

УДК 614.8

## Оценка негативного воздействия длительной задымленности от лесных пожаров на работу критически важных и потенциально опасных объектов

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Технологии гражданской безопасности, 2022

А.А. Долгов, Д.С. Ковалева

### Аннотация

Предложен простой метод, позволяющий проводить расчет пространственно-временных характеристик процесса распространения лесных пожаров и параметров загазованности населенных территорий, в том числе территорий размещения критически важных и потенциально опасных объектов. Показана возможность прогнозной оценки значений токсодоз продуктов горения, что дает возможность проведения превентивных мероприятий по снижению опасности лесных пожаров для населения и территорий.

**Ключевые слова:** лесные пожары; задымленность; критически важный объект; мелкодисперстные частицы; предельно допустимые концентрации.

## Assessment of the Forest Fires Prolonged Smoke Negative Impact on the Operation of Critical and Potentially Dangerous Facilities

ISSN 1996-8493

DOI:10.54234/CST.19968493.2022.19.3.73

© Civil Security Technology, 2022

A. Dolgov, D. Kovaleva

### Abstract

Simple method is proposed that allows calculating the spatio-temporal characteristics of spreading forest fires process and the parameters of gas contamination of populated areas, including the territories where critically important and potentially dangerous objects are located. The possibility of predictive assessment of the combustion products toxodoses values is shown, which makes it possible to carry out preventive measures to reduce the danger of forest fires for the population and territories.

**Key words:** forest fires; smoke; critical object; fine particles; maximum permissible concentrations.

26.05.2022

Лесные пожары ежегодно наносят значительный ущерб экономике страны. За последние 10–15 лет ежегодный прямой ущерб, причиненный пожарами лесному хозяйству России, составил от 1,3 до 85,5 млрд рублей [1].

В 2021 г. лесные пожары охватили территории Сибири и Дальнего Востока, к августу площадь, пройденная огнем, составила 17 млн га лесных угодий. Это максимум за все годы спутниковых наблюдений за Землей. Впервые дым от лесных пожаров достиг Северного полюса (данные со спутников NASA) [2].

В результате лесных пожаров в атмосферу выделяются газообразные и мелкодисперсные (взвешенные) частицы. Наиболее токсичными являются: оксид и диоксид углерода, углеводороды, аммиак, частицы дыма. Годовое выделение аммиака при лесных пожарах составляет от 0,5 до 12 млрд т, окиси углерода — 80 млн т, твердых аэрозолей — 35–60 млн т [3].

В период высокой пожарной опасности, когда возникает множество очагов лесных пожаров, значительная их часть достигает размеров крупных и даже катастрофических. Именно эти пожары имеют наибольшие отрицательные последствия в экологическом и экономическом аспектах: ухудшаются параметры окружающей среды; из-за задымленности нарушается работа промышленных предприятий, в том числе критически важных и потенциально опасных объектов (КВО и ПОО).

В промышленной отрасли Российской Федерации функционирует свыше 4 тыс. ПОО, в число которых входит более 700 КВО. В таблице представлены распределение КВО и ПОО по федеральным округам Российской Федерации, а также общая площадь лесных массивов и лесистость федеральных округов [4].

В Северо-Западном федеральном округе, половина площади которого занята лесами, сконцентрировано более 16% КВО и ПОО, находящихся на территории РФ. В Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах площадь лесных насаждений занимает больше половины площади округов, большинство КВО и ПОО находится вблизи лесных массивов.

В августе 2010 года из-за сильного лесного пожара возникла необходимость эвакуации населения ЗАТО Снежинск Челябинской области и сотрудников Российского федерального ядерного центра — ВНИИ технической физики им. академика Забабахина. Подобная

ситуация возникла годом позже в Соединенных Штатах Америки: лесные пожары в штате Нью-Мексико подошли к границам территорий, принадлежащих Лос-Аламосской национальной лаборатории, ведущей разработки ядерного оружия США. В результате сложившейся ситуации в городе Лос-Аламос была объявлена эвакуация населения, а работа лаборатории временно приостановлена. Но самым разрушительным для города был пожар в мае 2000 года, который нанес ущерб, оцениваемый в 1 млрд долларов, и разрушил более 400 домов. Город был эвакуирован на восемь дней.

Интенсивная и длительная задымленность от лесных пожаров создает серьезную угрозу для здоровья населения и персоналу КВО и ПОО.

Профессор Дальневосточного государственного медицинского университета Татьяна Пестрикова, анализируя заболеваемость населения в Хабаровском крае в период массовых лесных пожаров 1998 года и в последующие пожарные годы, утверждает, что «произошло снижение иммунного статуса организма дальневосточников. У беременных женщин на 8% увеличилось количество самопроизвольных выкидышей, в 1,5 раза выросло количество «замерших» беременностей». В Хабаровске медики отмечали увеличение заболеваний токсикологическим альвеолитом, который провоцируется оксидом углерода, диоксидом азота. На 28%, по сравнению с началом 1998 года, в Хабаровске увеличилось число заболеваний верхних дыхательных путей. Выросла в крае онкологическая и сердечно-сосудистая заболеваемость, возросло количество болезней органов кровотока, увеличилась смертность [5].

Подобная картина наблюдалась и в Центральном федеральном округе, в частности — в Москве, во время массовых торфяных пожаров 2010 года.

В 2010 году смертность жителей Москвы увеличилась на 4,5% по сравнению с показателями 2009 года. На рост смертности горожан в сильной мере повлияли аномальная жара лета 2010 года и смог от горящих торфяников [6].

По данным Минздравсоцразвития [7] смертность в июле 2010 года выросла по сравнению с июлем 2009 года: во Владимирской обл. — на 18,4%; в Ивановской обл. — на 18,3%; в Московской и Тульской обл. — на 17,3%; в Республике Татарстан — на 16,6%; в Рязанской обл. — на 13,5%; в Ульяновской обл. — на 13%; в Тамбовской обл. — на 11,1%;

Таблица

Распределение КВО и ПОО по федеральным округам Российской Федерации

Федеральный округ РФ	КВО и ПОО, %	Площадь леса, км <sup>2</sup>	Площадь федерального округа, км <sup>2</sup>	Лесистость федерального округа, %
Центральный	25,57	226 685	650 205	35
Северо-Западный	16,35	882 000	1 686 972	52
Южный	10,02	44 000	447 821	10
Северо-Кавказский	4,12	16 895	170 439	10 %
Приволжский	18,16	411 000	1 036 975	40 %
Уральский	9,61	1 143 370	1 818 497	63 %
Сибирский	9,73	2 736 100	4 361 727	63 %
Дальневосточный	6,44	3 591 300	6 952 555	52 %

в Липецкой обл. — на 9%; в Республике Мордовия — на 6,8%; в Белгородской обл. — на 2,6%; в Кировской обл. — на 1,1%; в Воронежской обл. — на 0,7%.

Массовые лесные пожары и высокая задымленность урбанизированных территорий могут нарушить или прекратить функционирование предприятий, в т.ч. КВО и ПОО, что, в свою очередь, может привести к потере управления экономикой субъекта Российской Федерации или административно-территориальной единицы субъекта Российской Федерации, ее необратимому изменению (разрушению) либо существенному снижению безопасности жизнедеятельности населения [8]. При долговременной задымленности территории, которая может продолжаться до нескольких месяцев, у персонала предприятий могут возникать хронические заболевания: сердечно-сосудистые, онкологические, заболевания легких, обусловленные токсическим, мутагенным и канцерогенным действием продуктов горения [3].

Эффективность системы управления охраной лесов определяется ее способностью оценивать и прогнозировать условия возникновения и развития лесных пожаров, регулировать в соответствии с этими условиями структуру и параметры лесопожарных служб.

Вместе с тем негативные моменты, препятствующие эффективному решению проблемы пожарной безопасности на урбанизированной территории (недостаточное финансирование служб охраны и защиты лесов и городов России от пожаров, а также соответствующей научно-исследовательской работы), в первую очередь приводят к недостаточной точности прогнозов о возникновении и распространении лесных пожаров, получаемых по известным методикам. Для решения задач прогноза пожаров на урбанизированных территориях необходимо использовать новые детерминированно-вероятностные математические модели возникновения природных и техногенных пожаров [9].

Согласно Методическим рекомендациям ВНИИПО [10] по расчету зон загазованности продуктами горения крупных пожаров расчеты загазованности территории рекомендовано проводить по наилучшим метеоусловиям (наиболее благоприятным для развития лесного пожара) и расположению объекта (КВО/ПОО), для которого проводится расчет, если он находится на оси следа распространения продуктов горения.

Концентрация  $i$ -го продукта горения  $C_i$  (кг/м<sup>3</sup>) на уровне земли ( $z = 0$ ) определяется по формуле:

$$C_i(x, y, 0) = \frac{Q_i}{\pi U_{cp} \sigma_y \sigma_z} \left\{ \exp \left[ -\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{H_{ef}^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \text{ кг/м}^3, (1)$$

где:

$\sigma_y$  и  $\sigma_z$  — коэффициенты дисперсии, характеризующие рассеивающую способность атмосферы;

$H_{ef}$  — высота конвективной колонки, м;

$U_{cp}$  — средняя скорость ветра по слою перемешивания, м/с;

$Q_i$  — интенсивность выделения  $i$ -го продукта горения, кг/с.

Средняя скорость ветра в лесу определяется следующим образом:

$$U_{cp} = (H_{ef} / z_1)^m \times U_0 / (1 + m),$$

где  $z_1 = 10$  м — высота замера скорости ветра.

Значения параметра  $m$  для слоя атмосферы от 10 м до 500 м для разных категорий устойчивости атмосферы даны в Методических рекомендациях ВНИИПО [10].

Интенсивность выделения  $i$ -ых продуктов горения при лесных пожарах определяется как [11]:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{k_i \times m_{3j} \times S_{nj} \times k_j}{t_{ij}}, \text{ кг/с.}$$

Здесь:

$k_i$  — коэффициент эмиссии  $i$ -го поллютанта;

$m_{3j}$  — запас ЛГМ на  $j$ -ом участке периметра лесного пожара, (кг/м<sup>2</sup>);

$S_{nj}$  —  $j$ -ый участок площади фронта пожара, м<sup>2</sup>;

$t_{ij}$  — время горения  $j$ -го участка лесной территории, с;

$k_j$  — коэффициент полноты сгорания ЛГМ на  $j$ -ом участке лесной территории,  $k_j = (W_j^* - W_j) / W_j^*$ , где  $W_j$  и  $W_j^*$  — влагосодержание ЛГМ и критическое влагосодержание ЛГМ  $j$ -го участка лесной территории, при достижении которого ЛГМ не горит.

Площадь  $j$ -го участка фронта пожара можно определить по выражению:

$$S_{nj} = L_{nj} \times \Delta_j^{n(b)}, \text{ м}^2,$$

где  $L_{nj}$  — длина контура лесного пожара, а  $\Delta_j^{n(b)}$  — ширина фронта горения для низовых (индекс  $n$ ) и верховых (индекс  $b$ ) лесных пожаров.

В большинстве математических моделей контур лесного пожара в любой момент времени описывается эллипсом, большая полуось которого  $a$  направлена по направлению ветра, а малая —  $b$  направлена перпендикулярно направлению ветра и равны:

$$a = \frac{(\omega_A + \omega_B)t}{2}, \quad b = \omega_C t.$$

Здесь:  $t$  — время развития лесного пожара;  $\omega_A, \omega_B, \omega_C$  — значения скорости распространения лесного пожара по направлению ветра, против и поперек направления ветра, соответственно. Для низового лесного пожара скорость определяется по формуле профессора Э. Конева [12]. Для верхового лесного пожара скорость пожара по направлению ветра  $\omega_{Ai}$  рассчитывается по формуле профессора А. Гришина [13].

Периметр контура лесного пожара (эллипса) на момент времени  $t$  определяется по формуле:

$$L_{nj} = \pi t \left[ 0,75(\omega_A + \omega_B + 2\omega_C) - 0,71\sqrt{(\omega_a + \omega_b)\omega_c} \right], \text{ м.}$$

Ширина фронта горения для низовых лесных пожаров определена профессором Гришиным А. М. из

формулы профессора Альбини для угла наклона факела пламени низового лесного пожара [14]:

$$\Delta_j^h = h_{1j} \left( \frac{4U_h^2}{gh_{1j}} \right)^{0,2},$$

где:

$h_{1j}$  — высота проводников горения в первом ярусе  $j$ -ой лесной территории, м;

$U_h$  — скорость ветра на высоте  $h_{1j}$   $j$ -ой территории леса, м/с;

$g$  — ускорение свободного падения, 9.81 м/с<sup>2</sup>.

Профессор Гришин А. М. предложил использовать эту же формулу и для определения ширины фронта верхового лесного пожара [13]:

$$\Delta_j^b = h_{3j} \left( \frac{4U_b^2}{gh_{3j}} \right)^{0,2},$$

где:

$h_{3j}$  — высота проводников горения в первом ярусе  $j$ -ой лесной территории, м;

$U_b$  — скорость ветра на высоте  $h_{3j}$   $j$ -ой лесной территории, м/с.

Ширина фронта лесного пожара будет различна на разных участках периметра пожара, что связано как с различными значениями запасов ЛГМ, его влагосодержания и видового состава, так и с различной скоростью распространения пожара по направлению ветра и в других направлениях, отличных от направления ветра.

Для оценки задымленности территории в результате лесного пожара по выражению (1) необходимо знать эффективную высоту подъема продуктов горения (высоту конвективной колонки) и интенсивность выброса  $i$ -го продукта горения на  $j$ -ой лесной территории  $Q_{ij}$  (кг/с).

Высота конвективной колонки в формуле (1) определяется по выражению 7.4 Методических рекомендаций ВНИИПО [6]:

$$H_{ef} = 2,53 \times \sqrt[3]{\frac{t_n \times V_m \times S_n}{U_0 \times |1 - \gamma|}} + H_\phi, \text{ м},$$

где:

$t_n$  — температура пламени (°C);

$V_m$  — массовая скорость выгорания ЛГМ, кг/(с×м<sup>2</sup>);

$\gamma$  — градиент температуры воздуха, °C/100 м;

$U_0$  — скорость ветра на стандартной высоте — 10 м;

$H_\phi$  — высота факела пламени, м.

Высота факела  $H_\phi$  при лесном пожаре определяется по формуле Г. Телицына [15]:

$$H_\phi = k \sqrt{m_{3j} \times \omega_{nj}},$$

где:

$\omega_{nj}$  — скорость распространения лесного пожара на  $j$ -ом участке периметра лесного пожара, м/с;

$k$  — коэффициент, равный: 10 — для живой хвои; 9 — для опада хвои; 8 — для сухой травы и опада листьев.

Массовую скорость выгорания лесных горючих материалов при лесном пожаре можно определить по выражению [11]:

$$V_{Mj} = \left( S_{ij} \times \sum_{i=1}^n m_{3ij} \right) / t_{vj},$$

где:

$n$  — количество  $i$ -ых ярусов леса, участвующих в процессе горения;

$t_{vj}$  — время горения запаса ЛГМ  $\sum_{i=1}^n m_{3ij}$  на  $j$ -ой лесной территории, с.

$$t_{vj} = \sqrt{\frac{2S_{nj}}{\pi\omega_{Cj}(\omega_{Aj} + \omega_{Bj})}},$$

где:

$\omega_{Aj}$  — скорость распространения низового пожара на  $j$ -ом участке лесной территории по направлению ветра;

$\omega_{Bj}$  — против направления ветра;

$\omega_{Cj}$  — поперек направления ветра.

Концентрация  $C_i$   $i$ -го продукта горения в рассматриваемой точке  $(x, y, 0)$  на уровне земли ( $z = 0$ ) определяется по формуле (1). Аналогичным образом производится расчет концентрации в других точках рассматриваемой территории. Одинаковые значения концентрации  $i$ -го продукта горения соединяются изолиниями.

В этих же точках производится расчет средней величины токсодозы токсического компонента продуктов горения (оксида углерода, взвешенных дымовых частиц — РМ10) по формуле:

$$D_{icp}(x_n, y_n, 0) = C_{icp}(x_n, y_n, 0) \times t_{инг}$$

где:

$C_{icp}(x_n, y_n, 0)$  — средняя величина концентрации токсического компонента продукта горения в точках  $x_n, y_n$ , взятых на уровне земли;

$t_{инг}$  — минимальное время ингаляционного воздействия токсичных продуктов горения, равное времени горения лесного пожара, т. е.  $t_{инг} = t_{гор}$ , с.

По значениям критических токсодоз ( $LC_{150}$ ,  $PC_{150}$  и  $C_{150}$ ) определяются критические значения времени ингаляции, при которых наступает то или иное воздействие продуктов горения на человека [10]:

$$t_{инг.кр.} = D_i(x_n, y_n) / C_i(x_n, y_n), \text{ с.}$$

В Гигиенических нормативах ГН 2.1.6.2604-10 даны значения величин ПДК газообразных и взвешенных частиц РМ10 в воздухе в результате задымления [16]. Согласно приказу МЧС России от 05.07.2021 № 429 превышение ПДК РМ10 в атмосферном воздухе в 20–29 раз в течение двух суток и более дает основание отнести



событие, сложившееся на задымленной территории к чрезвычайной ситуации.

При установлении на задымленной территории чрезвычайной ситуации должно быть принято решение об особом режиме работы ПОО или КВО, защите персонала от вредного воздействия РМ10 и оксида углерода, о возможности эвакуации и приостановлении работы ПОО или КВО, находящегося в зоне длительного задымления [17].

Представлен простой метод прогнозирования значений пространственно-временных характеристик

развития потенциально возможных лесных пожаров и параметров задымленной атмосферы на заселенных территориях, в том числе на территориях размещения ПОО и КВО. Прогнозные значения времени, в течение которого на анализируемой территории возможно наличие критических значений токсодоз продуктов горения, дают необходимую информацию для принятия превентивных мер по защите населения и территорий в опасный лесопожарный период.

### Литература

1. В. А. Царев. Экономический ущерб, нанесенный природными пожарами в России в 2010 году/ Лесотехнический журнал. 2012. № 3. С. 147–155.
2. Дым от лесных пожаров в России достиг Северного полюса [Электронный ресурс] // Информационный портал "Lenta.ru". URL: [https://lenta.ru/news/2021/08/08/northpole\\_fire/](https://lenta.ru/news/2021/08/08/northpole_fire/) (дата обращения: 10.05.2022).
3. Добрых В. А., Захарычева Т. А. Дым лесных пожаров и здоровье. Хабаровск: ГОУ ВПО Дальневосточный государственный медицинский университет, 2009.
4. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2019 году».
5. Лесные новости. Минздравсоцразвития России опубликовало рекомендации о том, как вести себя в условиях смога и пожаров [Электронный ресурс] // Информационный портал "Forest.ru". URL: <http://old.forest.ru/rus/news/index.php?id=877#:~:text=Доктор%20медицинских%20наук%2C%20заведующая%20кафедрой,раз%20выросло%20количество%20%22замерших%22%20беременностей> (дата обращения: 10.05.2022).
6. Смертность москвичей выросла на 4,5% [Электронный ресурс] // Информационный портал «Комсомольская правда». URL: [www.kp.ru/daily/25620.4/787792](http://www.kp.ru/daily/25620.4/787792) (дата обращения: 10.05.2022).
7. В январе-июле самый высокий рост смертности отмечался в Москве [Электронный ресурс] // Информационный портал "SakhaNews". URL: <https://1snru/v-yanvare-iyule-samyi-vysokii-rost-smertnosti-otmecalsya-v-moskve> (дата обращения: 10.05.2022).

8. Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ (ред. от 11.06.2021) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».
9. Долгов А. А., Сумина Е. Н. Методология оценки лесопожарных рисков — основа поддержки принятия решений в кризисных ситуациях, вызванных лесными пожарами // Технологии гражданской безопасности. 2007. № 3(13). С. 79–83.
10. Методические рекомендации по расчету зон загазованности продуктами горения крупных пожаров М.: ВНИИПО, 2007.
11. Гришин А. М., Долгов А. А., Цимбалюк А. Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. 1997.
12. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977.
13. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
14. Albini J. A. A physical model for fire spread in brush//11<sup>th</sup>Symp. (Int.) Combustion, Berkley, Calif. Pittsburgh, 1967. P. 553–560.
15. Телицын Г. П. Лесные пожары, их предупреждение и тушение в Хабаровском крае. Хабаровск: ДальНИИЛХ, 1988.
16. Гигиенические нормативы ГН 2.1.6.2604-10, дополнение № 8 к ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест».
17. Приказ МЧС России от 05.07.2021 № 429 «Об установлении критериев информации о чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера».

### Сведения об авторах

**Долгов Александр Анатольевич:** к. физ.-мат. н., ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), в. н. с. науч.-исслед. центра. Москва, Россия. SPIN-код: 9808-0600.

**Ковалева Дарья Сергеевна:** ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), н.с. Москва, Россия. SPIN-код: 7750-1053.

### Information about authors

**Dolgov Alexander A.:** PhD (Physics and Mathematics Sc.), All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Leading Researcher, Researcher Center. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 9808-0600.

**Kovaleva Daria S.:** All-Russian Research Institute for Civil Defense and Emergencies, Researcher. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 7750-1053.

## Издания ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

Авторы, название	URL
Козлов И.А. и др. Индикация в различных природных средах агрессивных и радиоактивных химических веществ и методы их утилизации и конверсии.	<a href="https://elibrary.ru/item.asp?id=48176202">https://elibrary.ru/item.asp?id=48176202</a>
Мануйло О.Л. и др. Творчество юных во имя спасения. Литературно-художественный альманах. Выпуск № 6.	<a href="https://elibrary.ru/item.asp?id=48506682">https://elibrary.ru/item.asp?id=48506682</a>
Сосунов И.В. и др. Настольная книга (пособие) председателя комиссии по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций и обеспечению пожарной безопасности.	<a href="https://elibrary.ru/item.asp?id=32546511">https://elibrary.ru/item.asp?id=32546511</a>