

Научная статья

УДК 614.841.2; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-118-135

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЫМА ОТ ГОРЯЩЕЙ ТРАВЯНИСТОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА СНИЖЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ И ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНУЮ АВАРИЙНОСТЬ

Ложкина Ольга Владимировна;

✉ Орловцев Сергей Викторович.

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

✉ osv-01@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена анализу воздействия дыма от горящей растительности (пала травы) на снижение дальности видимости и дорожно-транспортную аварийность. На основе анализа публикаций в отечественных средствах массовой информации и статистических данных о дорожно-транспортных происшествиях Госавтоинспекции Российской Федерации установлено, что из всех аварий, случившихся в условиях недостаточной видимости из-за природных пожаров, более половины произошли из-за пала травы; для таких аварий характерна массовость и высокий травматизм. Обосновывается применение усовершенствованной формулы Траберта для расчета дальности видимости в условиях замутнения атмосферы дымом, приводятся результаты экспериментально-расчетных исследований снижения дальности видимости в зависимости от размера и концентрации аэрозолей в дыме на разном удалении от модельных очагов горения травянистой растительности. Подтверждено, что на процесс горения и дымообразующую способность оказывают влияние вид растительного горючего материала, поверхностная плотность и погодные условия.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, травяные пожары, дым, аэрозоли, снижение видимости, дорожно-транспортные происшествия

Для цитирования: 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. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-118-135.

Scientific article

INVESTIGATION OF IMPACT OF SMOKE FROM BURNING GRASS ON VISIBILITY OBSTRUCTION AND ROAD ACCIDENTS

Lozhkina Olga V.;

✉ Orlovtssev Sergey V.

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

✉ osv-01@yandex.ru

Abstract. The paper describes the impact of smoke from burning vegetation (grass burning) on visibility and road accidents. Based on the analysis of publications in domestic media and traffic accident statistics of the State Traffic Safety Inspectorate of the Russian Federation, it was found that of all accidents that occurred in conditions of poor visibility due to wildfires, more than half occurred due to grass burning; in such accidents there are many participants and high injury rates. We also confirmed the validity of the improved Trabert's formula for estimating visibility in the air, clouded with smoke, and described the results of experimental and computational studies on visibility depending on the size and concentration of aerosols in smoke at different distances from model grass fires. It is confirmed that the combustion process and smoke-capacity are affected by the type of plant combustibles, surface density, and weather conditions.

Keywords: emergencies, grass fires, smoke, aerosols, reduced visibility, road accidents

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2025

For citation: Lozhkina O.V., Orlovtssev S.V. Investigation of impact of smoke from burning grass on visibility obstruction and road accidents // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 1 (73). P. 118–135. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-1-118-135.

Введение

Пал травы – многовековая широко распространенная практика в сельском хозяйстве многих стран мира с целью минерализации сухих растительных остатков. Процесс горения сухой травы и сельскохозяйственных культур сопровождается образованием большого количества дыма и приводит к возрастанию концентраций токсичных веществ в воздухе, оказывая негативное воздействие на здоровье людей [1–3]. Пал травы вблизи автодорог повышает риск дорожно-транспортных происшествий (ДТП) из-за снижения видимости в условиях задымленности [4–6]. Одним из самых опасных его последствий является инициирование масштабных торфяных и лесных пожаров, трудно поддающихся тушению и наносящих огромный ущерб.

В Российской Федерации на законодательном уровне пал травы регулируется ст. 8.32 Кодекса Российской Федерации об административных правонарушениях: «Выжигание хвороста, лесной подстилки, сухой травы и других лесных горючих материалов с нарушением требований правил пожарной безопасности на земельных участках, непосредственно примыкающих к лесам, защитным и лесным насаждениям и не отделенных противопожарной минерализованной полосой шириной не менее 0,5 м, влечет наложение административного штрафа на граждан в размере от 30 тыс. до 40 тыс. руб.; на должностных лиц – от 40 тыс. до 60 тыс. руб.; на юридических лиц – от 300 тыс. до 500 тыс. руб.». Кроме того, с 2015 г. действует запрет (постановление Правительства Российской Федерации от 10 нояб. 2015 г. № 1213, постановление Правительства Российской Федерации от 16 сент. 2020 г. № 1479 (в ред. от 30 марта 2023 г.) «Об утверждении Правил противопожарного режима в Российской Федерации») на выжигание сухой травянистой растительности в полосах отвода автомобильных дорог, полосах отвода и охранных зонах железных дорог, путепроводов и продуктопроводов. В феврале 2023 г. Федеральное агентство лесного хозяйства (Рослесхоз) ввел мораторий на весенний профилактический отжиг растительности и порекомендовал перенести мероприятия на осень после окончания пожароопасного сезона¹.

Несмотря на предпринимаемые меры, ограничения, штрафы, бесконтрольное выжигание травы по-прежнему практикуется населением. Так, согласно данным МЧС России, в весенний период 2022 г. было выявлено и пресечено 17,5 тыс. неконтролируемых палов, а также почти 350 выжиганий сухой растительности².

Изучение ландшафтных (травяных и степных) пожаров представляет самостоятельную научную задачу, о чем свидетельствуют научные публикации в течение двух последних десятилетий [7–13]. Много таких исследований проводится в США, что связано с крайне высокой распространенностью санкционированных профилактических отжигов растительности. Большинство работ посвящено изучению эмиссии и пространственно-временного распространения опасных для здоровья продуктов горения (включая высокотоксичные мелкодисперсные взвешенные частицы $PM_{2.5}$) и разработке методов их инвентаризации [7–9].

В Российской Федерации исследованием ландшафтных пожаров на протяжении многих лет занимались ученые из Томского государственного университета и Института оптики атмосферы Российской академии наук. Их труды посвящены изучению характеристик и закономерностей возникновения и распространения степных пожаров экспериментально-полевыми и лабораторными методами с целью определения температур

¹ Новости // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/rosleskhoz_vvodit_moratoriy_na_vesenniy_profotzhig_sukhoy_travy_/ (дата обращения: 15.02.2025)

² МЧС: с начала года выявлено и пресечено 17,5 тыс. неконтролируемых палов сухой травы. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/press-centr/novosti/4736198> (дата обращения: 15.02.2025).

во фронте горения, скорости распространения фронта пожара в зависимости от скорости ветра [10], получения значений скорости горения растительного покрова и коэффициентов излучения пламени [11], исследования воздействия пожара на слой торфа [12], а также разработке моделей и методов прогнозирования развития пожаров такого типа [13].

В то же время влияние состава растительности, имеющего выраженную региональную вариабельность, на развитие процесса горения, качественно-количественный состав продуктов горения и дымообразование, процесс распространения дыма от ландшафтных пожаров, влияние его на снижение видимости и дорожную аварийность в России изучены недостаточно. В связи с вышесказанным целью данного исследования является анализ статистических данных о ДТП, вызванных экстремальным снижением видимости из-за дыма природных пожаров, а также натурные полевые исследования процесса горения и распространения дыма от модельных очагов горения образцов сухой травы.

Объекты и методы исследования

Эмпирическую основу исследования дорожно-транспортной аварийности в условиях дыма природных пожаров составили результаты авторского анализа материалов электронных средств массовой информации (СМИ) (табл. 3) и карточек ДТП, находящихся в открытом доступе на официальном сайте Госавтоинспекции Российской Федерации (<http://stat.gibdd.ru/>).

Натурные полевые исследования проводились в Ленинградской обл. в летне-осенний сезон 2024 г.

В июне 2024 г. в Пушкинском р-не Санкт-Петербурга были отобраны часто встречающиеся на территории нашей страны образцы травянистой растительности:

- клевер луговой;
- овсяница луговая;
- кострец безостый;
- смесь трав тимopheевки луговой и клевера лугового в соотношении 10:1 (рис. 1).

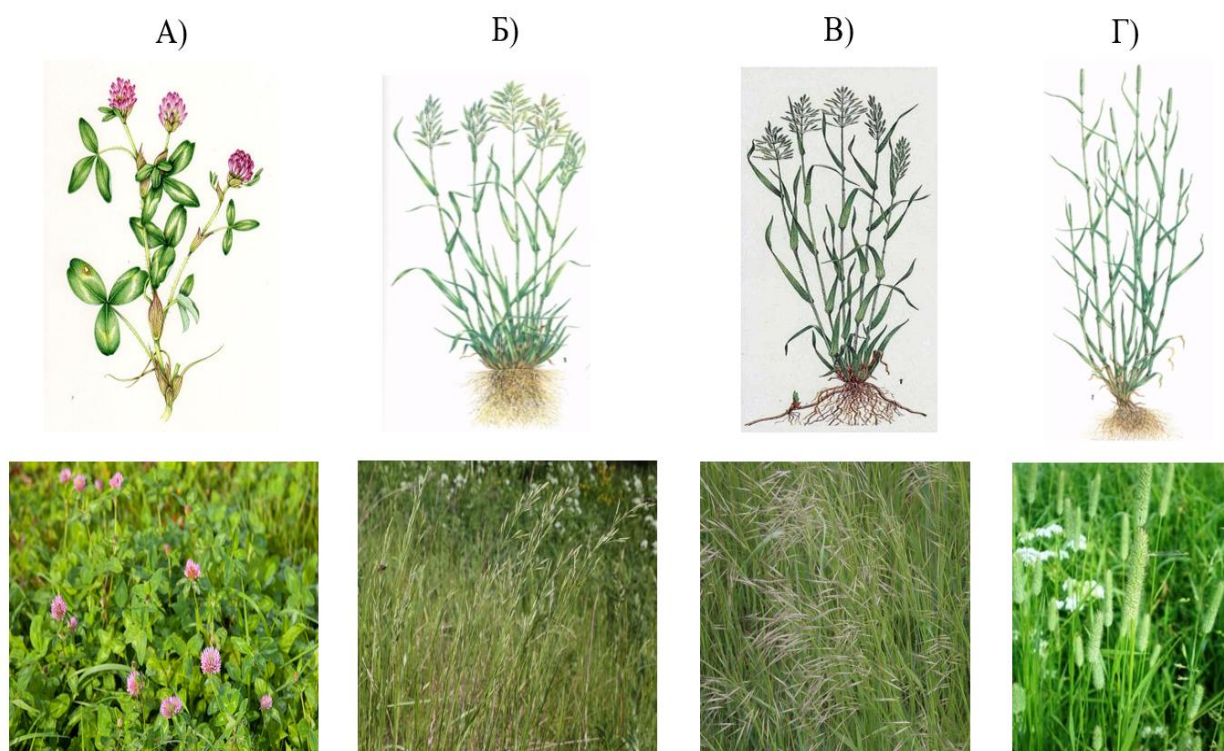


Рис. 1. Виды травянистой растительности в собранных образцах:
а) клевер луговой; б) овсяница луговая; в) кострец безостый; г) тимopheевка луговая

Все образцы были скошены в солнечную сухую погоду на одинаковой площади, равной 4 м², высушены в одних и тех же естественных условиях. Все образцы взвешивались сразу после покоса (с естественным влагосодержанием) и после полного высыхания на лабораторных весах ПЕТВЕС ЕТ-В3000-G (ООО ПетВес, Санкт-Петербург). Результаты взвешивания приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные массы, массы после полного высыхания
и исходное влагосодержание образцов травянистой растительности**

Образец	Виды растений	Площадь сбора (покоса), м ²	Масса травы после сбора, кг	Масса травы после полного высыхания, кг	W*, %
1	Клевер луговой	4	4,737	1,211	291
2	Овсяница луговая	4	1,724	0,742	132
3	Кострец безостый	4	6,313	1,728	265
4	Смесь трав тимopheевки луговой и клевера (10:1)	4	9,162	2,521	263

Примечание: *W – влагосодержание исходного образца относительно сухого вещества, %

Огневые полевые испытания проводились в октябре 2024 г. в п. Шушары Пушкинского р-на Санкт-Петербурга в специально оборудованном месте с соблюдением правил охраны труда и пожарной безопасности. Погодные условия: ясно, без осадков, температура воздуха +7 °С, скорость ветра 2–4 м/с, направление ветра – северо-западное, влажность воздуха 93 %.

Сжигание образцов проводили в огнеупорном поддоне прямоугольной формы размером 1,25 x 0,95 м; образцы травы равномерно распределялись по площади поддона.

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 мелкодисперсных аэрозолей с использованием лазерного нефелометра DUSTTRAK 8530 (TSI Incorporated, USA). Время при проведении экспериментов контролировалось секундомером Agat 010 с точностью 0,2 с.

Результаты и обсуждение

Анализ ДТП в условиях дыма природных пожаров

С точки зрения воздействия на безопасность дорожного движения дым, как и туман, критически влияет на дальность видимости, кроме этого, токсичные продукты горения (угарный газ (CO), летучие органические соединения (ЛОС), мелкодисперсные взвешенные частицы PM_{2.5}) могут оказывать воздействие на самочувствие водителей и их способность управлять транспортным средством [6]. В официальной статистике Госавтоинспекции такой показатель, как условия видимости, не документируется, поэтому для формирования информационной базы ДТП, произошедших из-за дыма природных пожаров, авторы сначала осуществляли поиск сведений о таких ДТП по публикациям в электронных СМИ, а затем верифицировали их по статистическим базам Госавтоинспекции. Собранные сведения обобщены в табл. 2, а на рис. 2 в качестве наглядного примера представлены фотографии, иллюстрирующие этапы возникновения ДТП в условиях дыма от пала травы, которое произошло на дороге регионального значения Эрхирик – Нижние Тальцы – Сосновый Бор в Заиграевском р-не Республики Бурятия 3 апреля 2022 г. днем в ясную сухую погоду (п. 9 табл. 2).



Рис. 2. Этапы возникновения ДТП в условиях дыма от пала травы на дороге регионального значения в Республике Бурятия 3 апреля 2022 г.:

А), Б) – автомобиль въезжает на задымленный участок дороги, вблизи которой развивается травяной пожар; В) – приближается к участку с наибольшей плотностью дыма;

Г) – продолжает движение в условиях практически нулевой видимости;

**Д) – приближается к впереди стоящему автомобилю; Е) – не успевает затормозить и совершает наезд сзади; время от начала съемки до столкновения – 8 с
(https://vk.com/video-88298195_456242946?list=b7df307d6b520bf580)**

Таблица 2

ДТП, произошедшие в России в 2017–2023 гг. по причине снижения видимости на дороге из-за дыма лесных и травяных пожаров

	Дата / Время	Тип пожара	Место	Тип Дороги* / Условия	Вид ДТП	Число ТС	Число участков	Число раненых	Число погиб- ших	СМИ**
1	21.05.23 / 05:57	Лесной	Дорога Екатеринбург – Нижний Тагил – Серов, 278 км, 620 м	Р или М / Светло, туман и дым	Наезд на стоящее ТС	5	10	1	6	А
2	21.05.23 / 06:16				Наезд на стоящее ТС	2	3	2	0	
3	21.05.23 / 06:40		Дорога Екатеринбург – Нижний Тагил – Серов, 560 м		Столкновение	3	3	1	0	
4	12.08.21 / 00:20	Лесной	Дорога Намцы – Ергелех, 49 км, 410 м	М / Темно, туман и дым, освещение отсутствует, покрытие сухое	Опрокидывание	2	3	1	0	Б
5	02.08.21 / 01:11	Лесной	Дорога А-331 Виллой Тулун – Братск – Усть-Кут – Мирный – Якутск, 98,5 км	Ф / Темно, туман и дым, освещение включено, покрытие сухое	Съезд с дороги	1	5	1	4	В
6	16.06.23 / 04:40	Лесной	Дорога Р-402 Тюмень – Ялуторовск – Ишим – Омск, 407 км, 500 м	Ф / Светло, туман и дым, покрытие сухое	Столкновение	3	4	2	2	Г
7	16.06.23 / 05:05		Дорога Р-402 Тюмень – Ялуторовск – Ишим – Омск, 408 км, 132 м		Столкновение	4	5	2	0	
8	16.08.22 / 06:07	Торф	Дорога Р-402 Тюмень – Ялуторовск – Ишим – Омск, 430 км, 892 м	Ф / Светло, туман и дым, покрытие сухое	Столкновение	4	4	2	0	Д
9	03.04.22 / 16:00	Пал травы	Дорога Эрхирик – Нижние Тальцы – Сосновый Бор, вблизи Генеральского моста, Заиграевский р-н Республики Бурятия	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Столкновение, наезд на стоящее ТС	3	4	3	0	Е
10	15.05.19 / 12:50	Пал травы	Дорога А-157 Минеральные Воды (аэропорт) – Кисловодск, 33 км, 60 м	Ф / Светло, дым, покрытие мокрое	Столкновение	8	10	5	2	Ж
11	10.07.21 / 12:05	Пал травы	Дорога Славянск-на-Кубани – Крымск, 17 км, 400 м	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Столкновение	8	9	6	0	З
12	10.07.21 / 12:15				Столкновение	3	3	1	0	

	Дата / Время	Тип пожара	Место	Тип Дороги* / Условия	Вид ДТП	Число ТС	Число участков	Число раненых	Число погиб- ших	СМИ**
13	24.04.18 / 11:45	Лесной	Дорога Биробиджан – Головино, 21 км, 105 м	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Столкновение	2	3	1	0	И
14	18.05.23 / 09:50	Пал травы	Дорога Набережные Челны – Заинск – Альметьевск, 73 км, 650 м	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Наезд на стоящее ТС	2	3	1	0	К
15	18.05.23 / 09:55		Дорога Набережные Челны – Заинск – Альметьевск, 73 км, 700 м	Р или М / Светло, дым	Столкновение	2	3	1	0	
16	28.04.22 / 13:30	Пал травы	Дорога Кемерово – Новокузнецк, 117 км, 800 м	Р или М / Светло, дым	Наезд на стоящее ТС	4	4	1	1	Л
17	23.04.20 / 16:10	Пал травы	Дорога Новосибирск – Ленинск – Кузнецкий – Кемерово – Юрга, 220 км	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Столкновение (одновременно 2 ДТП)	11 (9 авт., 2 прицепа)	9	4	0	М
18	23.04.20 / 16:12		Дорога Новосибирск – Ленинск – Кузнецкий – Кемерово – Юрга, 220 км							
19	12.04.19 / 11:18	Пал травы	Дорога Ленинск – Кузнецкий – Прокопьевск – Новокузнецк, 106 км	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Столкновение	3	12	9	0	Н
20	12.04.19 / 16:50		Дорога Ленинск – Кузнецкий – Прокопьевск – Новокузнецк, 106 км		Столкновение	3	4	2	0	
21	20.04.18 / 08:10	Пал травы	Дорога Ленинск – Кузнецкий – Прокопьевск – Новокузнецк, 2 км	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Опрокидывание	1	2	1	0	О
22	27.04.17 / 17:00	Пал травы	Дорога Ленинск – Кузнецкий – Новокузнецк – Междуреченск, 46 км	Р или М / Светло, дым, покрытие сухое	Столкновение	11	11	0	0	П

Примечание: *Типы дорог: Р или М – дорога регионального или межмуниципального значения; М – дорога местного значения; Ф – дорога федерального значения

**Ссылки на информацию в СМИ:

1–3 (А): Истомин Л. ГИБДД просит водителей не выезжать на Серовский тракт // Комсомольская правда. 2023. 21 мая. URL: <https://www.ural.kp.ru/daily/27505.5/4765984> (дата обращения: 14.01.2025).

4 (Б): В Якутии опрокинулся автомобиль из-за дыма (12.08.2021 г.). URL: <https://yakutia.mk.ru/incident/2021/08/13/v-yakutii-oprokinulsya-avtomobil-izza-dyma.html> (дата обращения: 14.01.2025).

5 (В): Родители и их сын погибли на заткнутой дымом от пожаров трассе в Якутии (02.08.2021 г.). URL: <https://www.vesti.ru/article/2595453> (дата обращения: 14.01.2025).

6, 7 (Г): На задымленной трассе Р-402 в Омской области произошло ДТП с двумя погибшими (16.06.2023 г.). URL: <https://news.ati.su/news/2023/06/16/nazadymlennoj-trasse-r-402-v-omskoj-oblasti-proizoshlo-dtp-s-dvumja-pogibshimi-961094/> (дата обращения: 14.01.2025).

8 (Д): На трассе «Тюмень – Омск» из-за задымления произошло массовое ДТП (16.08.2022 г.). URL: https://tmn.aif.ru/incidents/crash/na_trasse_tyumen_omsk_v_rezult_ate_dtp_s_tremya_avto_postradala_zhenshchina (дата обращения: 14.01.2025).

- 9 (Е): В Бурятии произошло тройное ДТП из-за дыма от пожара (03.04.2022 г.). URL: <https://www.baikal-daily.ru/news/20/433725> (дата обращения: 14.01.2025).
- 10 (Ж): Восемь машин столкнулось на Ставрополье из-за дыма от пожаров на полях (15.05.2019 г.). URL: <https://www.panram.ru/news/yufo/vosem-mashin-stolknulos-na-stavropole-iz-za-dyma-ot-pozharov-na-polyakh/> (дата обращения: 14.01.2025).
- 11, 12 (З): Фоменко С. На Кубани из-за задымления дороги в ДТП попали 13 автомобилей (10.07.2021 г.). URL: <https://www.kuban.kp.ru/online/news/4359790/> (дата обращения: 14.01.2025).
- 13 (И): Дым от пожаров стал причиной двух ДТП на трассе в Биробиджанском районе (24.04.2018 г.). URL: <https://eaomedia.ru/news/688184/?ysclid=lvnere1eaa388786282> (дата обращения: 14.01.2025).
- 14, 15 (К): Исаева Л. В Татарстане из-за дыма от пожара на полях произошло массовое ДТП с пострадавшими (18.05.2023 г.). URL: https://prufy.ru/news/kazan/137085-v_tatarstane_iz_za_dyma_ot_pozhara_na_polyakh_proizoshlo_massovoe_dtp_s_postradavshimi/?ysclid=lvncwxsi4y522579497 (дата обращения: 14.01.2025).
- 16 (Л): Сардакова Е.В. В Новокузнецке ограничили движение по Ильинскому шоссе из-за возгорания травы (01.05.2022 г.). URL: WWW.KEM.KP.RU:https://www.kem.kp.ru/online/news/4730550/ (дата обращения: 14.01.2025).
- 17, 18 (М): В Кузбассе из-за дыма от пала травы столкнулись восемь автомобилей (24.04.2020 г.). URL: <https://42.мвд.рф/сми-о-полиции-кузбасса/item/20044088/> (дата обращения: 14.01.2025).
- 19, 20 (Н): Второе за сутки ДТП из-за дыма от горящей травы произошло в Кузбассе (12.04.2019 г.). URL: <https://www.interfax-russia.ru/siberia/news/vtoroe-za-sutki-dtp-iz-za-dyma-ot-goryashchey-travy-proizoshlo-v-kuzbasse?ysclid=lh57y5ekr149990889> (дата обращения: 14.01.2025).
- 21 (О): Огненный ужас под Новокузнецком: из-за пала травы на трассе образовалась дымовая завеса (23.04.2018 г.). URL: <https://nk-tv.com/206041.html?ysclid=lh59344ggn632282854> (дата обращения: 14.01.2025).
- 22 (П): Сразу 11 автомобилей столкнулись в Кемеровской области из-за дыма (28 апреля 2017 г.). URL: <https://ren.tv/news/x/188043-srazu-11-avtomobilei-stolknulis-v-kemerovskoi-oblasti-iz-za-dyma?ysclid=lgy5iqp8dl192480731> (дата обращения: 14.01.2025).

Анализ данных показывает, что на участках дороги с высокой задымленностью имеются случаи сразу нескольких ДТП. 21 мая 2023 г. в Свердловской обл. на региональной дороге Екатеринбург – Нижний Тагил – Серов произошли три автоаварии с участием 10 автомобилей, которые двигались в одном направлении (п. 1–3 табл. 2). Причиной пожара стала плохая видимость на дороге из-за лесных пожаров. Со слов очевидцев происшествий, она на дороге была практически нулевой. Аварии произошли в 5:50, 6:16 и 6:40 утра, в результате было ранено 4 чел. и погибло 6 чел.

16 июня 2023 г. в Омской обл. также ранним утром (в 4:40 и 5:05) на федеральной трассе Р-402 Тюмень – Омск произошло два ДТП, в результате которых были ранены 4 чел. и погибли 2 чел. (п. 6–7 табл. 2). Причина автоаварий – недостаточная видимость на дороге в результате распространения густого дыма от лесных пожаров.

Страшная массовая авария из восьми автомобилей произошла днем в 12:50 в Ставропольском крае 15 мая 2019 г. на автодороге А-157 Минеральные Воды (аэропорт) – Кисловодск (п. 10 табл. 2) в результате плохой видимости из-за пала травы: были ранены 5 чел. и погибли 2 чел.

10 июля 2021 г. в Краснодарском крае в непосредственной близости от региональной дороги Славянск-на-Кубани – Крымск загорелась сухая трава в поле, в результате чего дым охватил значительный участок трассы. Сразу 11 водителей в районе 12:00 не справились с управлением автомобилем и попали в ДТП (п. 11–12 табл. 2). В этих авариях обошлось без погибших, однако пострадало 7 чел.

Горение сухой травы в полях стало причиной сразу двух ДТП в Республике Татарстан 18 мая 2023 г. на участке местной дороги Набережные Челны – Заинск – Альметьевск с двумя пострадавшими (п. 14–15 табл. 2). Утром в 9:50 и 9:55 из-за недостаточной видимости на автодороге столкнулись 4 автомобиля.

23 апреля 2020 г. в Кемеровской обл. в результате двух ДТП, участниками которых стали 9 автомашин и 2 прицепа, пострадали 4 чел., включая беременную женщину (п. 17–18 табл. 2). Из-за дыма от горящей травы значительно снизилась видимость на региональной автодороге Новосибирск – Ленинск – Кузнецкий – Кемерово – Юрга, что и стало причиной дорожных аварий. Необходимо отметить, что на трассах этого региона практически ежегодно в апреле случались ДТП из-за дыма от пала травы. На одной только региональной дороге Ленинск – Кузнецкий – Новокузнецк – Междуреченск на разных участках произошли автоаварии в апреле 2017, 2018, 2019, 2022 гг. (позиции 16, 19–22 табл. 2).

Анализ приведенных в таблице ДТП свидетельствует о том, что 13 из 22 аварий произошли ввиду снижения видимости из-за дыма травяных пожаров, 8 – лесных пожаров, 1 – торфяного пожара. Анализ событий, изображенных на рис. 2 показывает, что горение растительности вдоль автодороги даже на небольшом участке приводит к интенсивному образованию дыма и снижению дальности видимости на некоторых отрезках проезжей части практически до 1–5 м. Типичными авариями в условиях недостаточной видимости являются наезд на впереди стоящее средство и столкновение.

Для разработки эффективных мер, направленных на снижение аварийности в условиях воздействия дыма травяных пожаров, требуется на начальном этапе провести экспериментальные исследования процессов горения и распространения дыма от модельных очагов горения образцов травянистой растительности и определению дальности видимости в зависимости от концентрации аэрозолей в дыму. Решению этой частной задачи посвящен следующий раздел статьи.

Экспериментальное исследование распространения дыма от модельных очагов горения травянистой растительности и оценка видимости в зависимости от концентрации аэрозоля

Рассмотрим случаи развития травяных пожаров вблизи автомобильных дорог. Анализ имеющихся фото- и видеоматериалов (на рис. 3) показывает, что плотность дыма и дальность видимости могут претерпевать значительные изменения во времени и пространстве из-за высоких флуктуаций динамики развития пожара на открытой местности и изменчивости метеорологических условий (направления и скорости ветра). Дальность видимости может варьироваться от нескольких метров до нескольких сотен метров в течение непродолжительного времени. Основными компонентами дыма являются пары воды, диоксид углерода (CO_2), а также продукты неполного сгорания: оксид углерода (CO), мелкодисперсные взвешенные частицы, летучие органические соединения и др. Аэрозольный компонент, влияющий на видимость, состоит из водного аэрозоля и мелкодисперсных взвешенных частиц.

Для определения диапазона изменения дальности видимости в зависимости от концентрации мелкодисперсных аэрозолей, образующихся при горении четырех образцов травянистой растительности, были проведены экспериментально-расчетные исследования. Эксперименты снимали на штатную видеокамеру мобильного телефона, по результатам видеосъемки определяли визуальные характеристики процессов горения и продолжительность пламенного горения и тления. Процесс полевого эксперимента отражен на рис. 3.

1 Образец - Клевер



4 Образец - Смесь трав тимopheевки луговой и клевера (10:1)



**Рис. 3. Замер содержания аэрозолей в дыму во время горения образцов 1 и 4:
А, Г – инициация горения; Б, Д – пламенное горение; В, Е – тление**

Анализ научной литературы, посвященной исследованию применимости оптических нефелометров для определения содержания аэрозолей, показал, что приборы такого типа «не различают» водные аэрозоли и мелкодисперсные взвешенные частицы, а определяют их общее содержание, что соответствовало задачам настоящего исследования [18, 19]. Измерения содержания аэрозолей проводили в зоне максимальной плотности дыма от горящей растительности на высоте 1,0–1,4 м от поверхности земли (глаза водителя легкового автомобиля находятся на таком уровне) в десяти контрольных точках измерения (КТИ) на удалении от очага горения от 1 до 10 м.

Характеристики процесса горения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики процесса горения образцов травянистой растительности

Образец РГМ*	Масса РГМ, кг	Поверхностная плотность РГМ, кг/м ²	Длительность горения, с		
			длительность пламенного горения	длительность тления	полная длительность горения
1	1,211	1,02	121	362	506
2	0,742	0,625	48	96	144
3	1,728	1,455	93	164	257
4	2,521	2,122	106	223	329

Примечание: *РГМ – растительный горючий материал

Процесс горения образцов 2, 3 и 4 развивался похожим образом: пламенное горение было интенсивным, длилось примерно в два раза меньше тления и составило в случае образца 2 (меньшего по массе) 48 с, в случае образца 3 – 93 с, в случае образца 4 – 106 с. Фаза тления сопровождалась интенсивным выделением дыма. Образцы 2, 3 и 4 сгорели полностью. Процесс горения образца 1 (клевера) отличался от остальных: были сложности с инициированием возгорания, возникающие очаги горения быстро переходили в фазу тления и затухали, пламенное горение было неинтенсивным, фаза тления длилась примерно в 3,2 раза дольше фазы пламенного горения, при этом более трети образца не сгорело. Результаты эксперимента подтверждают, что растительность различных видов обладает разной горимостью и это необходимо учитывать при создании растительных противопожарных заслонов. Дымообразование зависело от типа растительного горючего материала, его массы, поверхностной плотности. Визуально наиболее интенсивное дымообразование было характерно для образцов 3 и 4, и это ожидаемо подтвердилось результатами измерения содержания аэрозолей в дыме: максимальные концентрации аэрозолей в дыме от горящих образцов костреца безостого (образец 3) и смеси тимopheевки луговой и клевера (образец 4) были зафиксированы на высоте 1,0–1,25 м на удалении 3–5 м от очага и составили соответственно 0,245–0,277 г/м³ (табл. 6) и 0,231–0,297 г/м³ (табл. 7). Визуально видимость в зоне максимальной плотности дыма была менее 2 м.

Для расчета дальности видимости в зависимости от концентрации аэрозоля авторами были проанализированы работы Н.И. аум Кампе [14], Л.Т. Матвеева [15], G.L. Achtemeier [16], Kunkel [16], Р.И. Оникула и Е.А. Яковлевой [17].

Trabert [14] предложил формулу, связывающую дальность видимости с содержанием аэрозолей (водных аэрозолей) и их радиусами:

$$S = kr/\delta,$$

где S – дальность видимости, (м); k – безразмерный эмпирический коэффициент, учитывающий полидисперсность аэрозолей и их способность рассеивать свет; r – радиус аэрозолей, мкм; δ – содержание аэрозолей г/м³.

Koshmieder [14] определил, что:

$$S = -\ln\eta/\alpha, \quad (1)$$

где η – порог контрастности (обычно равен 0,02); α – линейный показатель ослабления света (коэффициент экстинкции).

Aufum Kampe [14] на основе результатов экспериментальных исследований облаков, туманов, дымки подтвердил зависимость Koshmieder: дальность видимости связана с линейным показателем ослабления света (α) соотношением:

$$S = 3.9/\alpha, \quad (2)$$

где
$$\alpha = N2\pi r^2, \quad (3)$$

где N – число частиц аэрозоля в 1 м^3 воздушной среды:

$$N = 3\delta/4\pi r^3. \quad (4)$$

Подставив выражения (2) и (3) в уравнение (1), получаем:

$$S = 2.6r/\delta. \quad (5)$$

Из формулы (4) следует, что дальность видимости снижается с ростом концентрации аэрозолей и уменьшения их радиусов. Оникулом Р.И. и Е.А. Яковлевой было показано, что наиболее соответствующие реальным ситуациям результаты расчета получаются при незначительном разбросе размеров аэрозолей и их аэродинамическом диаметре менее 20 мкм [17]. Также очевидно, что формула (4) не годится для применения в условиях предельно малых концентраций аэрозолей в воздухе, поскольку при $\delta \rightarrow 0$, $S \rightarrow \infty$. Ее следует применять только в ситуациях, когда расчетные значения S существенно меньше метеорологической дальности видимости в условиях визуальной прозрачной атмосферы.

Kunkel [16] с соавторами на основании обработки большого количества экспериментальных данных установил эмпирическую связь между коэффициентом экстинкции и содержанием аэрозолей в тумане:

$$\alpha = 144.7\delta^{0.88}, \quad (6)$$

где α – коэффициент экстинкции, км^{-1} .

Тогда, подставив (6) в (2), получаем:

$$S = 0.027/\delta^{0.88}, \quad (7)$$

где S – дальность видимости в км.

Таким образом, имеются две эмпирические зависимости (формулы (5) и (7)), позволяющие рассчитать дальность видимости в условиях аэрозольного замутнения атмосферы: формула (7) выражает зависимость дальности видимости от концентрации аэрозоля в воздушной среде, а формула (5) – от концентрации и радиусов аэрозолей.

Размер аэрозолей зависит от «возраста» дыма. В начальный момент времени образуются аэрозоли с радиусом 0,1–0,2 мкм и даже менее [20]. С течением времени, по мере «старения» дыма в ходе обменных атмосферных процессов, аэрозоли растут и могут достигать размеров 5–10 мкм и более [16].

Результаты экспериментально полученных значений концентраций аэрозолей в дыму для всех четырех образцов в зависимости от удаления от источника горения и рассчитанные значения дальности видимости по формуле (7) и формуле (5) для аэрозольных частиц с радиусом 0,1; 0,2; 1,25; 5,0 и 7,0 мкм приведены в табл. 4–7.

Таблица 4

Содержание аэрозолей в дыму, образовавшемся при сгорании образца 1 (клевера), на разном удалении от источника горения и дальность видимости в зависимости от концентрации аэрозолей и их радиуса

КТИ*, м	δ , г/м ³	S, м; r=0,1 мкм	S, м; r=0,2 мкм	S, м; r=1,25 мкм	S, м; r=5 мкм	S, м; r=7 мкм	S, м
		Ф (5)**	Ф (5)	Ф (5)	Ф (5)	Ф (5)	Ф (7)***
1	0,024	10,8	21,7	135	541,7	758,3	719,1
2	0,058	4,5	9	56,2	224,1	313,8	330,8
3	0,087	3	6	37,5	149,4	209,2	231,5
4	0,107	2,4	4,9	30	121,5	170	193
5	0,089	2,9	5,8	36,2	146	204,5	227
6	0,098	2,6	5,3	32,5	132,7	185,7	208,5
7	0,076	3,4	6,8	42,5	171	239,5	260,8
8	0,054	4,8	9,6	60	240,7	337	352,3
9	0,032	8,1	16,3	101,2	406,3	568,8	558,3
10	0,019	13,7	27,3	171,2	684,2	957,9	883,2

Примечание: *КТИ – контрольная точка измерений; **Ф (5) – результаты расчета дальности видимости по формуле (5); ***Ф (7) – результаты расчета дальности видимости по формуле (7)

Таблица 5

Содержание аэрозолей в дыму, образовавшемся при сгорании образца 2 (овсяницы луговой), на разном удалении от источника горения и дальность видимости в зависимости от концентрации аэрозолей и их радиуса

КТИ*, м	δ , г/м ³	S, м; r=0,1 мкм	S, м; r=0,2 мкм	S, м; r=1,25 мкм	S, м; r=5 мкм	S, м; r=7 мкм	S, м
		Ф (5)**	Ф (5)	Ф (5)	Ф (5)	Ф (5)	Ф (7)***
1	0,038	6,8	13,7	85	342,1	478,9	480
2	0,092	2,8	5,7	35	141,3	197,8	220,4
3	0,107	2,4	4,9	30	121,5	170	193
4	0,105	2,5	5	31,2	123,8	173,3	196,2
5	0,089	2,9	5,8	36,2	146,1	207,8	227
6	0,057	4,6	9,1	57,5	228,1	319,3	335,9
7	0,038	6,8	13,7	85	342,1	478,9	480
8	0,017	15,3	30,6	191,2	764,7	1070,6	974
9	0,013	20	40	250	1 000	1 400	1 233,4
10	0,010	26	52	325	1 300	1 820	1 551,7

Примечание: *КТИ – контрольная точка измерений; **Ф (5) – результаты расчета дальности видимости по формуле (5); ***Ф (7) – результаты расчета дальности видимости по формуле (7)

Таблица 6

Содержание аэрозолей в дыму, образовавшемся при сгорании образца 3 (костреца безостого), на разном удалении от источника горения и дальность видимости в зависимости от концентрации аэрозолей и их радиуса

КТИ*, м	δ , г/м ³	S, м; r=0,1 мкм	S, м; r=0,2 мкм	S, м; r=1,25 мкм	S, м; r=5 мкм	S, м; r=7 мкм	S, м
		Φ (5)**	Φ (5)	Φ (5)	Φ (5)	Φ (5)	Φ (7)***
1	0,044	5,9	11,8	73,7	295	413	422
2	0,090	2,9	5,8	36,2	145	203	225
3	0,254	1,0	2	12,5	50	70	90
4	0,277	0,9	1,8	11,2	45	63	83
5	0,245	1,1	2,2	13,7	55	77	93
6	0,199	1,3	2,6	16,2	65	91	111
7	0,087	2,9	5,8	36,2	145	203	231
8	0,069	3,8	7,6	47,5	190	266	284
9	0,036	7,2	14,4	90	360	504	500
10	0,024	10,85	21,7	135,6	542	759,5	710

Примечание: *КТИ – контрольная точка измерений; **Φ (5) – результаты расчета дальности видимости по формуле (5); ***Φ (7) – результаты расчета дальности видимости по формуле (7)

Таблица 7

Содержание аэрозолей в дыму, образовавшемся при сгорании образца 4 (смеси трав Тимофеевки луговой и клевера), на разном удалении от источника горения и дальность видимости в зависимости от концентрации аэрозолей и их радиуса

КТИ*, м	δ , г/м ³	S, м; r=0,1 мкм	S, м; r=0,2 мкм	S, м; r=1,25 мкм	S, м; r=5 мкм	S, м; r=7 мкм	S, м
		Φ (5)**	Φ (5)**	Φ (5)	Φ (5)	Φ (5)	Φ (7)***
1	0,078	3,3	6,7	41,2	166,7	233,3	254,9
2	0,102	2,5	5,1	31,2	127,5	178,4	201,3
3	0,231	1,1	2,3	13,7	56,3	78,8	98
4	0,297	0,9	1,8	11,2	43,8	61,3	78,6
5	0,264	1	2	12,5	49,2	68,9	87,2
6	0,140	1,85	3,7	23,1	92,5	129,5	152,3
7	0,134	1,94	3,9	24,2	97	135,8	158,3
8	0,115	2,3	4,5	28,7	113	158,2	181,1
9	0,078	3,3	6,7	41,2	166,7	233,3	254,9
10	0,054	4,8	9,6	60	240,7	337	352,3

Примечание: *КТИ – контрольная точка измерений; **Φ (5) – результаты расчета дальности видимости по формуле (5); ***Φ (7) – результаты расчета дальности видимости по формуле (7)

Результаты расчета показывают, что при радиусе аэрозолей менее 0,2 мкм и их содержании в дыму от 0,02 до 0,30 г/м³ дальность видимости снижается до 0,9–21,7 м (табл. 4–7). Наибольшее снижение видимости (менее 5 м), достигается при концентрации аэрозолей более 0,1 г/м³ и радиусе менее 0,2 мкм. Как уже отмечалось выше, максимальное содержание аэрозолей в дыму более 0,23 г/м³ было установлено для образцов 3 и 4 (табл. 6 и 7 соответственно) на удалении 3–5 м от очага горения. Визуально в этой же экспериментальной зоне наблюдался наиболее плотный дым и минимальная видимость, менее 2 м. Визуальные оценки подтверждены результатами расчета.

Расчетные данные указывают на то, что с помощью формул (5) и (7) сопоставимые значения дальности видимости получаются при содержании аэрозолей от 0,02 до 0,3 г/м³ и радиусе аэрозолей 5–7 мкм (при радиусе частиц 7 мкм разность значений дальности видимости варьировалась в диапазоне от 0,2 до 24,1 %, а при 5 мкм – от 16,2 до 45,6 %).

На основании проведенных экспериментально-расчетных исследований можно сделать вывод о том, что для определения дальности видимости в условиях задымленности от развивающегося травяного пожара целесообразно использовать формулу (5).

Заключение

Весенний бесконтрольный пал травы, несмотря на действующие в Российской Федерации запреты, ограничения, штрафы, по-прежнему практикуется населением: по данным МЧС России, в весенний период 2022 г. было выявлено и пресечено 17,5 тыс. неконтролируемых палов, а также почти 350 выжиганий сухой растительности. Развитие ландшафтных пожаров вблизи автомобильных дорог может приводить к критическому снижению видимости и повышению риска ДТП.

В ходе проведенного исследования дорожно-транспортной аварийности в условиях недостаточной видимости из-за дыма природных пожаров в период с 2017 по 2024 г. (на основании анализа публикаций в СМИ и карточек ДТП Госавтоинспекции Российской Федерации) было установлено, что 13 из 22 аварий случились вследствие снижения видимости из-за дыма травяных пожаров, 8 – лесных пожаров, 1 – торфяного пожара. Травяные и степные пожары, даже на небольших по площади участках, сопровождаются интенсивным дымообразованием, что в условиях их возникновения на придорожных территориях может приводить к снижению дальности видимости на отдельных участках дороги до критических значений 1–5 м. Типичными авариями являются наезд на впереди стоящее средство и столкновение; для таких ДТП характерна массовость (участие более двух автотранспортных средств) и высокий уровень травматизма с тяжелыми последствиями.

Методическое обеспечение расчетного прогнозирования этих специфических чрезвычайных ситуаций сдерживается недостаточной изученностью процессов горения растительного горючего материала, эмиссии и распространения в атмосфере дыма и опасных продуктов горения, отсутствием методик для прогнозирования негативного воздействия аэрозольных компонентов дыма на снижение видимости.

Для решения этой задачи на первом этапе были проведены натурные экспериментальные исследования процесса горения и распространения дыма от модельных очагов горения четырех образцов травы: 1) клевера лугового; 2) овсяницы луговой; 3) костреца безостого; 4) смеси трав тимopheевки луговой и клевера лугового в соотношении 10:1. Все образцы были собраны с одинаковой площади (4 м²) и высушены в одинаковых условиях.

Было подтверждено, что процессы горения и дымообразования зависят от типа растительности, поверхностной плотности горючего материала, погодных условий. Визуально и в результате замеров было установлено, что среди исследованных образцов наибольшее содержание аэрозолей наблюдалось в дыме от горящих образцов костреца безостого и смеси тимopheевки луговой и клевера на высоте 1,0–1,25 м на удалении 3–5 м от очага, и оно составило соответственно 0,245–0,277 г/м³ и 0,231–0,297 г/м³. Визуально в области максимальной плотности дыма видимость была менее 2 м.

Результаты экспериментально-расчетных исследований подтвердили, что для определения дальности видимости в зависимости от концентрации аэрозоля обосновано использование формулы Trabert, уточненной Н.И. Аумом Кампе. Результаты расчета свидетельствуют о том, что максимальное снижение видимости (до 2 м и менее) имеет место при радиусе аэрозолей < 0,2 мкм и их концентрации более 0,23 г/м³.

При концентрации аэрозолей с радиусом < 0,2 мкм (диаметром < 0,4 мкм) более 0,01 г/м³, концентрации аэрозолей с радиусом < 1,25 мкм (диаметром < 2,5 мкм) более 0,065 г/м³

и аэрозолей с радиусом < 5 мкм (диаметром < 10 мкм) более $0,26 \text{ г/м}^3$ видимость будет менее 50 м. В таких условиях для исключения риска ДТП целесообразно прекратить движение по опасному участку.

Полученные результаты имеют важное значение для предупреждения ДТП.

Список источников

1. Eke M., Cingiroglu F., Kaynak B. Investigation of 2021 wildfire impacts on air quality in southwestern Turkey // *Atmospheric Environment*. 2024. Vol. 325. P. 120445. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120445.
2. Respiratory Diseases Associated with Wildfire Exposure in Outdoor Workers / A. Weheba [et al.] // *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*. 2024. Vol. 12. Iss. 8. P. 1989–1996. DOI: 10.1016/j.jaip.2024.03.033.
3. Estimated Impacts of Prescribed Fires on Air Quality and Premature Deaths in Georgia and Surrounding Areas in the US, 2015–2020 / J.M. Kamal [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58 (28). P. 12343–12355. DOI: 10.1021/acs.est.4c00890.
4. A study on crashes related to visibility obstruction due to fog and smoke / Abdel-Atya M. [et al.] // *Accident Analysis and Prevention*. 2011. № 43. P. 1730–1737.
5. 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.
6. 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.
7. Review of agricultural biomass burning and its impact on air quality in the continental United States of America / S.D. Pinakana [et al.] // *Environmental Advances*. 2024. Vol. 16. 100546. DOI: 10.1016/j.envadv.2024.100546.
8. Apportioning prescribed fire impacts on $\text{PM}_{2.5}$ among individual fires through dispersion modeling / R. Huang [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 223. P. 117260. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117260.
9. Seasonal emission factors from rangeland prescribed burns in the Kansas Flint Hills grasslands / J. Aurell [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 304. P. 119769. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119769.
10. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в натуральных условиях / А.М. Гришин [и др.] // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2011. № 2 (14). С. 91–102.
11. Физическое моделирование степных пожаров в натуральных условиях / А.М. Гришин [и др.] // *Пожарная безопасность*. 2010. № 2. С. 100–105.
12. Натурные экспериментальные исследования воздействия полевого пожара на деревянные ограждения и слой торфа / А.М. Гришин [и др.] // *Пожарная безопасность*. 2013. № 3. С. 52–58.
13. Бурасов Д.М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров и их экологических последствий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2006. 162 с.
14. Aufum Kampe H.J., Weickmann H.K. Trabert's formula and determination of water content in clouds // *Journal of Meteorology*. 1952. Vol. 9. P. 167–171.
15. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 777 с.
16. Achtemeier G.I. Effects of Moisture Released during Forest Burning on Fog Formation and Implications for Visibility // *Journal of applied meteorology and climatology*. 2008. Vol. 47. P. 1287–1296. DOI: 10.1175/2007JAMC1721.1
17. Оникул Р.И., Яковлева Е.А. О расчете дальности видимости при существенном антропогенном аэрозольном загрязнении воздуха у земной поверхности // *Вопросы охраны атмосферы от загрязнения: информационный бюллетень*. 2010. № 1–2 (41–42). С. 143–164.

18. Calibration of DustTrak and Low-Cost Sensors and Their Application for Assessment of Inhalation Exposures to Traffic-Related PM_{2.5} and PM₁ in Ho Chi Minh City / N.D.T. Chi [et al.] // *Atmosphere*. 2023. Vol. 14. P. 1504. DOI: 10.3390/atmos14101504.

19. Kim H., Kim J., Roh S. Effects of Gas and Steam Humidity on Particulate Matter Measurements Obtained Using Light-Scattering Sensors // *Sensors*. 2023. Vol. 23. P. 6199. DOI: 10.3390/s23136199.

20. Size distribution of particles emitted from grass fires in the Northern Territory, Australia / A.Yu.P. Wardoyo [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2007. Vol. 41. Iss. 38. P. 8609–8619. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.07.020.

References

1. Eke M., Cingiroglu F., Kaynak B. Investigation of 2021 wildfire impacts on air quality in southwestern Turkey // *Atmospheric Environment*. 2024. Vol. 325. P. 120445. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2024.120445.

2. Respiratory Diseases Associated with Wildfire Exposure in Outdoor Workers / A. Weheba [et al.] // *The Journal of Allergy and Clinical Immunology: In Practice*. 2024. Vol. 12. Iss. 8. P. 1989–1996. DOI: 10.1016/j.jaip.2024.03.033.

3. Estimated Impacts of Prescribed Fires on Air Quality and Premature Deaths in Georgia and Surrounding Areas in the US, 2015–2020 / J.M. Kamal [et al.] // *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58 (28). P. 12343–12355. DOI: 10.1021/acs.est.4c00890.

4. A study on crashes related to visibility obstruction due to fog and smoke / M. Abdel-Atya [et al.] // *Accident Analysis and Prevention*. 2011. № 43. P. 1730–1737.

5. Lozhkina O.V. Obzor zarubezhnyh podhodov dlya modelirovaniya rasprostraneniya dyma prirodnyh pozharov i prognozirovaniya ego vozdeystviya na bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2020. № 1 (53). S. 100–105.

6. Lozhkina O.V., Orlovcev S.V., Nefed'ev S.A. Analiz chrezvychajnyh situacij na avtomobil'nom transporte, vyzvannyh vozdeystviem tumana i dyma prirodnyh pozharov // *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere*. 2023. № 2 (66). S. 72–84.

7. Review of agricultural biomass burning and its impact on air quality in the continental United States of America / S.D. Pinakana [et al.] // *Environmental Advances*. 2024. Vol. 16. 100546. DOI: 10.1016/j.envadv.2024.100546.

8. Apportioning prescribed fire impacts on PM_{2.5} among individual fires through dispersion modeling / R. Huang [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2020. Vol. 223. P. 117260. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117260.

9. Seasonal emission factors from rangeland prescribed burns in the Kansas Flint Hills grasslands / J. Aurell [et al.] // *Atmospheric Environment*. 2023. Vol. 304. P. 119769. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2023.119769.

10. Eksperimental'nye issledovaniya vozniknoveniya i rasprostraneniya stepnogo pozhara v naturnyh usloviyah / A.M. Grishin [i dr.] // *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*. 2011. № 2 (14). S. 91–102.

11. Fizicheskoe modelirovanie stepnyh pozharov v naturnyh usloviyah / A.M. Grishin [i dr.] // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2010. № 2. S. 100–105.

12. Naturnye eksperimental'nye issledovaniya vozdeystviya polevogo pozhara na derevyannye ograzhdeniya i sloj torfa / A.M. Grishin [i dr.] // *Pozharnaya bezopasnost'*. 2013. № 3. S. 52–58.

13. Burasov D.M. Matematicheskoe modelirovanie nizovyh lesnyh i stepnyh pozharov i ih ekologicheskikh posledstvij: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk. Tomsk: TGU, 2006. 162 s.

14. Aufum Kampe H.J., Weickmann H.K. Trabert's formula and determination of water content in clouds // *Journal of Meteorology*. 1952. Vol. 9. P. 167–171.

15. Matveev L.T. *Fizika atmosfery*. SPb.: Gidrometeoizdat, 2000. 777 s.

16. Achtemeier G.I. Effects of Moisture Released during Forest Burning on Fog Formation and Implications for Visibility // *Journal of applied meteorology and climatology*. 2008. Vol. 47. P. 1287–1296. DOI: 10.1175/2007JAMC1721.1.

17. Onikul R.I., Yakovleva E.A. O raschete dal'nosti vidimosti pri sushchestvennom antropogennom aerol'nom zagryaznenii vozduha u zemnoj poverhnosti // Voprosy ohrany atmosfery ot zagryazneniya: informacionnyj byulleten'. 2010. № 1–2 (41–42). S. 143–164.

18. Calibration of DustTrak and Low-Cost Sensors and Their Application for Assessment of Inhalation Exposures to Traffic-Related PM_{2.5} and PM₁ in Ho Chi Minh City / N.D.T. Chi [et al.] // Atmosphere. 2023. Vol. 14. P. 1504. DOI: 10.3390/atmos14101504.

19. Kim H., Kim J., Roh S. Effects of Gas and Steam Humidity on Particulate Matter Measurements Obtained Using Light-Scattering Sensors // Sensors. 2023. Vol. 23. P. 6199. DOI: 10.3390/s23136199.

20. Size distribution of particles emitted from grass fires in the Northern Territory, Australia / A.Yu.P. Wardoyo [et al.] // Atmospheric Environment. 2007. Vol. 41. Iss. 38. P. 8609–8619. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.07.020.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 18.02.2025; одобрена после рецензирования: 02.03.2025; принята к публикации: 17.03.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 18.02.2025; approved after review: 02.03.2025; accepted for publication: 17.03.2025

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, адъюнкт факультета подготовки кадров высшей квалификации Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), e-mail: osv-01@yandex.ru

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 highly qualified personnel of Saint-Petersburg university of the State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), e-mail: osv-01@yandex.ru