рис. 7. Карты распространения СО (а) и РМ_{2,5} (б)
от модельного очага горения костреца безостого (шаг сетки 20 м)



**Рис. 8. Карты распространения СО (а) и $PM_{2,5}$ (б)
от модельного очага горения костреца безостого (шаг сетки 10 м)**

Сравнение расчетных данных, полученных для неблагоприятных метеоусловий по модели ГГО и по модели Гаусса (для категории устойчивости атмосферы Е), подтверждает их удовлетворительную корреляцию: для образца клевера лугового расхождение по СО составило 2,1–16,7 %, а по $PM_{2,5}$ – 8,9–26,3 %, для образца овсяницы луговой – по СО – 11,8–25,9 %, а по $PM_{2,5}$ – 15,7–31,3 %, для образца костреца безостого – по СО 6–32,3 %, а по $PM_{2,5}$ – 20,1–26,3 %, для образца смеси тимофеевки луговой и клевера лугового – по СО – 16,7–33,3 %, а по $PM_{2,5}$ – 6–25,9 %. Для всех образцов наибольшее расхождение расчетных концентраций (более 25 %) имело место на расстоянии менее 20 м от очага горения, по мере удаления от очага горения расхождение расчетных значений уменьшалось.

Результаты численного исследования с использованием модели ГГО показали, что при минимальной скорости ветра (менее 2 м/с) и температурной инверсии концентрации оксида углерода и мелкодисперсных взвешенных частиц ниже максимально разовых ПДК достигались, соответственно, для образца клевера лугового на удалении более 37 и 93 м от очага горения, для образца овсяницы луговой – более 58 и 146 м от очага горения, для образца костреца безостого – более 70 и 165 м от очага горения, для образца смеси тимофеевки луговой и клевера лугового – более 72 и 210 м от очага горения.

Заключение

В результате проведенного экспериментально-расчетного исследования на примере изучения процесса горения четырех образцов травянистой растительности (клевера лугового, овсяницы луговой, костреца безостого, смеси тимофеевки луговой и клевера лугового) и распространения в атмосфере продуктов горения была обоснована применимость известных моделей, а именно модели Гаусса и к-модели, для моделирования процесса переноса дымовых газов от точечных очагов горения.

Сопоставление результатов экспериментальных и численных исследований по модели Гаусса для схожих метеоусловий показало, что на удалении более 3 м от очага горения расчетные значения концентраций оксида углерода в контрольных точках отклонялись от измеренных для образца клевера лугового не более чем на 11,1 %, овсяницы луговой – не более чем на 20,1 %, костреца безостого – не более чем на 10,8 % и смеси тимофеевки луговой и клевера – не более чем на 24,7 %.

В ходе сравнительного анализа результатов численных исследований по модели Гаусса и модели ГГО (к-модели) для неблагоприятных для рассеивания примесей метеоусловиях было установлено, что для более легкого загрязнителя (оксида углерода) расхождение расчетных концентраций не превышало для образца клевера лугового 16,7 %, овсяницы луговой – 25,9 %, костреца безостого – 32,3 %, смеси тимофеевки луговой и клевера лугового – 33,3 %, для более тяжелого загрязнителя $PM_{2,5}$ расхождение составило для образца клевера лугового не более 26,3 %, овсяницы луговой – не более 31,3 %, костреца безостого – не более 26,3 %, для образца смеси тимофеевки луговой и клевера лугового – не более 25,9 %.

Полученные результаты свидетельствуют об адекватности примененных расчетных моделей и позволяют их использовать для прогнозирования распространения поллютантов от очагов горения травянистой растительности.

Список источников

- Лобода Е.Л. Природные (лесные, степные, торфяные) пожары: прогноз, обнаружение, тушение // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 51–63. DOI: 10.17223/29491665/5/7.

2. A study on crashes related to visibility obstruction due to fog and smoke / M. Abdel-Atya [et al.] // Accident Analysis and Prevention. 2011. Vol. 43. P. 1730–1737.

3. Ложкина О.В. Обзор зарубежных подходов для моделирования распространения дыма природных пожаров и прогнозирования его воздействия на безопасность дорожного движения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2020. № 1 (53). С. 100–105.
4. Влияние весенних палов на свойства гумусового горизонта чернозема (юго-восток Западной Сибири) / И.Н. Семенков [и др.] // Почвоведение. 2024. № 3. С. 482–492. DOI: 10.31857/S0032180X24030082.
5. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure / C.E. Reid [et al.] // Environ Health Perspect. 2016. Vol. 124. P. 1334–1343. DOI: 10.1289/ehp.1409277.
6. Ложкин В.Н. Методика контроля уровня воздействия угарного газа на пожарного в условиях тушения горящих торфяников // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 9 (261). С. 11–13.
7. Влияние лесных пожаров на онкологические заболевания у населения Дальнего Востока / С.К. Пинаев [и др.] // Вестник РГМУ. 2023. № 4. С. 22–33. DOI: 10.24075/brsmu.2023.028.
8. Экспериментальное обоснование рисков развития нарушений здоровья при воздействии дыма природных пожаров / Л.М. Соседова [и др.] // Мед. труда и пром. экол. 2023. № 63 (12). Р. 781–788. DOI: 10.31089/1026-9428-2023-63-12-781-788.
9. Ложкина О.В., Орловцев С.В., Савинов А.Г. Анализ влияния изменения климата на природные пожары на примере Российской Федерации и ряда зарубежных стран // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 4 (64). С. 111–121.
10. Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment // United nations environment program. Nairobi, 2022. 126 p.
11. Чрезвычайные ситуации – торфяные и лесные пожары / Л.К. Исаева [и др.] // Маркшейдерия и недропользование. 2016. № 4 (84). С. 59–65.
12. Пожарная и экологическая опасность торфяников / Л.К. Исаева [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 29–35.
13. Chemical and dispersal characteristics of particulate emissions from forest fires in Siberia / Yu.N. Samsonov [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 2012. Т. 21. № 7. С. 818–827.
14. Самсонов Ю.Н., Беленко О.А., Иванов В.А. Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в boreальных лесах Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2010. Т. 23. № 6. С. 423–431.
15. Ложкина О.В., Тимофеев В.Д., Ложкин В.Н. Методика прогнозирования чрезвычайного воздействия продуктов горения торфяного пожара на безопасность дорожного движения // Проблемы управления рисками в техносфере. 2018. № 3 (47). С. 79–85.
16. Differential neural network approach in information process for prediction of roadside air pollution by peat fire / V. Lozhkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 158. № 1. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/158/1/012063.
17. Ложкин В.Н., Смирнов А.С., Шарапов С.В. Мониторинг дорожной безопасности в чрезвычайных условиях распространения смога торфяного пожара // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 3 (67). С. 8–16.
18. Ложкина О.В., Орловцев С.В., Нефедьев С.А. Анализ чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте, вызванных воздействием тумана и дыма природных пожаров // Проблемы управления рисками в техносфере. 2023. № 2 (66). С. 72–84.
19. Тимофеев В.Д. Методика прогнозирования чрезвычайных ситуаций на автомагистрали, инициируемых продуктами горения торфяного пожара: дис. ... канд. техн. наук. С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2020. 165 с.
20. Peterson D.L., McCaffrey S.M., Patel-Weynand T. Wildland fire smoke in the United States: A scientific assessment. Springer Nature, School of Environmental and Forest Sciences University of Washington, 2022. С. 341. DOI: 10.1007/978-3-030-87045-4.

21. Particulate matter and black carbon optical properties and emission factors from prescribed fires in the southeastern United States / A.L. Holder [et al.] // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. Vol. 121. P. 3465–3483. DOI: 10.1002/2015JD024321.
22. Ложкина О.В., Орловцев С.В. Изучение влияния дыма от горящей травянистой растительности на снижение дальности видимости и дорожно-транспортную аварийность // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 1 (73). С. 118–135.
23. Pollution Dispersion from a Fire Using a Gaussian Plume Model / N. Lotrecchiano [et al.] // International Journal of Safety and Security Engineering. 2020. Vol. 10. № 4. P. 431–439. DOI: 10.18280/ijssse.100401.
24. Methodology for determining emission thresholds based on EPA significance levels. Appendix to Air Quality Control, Reporting, and Compliance Proposed Rule (30 CFR Part 550: Subparts A, B, C & J). RIN: 1010-AD82 // Bureau of Ocean Energy Management. 2016. 22 p.
25. 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 др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова. 2016. № 580. С. 33–53.
26. Совместное использование детерминистической и стохастической моделей для прогнозирования загрязнения воздушного бассейна городов / Е.Л. Генихович [и др.] // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Войкова. 2024. № 612. С. 37–81.
27. EPA Emission Factors for Wildfires and Prescribed Burning. Miscellaneous Sources. URL: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/c13s01.pdf> (дата обращения: 14.03.2025).
28. Measuring smoke emissions from prescribed rangeland burning in the Flint Hills region using unmanned aircraft systems / Z. Liu [et al.] // Journal of the ASABE. 2023. Vol. 66 (5). P. 1293–1301. DOI: 10.13031/ja.15430.
29. Пристова Т.А. Содержание углерода в растениях среднетаежных лиственных фитоценозов Республики Коми // Принципы экологии. 2022. № 3. С. 43–49.
30. Коробейникова Е.Г., Кожевин Д.Ф., Кожевникова Н.Ю. Теоретические основы процессов горения и тушения: учеб. пособие. СПб.: С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России, 2022. 436 с.

References

1. Loboda E.L. Prirodnye (lesnye, stepnye, torfyanye) pozhary: prognoz, obnaruzhenie, tushenie // Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti. 2024. № 5. S. 51–63. DOI: 10.17223/29491665/5/7.
2. A study on crashes related to visibility obstruction due to fog and smoke / M. Abdel-Atya [et al.] // Accident Analysis and Prevention. 2011. Vol. 43. P. 1730–1737.
3. Lozhkina O.V. Obzor zarubezhnyh podhodov dlya modelirovaniya rasprostraneniya dyma prirodnyh pozharov i prognozirovaniya ego vozdejstviya na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2020. № 1 (53). S. 100–105.
4. Vliyanie vesennih palov na svojstva gumusovogo gorizonta chernozema (yugo-vostok Zapadnoj Sibiri) / I.N. Semenkov [i dr.] // Pochvovedenie. 2024. № 3. S. 482–492. DOI: 10.31857/S0032180X24030082.
5. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure / C.E. Reid [et al.] // Environ Health Perspect. 2016. Vol. 124. P. 1334–1343. DOI: 10.1289/ehp.1409277.
6. Lozhkin V.N. Metodika kontrolya urovnya vozdejstviya ugarnogo gaza na pozharnogo v usloviyah tusheniya goryashchih torfyankov // Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. 2022. № 9 (261). S. 11–13.
7. Vliyanie lesnyh pozharov na onkologicheskie zabolevaniya u naseleniya Dal'nego Vostoka / S.K. Pinaev [i dr.] // Vestnik RGMU. 2023. № 4. S. 22–33. DOI: 10.24075/brsmu.2023.028.

8. Eksperimental'noe obosnovanie riskov razvitiya narushenij zedorov'ya pri vozdejstvii dyma prirodnyh pozharov / L.M. Sosedova [i dr.] // Med. truda i prom. ekol. 2023. № 63 (12). P. 781–788. DOI: 10.31089/1026-9428-2023-63-12-781-788.
9. Lozhkina O.V., Orlovcev S.V., Savinov A.G. Analiz vliyaniya izmeneniya klimata na prirodnye pozhary na primere Rossijskoj Federacii i ryada zarubezhnyh stran // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 4 (64). S. 111–121.
10. Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment // United nations environment program. Nairobi, 2022. 126 p.
11. Chrezvychajnye situacii – torfyanye i lesnye pozhary / L.K. Isaeva [i dr.] // Markshejderiya i nedropol'zovanie. 2016. № 4 (84). S. 59–65.
12. Pozharnaya i ekologicheskaya opasnost' torfyanikov / L.K. Isaeva [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvratshchenie, likvidaciya. 2010. № 3. S. 29–35.
13. Chemical and dispersal characteristics of particulate emissions from forest fires in Siberia / Yu.N. Samsonov [et al.] // International Journal of Wildland Fire. 2012. T. 21. № 7. S. 818–827.
14. Samsonov Yu.N., Belenko O.A., Ivanov V.A. Dispersnye i morfologicheskie harakteristiki dymovojo aerosol'noj emissii ot pozharov v boreal'nyh lesah Sibiri // Optika atmosfery i okeana. 2010. T. 23. № 6. S. 423–431.
15. Lozhkina O.V., Timofeev V.D., Lozhkin V.N. Metodika prognozirovaniya chrezvychajnogo vozdejstviya produktov goreniya torfyanogo pozbara na bezopasnost' dorozhnoj dvizheniya // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2018. № 3 (47). S. 79–85.
16. Differential neural network approach in information process for prediction of roadside air pollution by peat fire / V. Lozhkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 158. № 1. 012063. DOI: 10.1088/1757-899X/158/1/012063.
17. Lozhkin V.N., Smirnov A.S., Sharapov S.V. Monitoring dorozhnoj bezopasnosti v chrezvychajnyh usloviyah rasprostraneniya smoga torfyanogo pozbara // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 3 (67). S. 8–16.
18. Lozhkina O.V., Orlovcev S.V., Nefed'ev S.A. Analiz chrezvychajnyh situacij na avtomobil'nom transporte, vyzvannyh vozdejstviem tumana i dyma prirodnyh pozharov // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2023. № 2 (66). S. 72–84.
19. Timofeev V.D. Metodika prognozirovaniya chrezvychajnyh situacij na avtomagistrali, iniciiruemyh produktami goreniya torfyanogo pozbara: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2020. 165 s.
20. Peterson D.L., McCaffrey S.M., Patel-Weynand T. Wildland fire smoke in the United States: A scientific assessment. Springer Nature, School of Environmental and Forest Sciences University of Washington, 2022. S. 341. DOI: 10.1007/978-3-030-87045-4.
21. Particulate matter and black carbon optical properties and emission factors from prescribed fires in the southeastern United States / A.L. Holder [et al.] // J. Geophys. Res. Atmos. 2016. Vol. 121. P. 3465–3483. DOI: 10.1002/2015JD024321.
22. Lozhkina O.V., Orlovcev S.V. Izuchenie vliyaniya dyma ot goryashchej travyanistoj rastitel'nosti na snizhenie dal'nosti vidimosti i dorozhno-transportnuyu avarijnost' // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 1 (73). S. 118–135.
23. Pollution Dispersion from a Fire Using a Gaussian Plume Model / N. Lotrecchiano [et al.] // International Journal of Safety and Security Engineering. 2020. Vol. 10. № 4. P. 431–439. DOI: 10.18280/ijssse.100401.
24. Methodology for determining emission thresholds based on EPA significance levels. Appendix to Air Quality Control, Reporting, and Compliance Proposed Rule (30 CFR Part 550: Subparts A, B, C & J). RIN: 1010-AD82 // Bureau of Ocean Energy Management. 2016. 22 p.
25. Model' rasprostraneniya atmosfernyh primej tipa «istochnik-receptor» dlya ocenki po klimaticheskim dannym antropogennoj nagruzki na okruzhayushchuyu sredu v mezo- i regional'nom masshtabe / E.L. Genikhovich [i dr.] // Trudy Glavnoj geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voejkova. 2016. № 580. S. 33–53.

26. Covmestnoe ispol'zovanie deterministiceskoy i stohasticheskoy modeley dlya prognozirovaniya zagryazneniya vozдушного бассейна городов / E.L. Genikhovich [и др.] // Trudy Glavnogo геофизического observatorii im. A.I. Voejkova. 2024. № 612. S. 37–81.
27. EPA Emission Factors for Wildfires and Prescribed Burning. Miscellaneous Sources. URL: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch13/final/c13s01.pdf> (data obrashcheniya: 14.03.2025).
28. Measuring smoke emissions from prescribed rangeland burning in the Flint Hills region using unmanned aircraft systems / Z. Liu [et al.] // Journal of the ASABE. 2023. Vol. 66 (5). P. 1293–1301. DOI: 10.13031/ja.15430.
29. Pristova T.A. Soderzhanie ugleroda v rasteniyah srednetaezhnyh listvennyh fitocenozov Respubliki Komi // Principy ekologii. 2022. № 3. S. 43–49.
30. Korobejnikova E.G., Kozhevnik D.F., Kozhevnikova N.Yu. Teoreticheskie osnovy processov goreniya i tusheniya: ucheb. posobie. SPb.: S.-Peterb. un-t GPS MCHS Rossii, 2022. 436 s.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 02.04.2025; одобрена после рецензирования: 12.05.2025; принята к публикации: 14.05.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 02.04.2025; approved after review: 12.05.2025; accepted for publication: 14.05.2025

Информация об авторах:

Ложкина Ольга Владимировна, профессор кафедры физико-химических основ процессов горения и тушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, кандидат химических наук, профессор, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN-код: 6275-4249

Орловцев Сергей Викторович, аспирант Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: osv-01@yandex.ru, SPIN-код: 8113-3210

Information about the authors:

Lozhkina Olga V., professor of the department of chemistry and combustion processes of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, candidate of chemical sciences, professor, e-mail: olojkina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8604-2698>, SPIN: 6275-4249

Orlovtssev Sergey V., adjunct of the faculty of training of highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), SPIN: 8113-3210