

Научная статья  
УДК 614.84  
doi: 10.17223/29491665/5/7

## Природные (лесные, степные, торфяные) пожары: прогноз, обнаружение, тушение

Егор Леонидович Лобода<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия

<sup>1,2</sup> loboda@mail.tsu.ru

**Аннотация.** В статье приведен обзор текущего состояния исследований в области природных пожаров. Дан обзор и анализ существующих и применяемых методик прогноза пожарной опасности, способов обнаружения удаленных природных пожаров и борьбы с ними. Приведено краткое описание ключевых результатов исследований природных пожаров в Томском государственном университете и перспективы их применения. Сформулированы основные требования к системам прогноза пожарной опасности, мониторинга природных пожаров и их тушения.

**Ключевые слова:** природные пожары, лесные пожары, степные пожары, прогноз пожарной опасности, обнаружение пожаров, тушение пожаров

**Благодарности:** исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030) и в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

**Для цитирования:** 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

Original article  
doi: 10.17223/29491665/5/7

## Wildland (forest, steppe, peat) fires: forecast, detection, extinguishing

Egor L. Loboda<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>2</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,

Tomsk, Russian Federation

<sup>1,2</sup> loboda@mail.tsu.ru

**Abstract.** This article provides an overview of the current state of wildfire research. A review and analysis of existing and applied methods for predicting fire danger, methods for detecting remote wildfires and combating them are given. A brief description of the key results of wildland fire research at Tomsk State University and the prospects for their application are given. The basic requirements for systems for fire danger forecasting, monitoring of wildland fires and their extinguishing are formulated.

**Keywords:** wildland fires, forest fires, steppe fires, fire danger forecast, fire detection, fire extinguishing

**Acknowledgments:** The research was carried out with the support of the Development Program of Tomsk State University (Priority 2030) and within the framework of the state assignment of the Institute of Atmospheric Optics SB RAS.

**For citation:** Loboda, E.L. (2024) Wildland (forest, steppe, peat) fires: forecast, detection, extinguishing. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 51–63. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/7

### Введение

Природные пожары сопровождают человека на протяжении всей истории. Начиная с XX в. и по настоящее время с расширением хозяйственной деятельности человека природные пожары являются одной из самых крупных природных катастроф, кото-

рые влекут за собой большие неблагоприятные последствия (загрязнение воздуха, уничтожение экосистем и биоразнообразия, деградацию лесов и экономические потери).

В Томском государственном университете (ТГУ) с 1977 г. сформировалась научная школа в области лесных пожаров, основателем которой является

А.М. Гришин [1], получивший всемирную известность как создатель теории лесных пожаров [2].

В настоящее время последствия природных пожаров могут приводить к возникновению ЧС. Проблеме природных пожаров уделяется внимание государственной власти и Президента РФ В.В. Путина, что вылилось в ряд поручений соответствующим ведомствам. Следует отметить, что прогнозируемое рядом ученых и организаций глобальное изменение климата может привести к увеличению частоты лесных пожаров и повышению длительности пожароопасного сезона, следствием чего неизбежен рост числа крупных и катастрофических пожаров, расширению территорий, подверженных их распространению и долгосрочной деградации лесорастительных условий [3]. Это оказывает влияние на радиационный фон, облачность, качество воздуха и климат в региональном и глобальном масштабах [4–6].

Среди основных причин возникновения природных пожаров следует выделить две группы: природные (грозы, сухие грозы, самовоспламенение) и антропогенные (неосторожное обращение с огнем, хозяйственная деятельность человека, объекты повышенной опасности, новые антропогенные источники). Следует отметить, что с началом СВО зафиксировано появление «новых» антропогенных источников природных пожаров, к которым следует отнести диверсионные действия с целью поджога и нанесения ущерба или создания угрозы для работы особо важных объектов, а также падение БПЛА с боеприпасами в результате работы средств РЭБ и ПВО. В качестве основных последствий масштабных природных пожаров следует выделить: значительный материальный ущерб, уничтожение биогеоценозов, изменение ландшафта и климата, угрозу жизни и здоровью населения, угрозу уничтожения населенных пунктов, а также угрозу опасным, критически важным и особо охраняемым объектам.

Снижение риска пожарной опасности и минимизация последствий природных пожаров возможны только за счет комплексного подхода, а именно реализации совокупности мероприятий: предупреждение, прогноз, обнаружение и тушение.

В данной работе представлены краткий обзор существующих и применяемых методик прогноза пожарной опасности, обнаружения пожаров и способов борьбы с ними, а также основные научные результаты в областях прогноза, обнаружения и разработки новых способов тушения природных пожаров, полученные в ТГУ за период с 1977 г. по настоящее время.

### Прогноз пожарной опасности

Среди зарубежных методик прогноза пожарной опасности наибольшую известность получили Канадская система прогноза пожарной опасности [7] и

Национальная система расчета пожарной опасности США [8]. Обе методики построены на основе анализа огромного количества статистических данных, по которым были составлены таблицы зависимости пожарной опасности от различных факторов [9], но в силу большего климатического и природного разнообразия в американской системе прогноза пожарной опасности все многообразие растительных горючих материалов (РГМ) разделено на 9 типичных моделей. В системе предполагается отдельно охраняемую территорию делить на однородные в физико-географическом отношении части, каждую из которых можно было бы приравнять к одной из 9 моделей. При этом для каждой отдельно взятой площади строится оценка пожарной опасности. При построении оценки пожарной опасности используется огромное количество таблиц и поправок, полученных на основе эмпирических данных. Согласно [10], система дает большую информацию и разносторонне характеризует явление на основе наиболее полного учета большинства важнейших факторов возникновения и распространения лесных пожаров. В частности, она учитывает состояние напочвенных РГМ и их восприимчивость к источникам огня. Показатель частоты возникновения пожаров указывает на вероятность пожаров на охраняемой территории в прогнозируемый период с учетом воспламеняемости и появления источников огня. Характеристика распространения пожара вместе с показателем высвобождения энергии дает представление об условиях локализации отдельных пожаров. Наконец, показатель пожарной нагрузки сигнализирует об уровне объема работ по ликвидации пожаров на всей территории, на которой дается прогноз. Применение системы возможно и за пределами США в сходных по климату и растительности условиях. К числу недостатков системы, согласно [10], можно отнести слишком грубое расчленение растительности на 9 категорий. Выражение показателей пожарной опасности в безразмерных величинах воспринимается субъективно, что может повлечь за собой различные решения работников охраны лесов при сходных ситуациях. Использование безразмерных показателей излишне усложнено тем, что они построены на шкалах различной дробности (стобалльные, двенадцатибалльные, пятибалльные). Для некоторых моделей стобалльная шкала использована лишь частично, менее 80%. На рис. 1 представлена логическая схема Национальной системы расчета пожарной опасности США [10].

Следует отметить, что канадская и американская методики очень похожи друг на друга в своей структуре, в подходах и принципах построения индекса пожарной опасности.

Поэтому обе они обладают схожими как достоинствами, так и недостатками. Например, не решен вопрос утренних прогнозов для наступающего дня и вопрос распределения вероятностей возникновения пожаров по охраняемой территории. Кроме того, отсут-

ствие физически содержательного смысла ряда постоянных ограничивает диапазон варьирования значений входных параметров и применения промежуточных и конечных результатов этих методик при других начальных условиях.



Рис. 1. Логическая схема Национальной системы расчета пожарной опасности в лесах США [10]

Fig. 1. Logical diagram of the National Fire Danger Rating System in US forests [10]

В настоящее время в РФ для прогноза пожарной опасности МЧС РФ использует комплексный метеорологический показатель (КМП), или Индекс горимости В.Г. Нестерова:

$$\Gamma_j = \Gamma_{j-1} \xi_j + T_j(T_j - T_{pj}), \quad (1)$$

где  $\Gamma_j$  – комплексный метеорологический показатель пожарной опасности, размерность которого  $K^2$ ;  $T_j$ ,  $T_{pj}$  – температуры воздуха и точки росы в 13–15 ч местного времени для текущего дня в К;  $\xi$  – коэффициент учета осадков, который равен нулю, если сумма осадков за прошедшие сутки  $f_j > 3$  мм, или 1, если  $f_j < 3$  мм; индекс  $j$  соответствует текущему дню пожароопасного сезона [11, 12]. Как показали исследования [13], вероятность возникновения лесного пожара и его интенсивность возрастают с увеличением комплексного показателя  $\Gamma_j$ . Класс пожарной опасности (КПО) определяется по величине  $\Gamma_j$ :

- I КПО – пожарная опасность отсутствует ( $0 < \Gamma_j < 300$ );
- II КПО – малая пожарная опасность ( $301 < \Gamma_j < 1000$ );
- III КПО – средняя пожарная опасность ( $1001 < \Gamma_j < 4000$ );
- IV КПО – высокая пожарная опасность ( $4001 < \Gamma_j < 10000$ );
- V КПО – чрезвычайная пожарная опасность ( $\Gamma_j > 10001$ ).



В методике прогноза лесной пожарной опасности, основанной на вычислении индекса горимости В.Г. Нестерова [11, 12], не учитываются реальные физические процессы, происходящие в слое лесных горючих материалов (ЛГМ), такие как действие ветра и солнечного излучения, тепломассоперенос в слое, процессы испарения и конденсации воды и пр. Единственная физическая величина, которая встречается в методике, это точка росы. Подробный анализ достоинств и недостатков индекса горимости Нестерова приводится в работе [14].

Определяющее влияние на возникновение лесных пожаров оказывают влагосодержание лесных горючих материалов (ЛГМ) и их гигроскопические и пирохимические свойства (горимость) [15, 16]. Если выполняется неравенство

$$w > w_1^*, w > w_2^*, \quad (2)$$

где  $w$  – влагосодержание ЛГМ,  $w_1^*$  – критическое влагосодержание ЛГМ при воспламенении, а  $w_2^*$  – критическое влагосодержание при распространении пожара, то лесной пожар не возникает и не распространяется вследствие повышенного влагосодержания. Известно [15, 16], что  $w_1^*$  для воспламенения ЛГМ и  $w_2^*$  для распространения фронта лесного пожара имеют разные значения. Кроме того, они для различных типов ЛГМ отличаются друг от друга. Неравенства (2) представляют собой необходимые условия горимости напочвенного слоя ЛГМ.

В качестве попыток создать альтернативную методику прогноза пожарной опасности следует отметить методику [17], разработанную в ЛенНИИЛХ, и методики, основанные на измерении яркостной температуры ЛГМ [18, 19], разработанные в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. В [17] используются уравнения для динамики влагосодержания в слое ЛГМ и вероятностный подход, но, к сожалению, она содержит большую часть из всех тех существенных недостатков, которыми обладает методика Нестерова, а именно, в ней совершенно не используются строгий математический аппарат и методы механики многофазных сред для описания физических процессов теплопереноса в слое ЛГМ и связанных с ними процессов испарения и конденсации влаги. К недостаткам подходов [18, 19] и их развитию [20–22] следует отнести то, что радиотепловое излучение экранируется кронами деревьев и степень экранирования зависит от многих факторов, таких как плотность сомкнутости крон деревьев, влагосодержания листочков или иголок в кронах деревьев, влагосодержания остальных слоев растительного покрова, облачности и пр. [9]. Следует отметить, что в работах [18, 19] прогноз лесной пожарной опасности строится на основе эмпирических формул и полученной информации при мониторинге лесов без использования физически содержательных моделей сушки ЛГМ. Очевидно, что объединение результатов теоретических исследований ЛГМ с данными аэрокосмического мониторинга лесов позволит в будущем получить прекрасный симбиоз хорошей методики оценки пожарной опасности, аэрокосмического мониторинга лесов в виде специализированных геоинформационных систем лесной пожарной опасности [23].

Отдельно следует выделить работы, посвященные математическому моделированию сушки ЛГМ [24, 25] и применению детерминированно-вероятностных подходов [26, 27], которые проводились под руководством А.М. Гришина в ТГУ и в дальнейшем представителями его научной школы. В данных работах предложены как двумерные математические модели

в сопряженной постановке [25], учитывающие внешнее течение (ветер), так и упрощенные одномерные математические модели [24, 25] учитывающие влияние ветра, наклон земной поверхности, метеопараметры и солнечное излучение. В результате численного моделирования и анализа полученных экспериментальных данных показано, что применение упрощенных математических постановок задачи дает хорошее согласование с результатами математического моделирования в двумерной сопряженной постановке и является приемлемым упрощением для дальнейшего использования в системе прогноза пожарной опасности. Применение детерминированно-вероятностных методик в работах [26, 27] дает оценки вероятности появления источников зажигания как природного характера (грозовая активность), так и антропогенного (учет объектов хозяйственной деятельности).

Исходя из анализа совокупности физических процессов, определяющих возникновение природного пожара, и описанных выше методик и подходов к прогнозу пожарной опасности, можно сделать вывод о том, что в силу сложности объекта исследования, разнообразия растительности, рельефа, метеоусловий, грозовой активности и видов антропогенной нагрузки решение задачи прогноза пожарной опасности возможно только за счет комплексного подхода, в основе которого должно лежать математическое моделирование процессов сушки ЛГМ, дополненное вероятностными подходами, которые бы учитывали разнообразные источники зажигания.

Следует отметить, что обоснованность такого вывода опирается на выполнение необходимых условий возникновения природного пожара (2), при невыполнении которых невозможно возникновение и/или дальнейшее распространение пожара. Очевидно, что моделирование процессов сушки ЛГМ необходимо осуществлять с учетом лесотаксационных данных, рельефа, локальных метеоданных, прогноза погоды и при наличии – данных спутникового мониторинга о влажности и состоянии земной поверхности. В этой связи необходимо использование математического моделирования в связке с геоинформационными системами, сетью метеорологических станций, системами прогноза погоды и данными спутникового мониторинга.

Решение такой комплексной и разноплановой задачи невозможно внутри одного научного коллектива и требует скоординированного взаимодействия нескольких групп специалистов в разных областях: математического моделирования сушки и зажигания, вероятностного подхода к оценке источников зажигания, метеорологии, геоинформационных систем и спутникового мониторинга.

## Обнаружение пожаров

Исторически обнаружение очагов пожаров осуществлялось человеком оптически с помощью наблюдателя, располагавшегося на возвышенности или специальной вышке, или случайным образом. Несмотря на простоту этого способа, следует отметить, что он обладает рядом существенных недостатков: обязательное присутствие наблюдателя, ограниченность поля зрения линией горизонта, зависимость от состояния атмосферы и погодных условий. Современные применяемые способы обнаружения пожаров не лишены этих недостатков. Применение авиации для обнаружения очагов пожаров сопряжено с затратами сил и средств и не может быть непрерывным процессом. В настоящее время применяется авиационное патрулирование с контролем «термочек», полученных по данным спутникового мониторинга. К сожалению, данный способ нельзя считать достаточно эффективным, так как данные спутникового мониторинга ограничены в возможностях состоянием атмосферы, возможностями спутниковой группировки и несовершенством алгоритмов атмосферной коррекции. Подробнее об особенностях спутникового мониторинга будет изложено ниже. Следует отметить, что важным фактором, существенно снижающим эффективность обнаружения пожаров по «термочкам», является большое количество ложных данных, вызванных насыщением принимающей аппаратуры спутника. Например, нагретая солнцем пашня или отражение солнечного излучения от поверхности крыши «избушки лесника» может привести к насыщению приемника.

В последние годы предпринимается ряд попыток создания систем наземного мониторинга природных пожаров. Известные системы наземного обнаружения либо используют непосредственно человека и не способны работать в автоматическом режиме, либо имеют радиус действия, ограниченный линией горизонта, как, например, в системе «Лесной дозор» [28] и ей подобных [29, 30]. Применение систем визуального обнаружения может быть относительно эффективно только в густонаселенных регионах, а в Сибири и на Дальнем Востоке большие территории и низкая населенность делают систему неэффективной. Кроме того, применение способов мониторинга природных пожаров в видимом или ИК-диапазонах для автоматизации требует разработки эффективных алгоритмов «машинного зрения» или «искусственного интеллекта». Поэтому остается актуальным вопрос разработки фундаментальных основ и принципов раннего загоризонтного обнаружения относительно небольших очагов природных пожаров с помощью наземных и мобильных станций.

В ТГУ в результате многолетних исследований распространения природных пожаров сформулированы новые принципы построения системы раннего обнаружения пожаров, которые основаны на обнаружении характерных признаков природных пожаров: выброс конденсированных и газообразных продуктов горения и их перенос в атмосфере (рис. 2), а также формирование индуцированной атмосферной турбулентности над очагом пожара. Принципы построения наземной автоматической системы мониторинга природных пожаров представлены в [31]. Следует отметить, что модули регистрации могут размещаться как стационарно, так и на борту БПЛА.

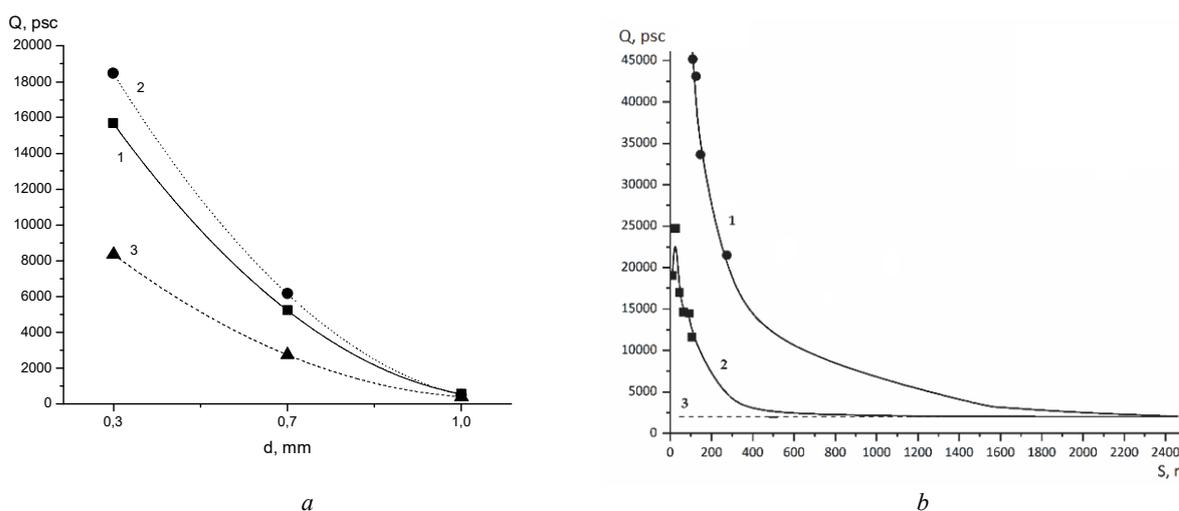


Рис. 2. Распределение конденсированных продуктов горения по размеру частиц (а) и изменение концентрации конденсированных продуктов горения на разном расстоянии от очага пожара (b) [32]

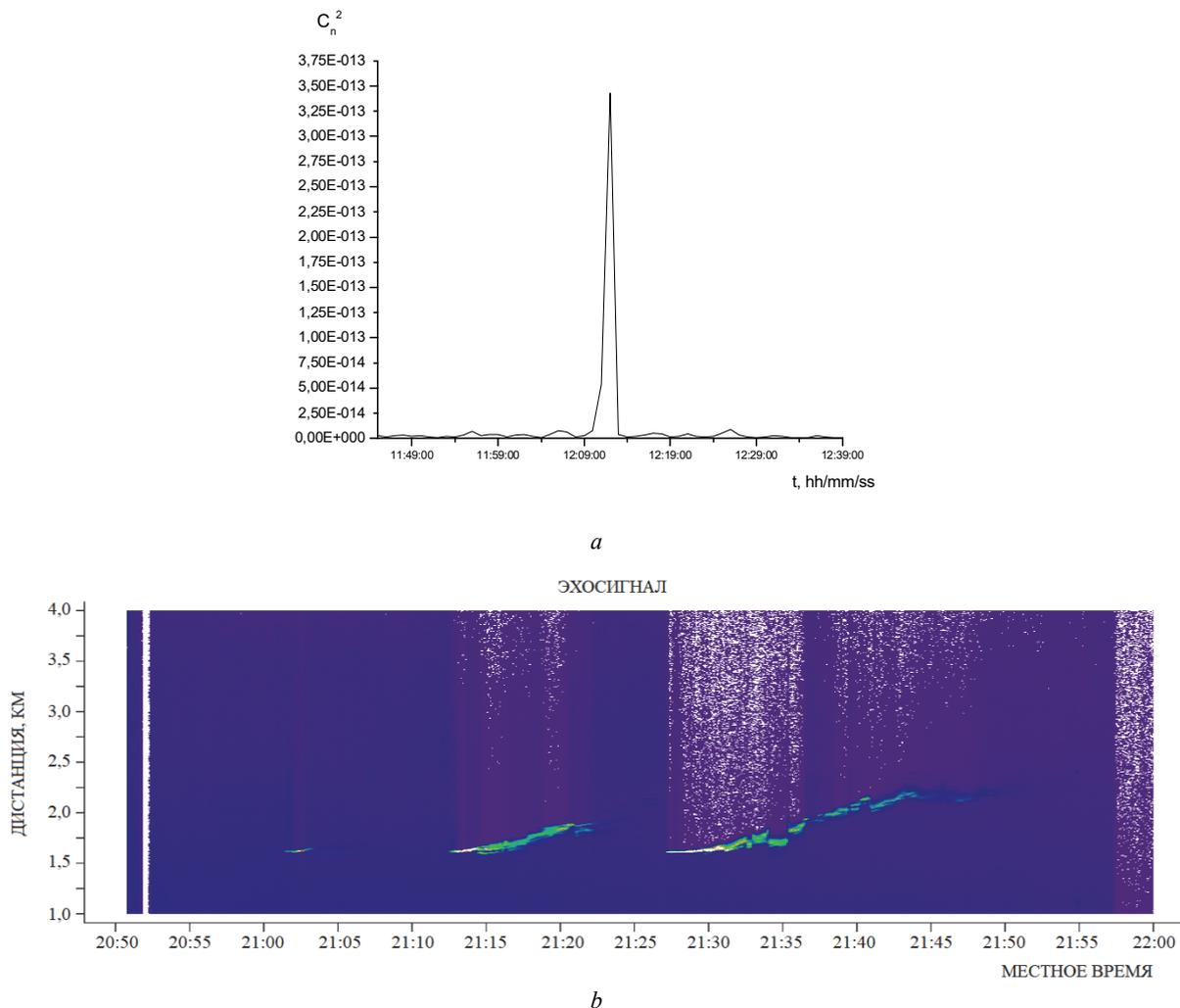
Fig. 2. Distribution of condensed combustion products by particle size (a) and changes in the concentration of condensed combustion products at different distances from the fire source (b) [32]

На рис. 2, *a* показано распределение по размеру частиц конденсированных продуктов горения, образующихся при природном пожаре на разной высоте (кривая 1 – высота 10 м, кривая 2 – высота 20 м, кривая 3 – высота 30). Очевидно, что наибольшая концентрация соответствует мелкой фракции с размером частиц меньше 0,3 мкм. На рис. 2, *b* показано снижение концентрации частиц с расстоянием от очага пожара на высотах 2 и 20 м. На рис. 2, *b* кривая 1 экстраполирует результаты измерений на высоте 20 м, кривая 2 соответствует измерениям на высоте 2 м, а кривая 3 показывает фоновые значения. На основании рис. 2, *b* можно сделать вывод, что значительное превышение концентрации конденсированных продуктов горения над фоновыми значениями обеспечит обнаружение наличия очага пожара на расстояниях до 2 км.

Данный способ мониторинга может применяться для защиты особо важных и особо охраняемых объ-

ектов. Следует отметить, что данный способ мониторинга позволяет обнаруживать не только степные, низовые и верховые лесные пожары, но и торфяные пожары, что упомянутые выше оптические способы обнаружения осуществить не смогут.

Индукцированная атмосферная турбулентность, возникающая в окрестностях очага пожара, приводит к существенному изменению структурной характеристики показателя преломления атмосферы [33] (рис. 3, *a*). Совместные исследования с коллегами из ИОА СО РАН показали, что при помощи турбулентного лидара возможно эффективно регистрировать очаги пожара. На примере модельного очага пожара на расстоянии 1,6 км была осуществлена регистрация изменения атмосферной турбулентности с применением турбулентного УФ-лидара [34] при горении модельного очага пожара. На рис. 3, *b* показано изменение эхосигнала при горении модельных очагов пожара размерами 1×1, 3×3, 5×5 м.



**Рис. 3.** Изменение структурной характеристики показателя преломления  $C_n^2$  (*a*) [33] и изменение эхосигнала лидара при проведении трех модельных экспериментов с размерами очага пожара 1×1, 3×3, 5×5 м (*b*)

**Fig. 3.** Change in the structural characteristics of the refractive index of  $C_n^2$  (*a*) [33] and change in the lidar echo signal

during three model experiments with fire source sizes of 1×1, 3×3, 5×5 m (b)

Из анализа рис. 3, b можно сделать вывод, что лидарный способ для обнаружения удаленных очагов пожаров можно рассматривать как перспективный способ обнаружения пожаров как со стационарных постов мониторинга, как и с помощью авиации, а исследования в этом направлении необходимо продолжить.

Отдельное внимание следует уделить вопросам спутникового мониторинга природных пожаров. Очевидно, что главным преимуществом данного способа обнаружения пожаров является наличие непрерывно действующей спутниковой группировки, которая может предоставлять данные о зондировании земной поверхности в автоматическом режиме. Следует отметить, что в Институте оптики атмосферы (ИОА) СО РАН имеются соответствующие наработки и алгоритмы, позволяющие осуществлять обнаружение очагов пожаров. Для эффективного обнаружения пожаров необходимо осуществлять обработку мультиспектральных спутниковых данных в диапазонах длин волн 3,5–4 и 8–13 мкм вне интенсивных линий

поглощения атмосферных газов, а для полноценного мониторинга требуется выполнение атмосферной коррекции, что, в свою очередь, требует развития методов спутникового мониторинга профилей температуры атмосферы, влажности, концентрации поглощающих газов, концентрации аэрозоля и построения масок облачности. В настоящий момент эффективность обнаружения очагов пожаров оставляет желать лучшего, так как вероятность обнаружения крупных очагов пожаров с площадью более 1 000 га едва превышает 70%, а вероятность обнаружения малых пожаров стремится к нулю. На рис. 4 приведена зависимость вероятности обнаружения лесного пожара от его площади [35]. В таблице на основе анализа данных о реальных пожарах в Томской области представлено сравнение эффективности алгоритмов ИОА СО РАН и информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). Следует отметить, что в ИСДМ-Рослесхоз используются спутниковые данные и алгоритмы NASA.

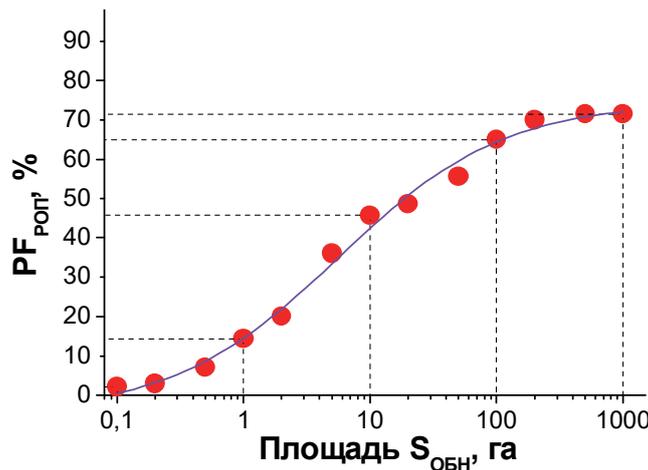


Рис. 4. Вероятность обнаружения очага лесного пожара в зависимости от его площади [35]

Fig. 4. The probability of detecting a forest fire depending on its area [35]

Сравнение результатов обнаружения пожаров с применением алгоритмов ИОА и ИСДМ-Рослесхоз [35]

Алгоритм	Количество пожаров (из них крупных пожаров – более 100 га)
Общее количество зарегистрированных очагов пожаров	455
Алгоритм ИОА	162 (86)
Алгоритм ИСДМ-Рослесхоз	120 (48)

**Теория лесных пожаров и математическое моделирование лесных пожаров на кафедре физической и вычислительной механики ТГУ**

Работы в области моделирования лесных пожаров были начаты в Томском государственном университете по государственному заданию под руководством А.М. Гришина в 1977 г.

В результате этих работ к началу 1990-х гг. А.М. Гришиным была сформулирована математическая теория лесных пожаров, которая была изложена в [2].

Работа [2] в 1997 г. по заказу Канадской лесной службы была переведена на английский язык и получила всемирную известность как теория лесных пожаров А.М. Гришина.

В настоящее время представителями научной школы А.М. Гришина в области математического моделирования лесных пожаров получены следующие основные результаты:

- на основе общей математической модели теории лесных пожаров [2] разработаны новые математические модели задач перехода низового лесного пожара в верховой в трехмерном (пространственном) случае, в двумерных постановках без учета (осесимметричный случай) и с учетом (плоский случай) внешнего поля ветра [36] и зажигания лесных массивов от светового излучения в результате техногенных и столкновительных катастроф с небесными телами типа Тунгусского метеорита, где учитывается турбулентность течения, двухтемпературность среды и основные физико-химические процессы (сушка и пиролиз лесных горючих материалов, химические реакции горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза) [37, 38];

- сформулированы новые физико-математические постановки задач зажигания лесных массивов в результате техногенных и природных (столкновительных) катастроф, учитывающие воздействие светового излучения объекта на полог леса при его полете в атмосфере [37, 38];

- проведено математическое моделирование воздействий лесных пожаров на здания и сооружения с целью изучения влияния интенсивности огня и скорости ветра на возможность возгорания зданий для различных метеорологических условий и параметров строений [39];

- с помощью метода математического моделирования изучался процесс распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов из лиственных пород деревьев различных размеров [40], установлены в динамике контуры распространения верховых лесных пожаров, которые зависят от запаса и вида лесных горючих материалов, влагосодержания, скорости и направления ветра и т.д., также определена зависимость размеров противопожарных разрывов и заслонов от вышеуказанных параметров, при которых верховой пожар прекращает распространение;

- получены результаты численного моделирования зажигания древесины в результате теплового воздействия совокупности горящих частиц.

## Тушение лесных пожаров

Борьба с лесными пожарами, безусловно, требует отдельного рассмотрения. Традиционно тушение пожаров осуществляется водой силами пожарных на земле или с применением авиации. Также для локализации пожаров формируются минерализованные полосы, а для борьбы с высокоинтенсивными пожарами осуществляются встречные палы. Оба эти способа при определенных условиях (порывы ветра, наличие мелких проводников горения и др.) могут оказаться неэффективными по причине переноса горящих частиц. Благодаря этому механизму возможны перенос горящих частиц на значительные расстояния (преодоление минерализованных полос, естественных препятствий, дорог, рек, озер и пр.) и образование новых очагов пожаров, в том числе формирование пятнистых пожаров. Следует отметить, что в настоящее время ведутся активные исследования по переносу пожаров потоком горящих частиц разными научными группами в мире [41, 42] и в ТГУ [43, 44] с применением генератора горящих и тлеющих частиц [45].

Тушение удаленных пожаров часто осуществляется путем десантирования пожарных-парашютистов, что нередко сопряжено с риском для их жизни. Тушение за счет сброса воды с применением авиации часто является единственно возможным способом локализовать и потушить крупный пожар на удаленных и труднодоступных территориях. Тем не менее следует отметить, что в результате мощных конвективных потоков над очагом горения до поверхности горящих РГМ доходит лишь незначительная часть сбрасываемой воды, что существенно увеличивает затраты на тушение и снижает эффективность.

В 1980-х годах в коллективе А.М. Гришина был предложен способ тушения, заключающийся в воздействии ударных волн (УВ) на фронт лесного пожара. В работе [46] были проведены экспериментальные исследования воздействия УВ от шнурового заряда ПЖВ-20 на фронт верхового лесного пожара. Установлено [46], что в результате воздействия УВ происходит срыв проводников горения и эффективное прерывание распространения пламени (прекращение верхового лесного пожара). В результате анализа данных по изменению давления А.М. Гришиным была высказана гипотеза о детонации продуктов пиролиза в результате воздействия УВ, которую в то время с имевшимся в коллективе оборудованием доказать не представлялось возможным. В работе [47] показано с применением скоростной ИК-термографии, что в результате воздействия УВ-сжатия продуктов пиролиза происходит их воспламенение. Следует отметить, что на основе полученных результатов

в [46] было предложено несколько способов тушения пожара с применением УВ [48–50]. Параллельно разработке новых устройств для тушения пожаров производились работы по математическому моделированию и оценке влияния УВ на срыв проводников горения в пологе леса.

Следует отметить, что применение шнуровых зарядов в 1980-х и начале 1990-х годов использовалось Авиалесоохраной для тушения крупных верховых пожаров и показывало обнадеживающие результаты. Тем не менее применение шнуровых зарядов сопряжено с необходимостью заблаговременно произвести работы по размещению заряда и своевременно обеспечить его подрыв. Кроме того, несмотря на эффективное прерывание верхового пожара, пламенный режим горения мог возобновиться в результате действия ветра, а увеличенный запас РГМ в результате срыва проводников горения способствовал возобновлению пожара.

Резюмируя написанное выше, можно сделать вывод, что все способы обладают недостаточной эффективностью. Наибольшую эффективность можно достичь только путем комбинирования различных воздействий. Например, для тушения крупных пожаров при возникновении ЧС или угрозе особо значимым и охраняемым объектам наиболее перспективным является подход в совместном применении воздействия УВ на фронт пожара с последующим охлаждением РГМ за счет сброса воды с борта летательного аппарата. В работе [51] показано, что применение УВ обеспечивает снижение расхода воды для гарантированного тушения очага горения более чем в 2 раза.

### Заключение

В результате анализа существующего состояния исследований и практики по прогнозу возникновения и распространения, способам обнаружения и тушения природных пожаров в РФ можно сделать следующие выводы и предложения:

1. Необходимо разработать общероссийскую систему прогноза возникновения пожарной опасности, основанную на математическом моделировании реальных физико-химических процессов сушки и зажигания с применением детерминированно-вероятностных моделей, учитывающих грозовую активность и влияние антропогенных факторов. Данную систему необходимо интегрировать с геоинформационными системами, содержащими данные о рельефе, лесотаксационные данные и информацию о типе и запасе РГМ, а также подробные метеоданные, получаемые с сети метеостанций и данные спутникового мониторинга состояния земной поверхности.

2. На основе математического моделирования и теории лесных пожаров А.М. Гришина необходимо создать систему прогноза распространения природных пожаров с учетом реальных данных о видах растительности, их характеристиках, метеоданных, данных о рельефе, наличии объектов хозяйственной деятельности человека. Данную систему следует интегрировать с системой прогноза пожарной опасности.

3. Необходимо дальнейшее исследование процессов распространения пожаров и перехода природных пожаров на урбанизированные территории за счет механизма переноса горящих и тлеющих частиц с целью формализации и построения математических моделей, которые позволят уточнить математические модели распространения природных пожаров.

4. В ТГУ получены результаты математического моделирования возникновения лесных пожаров в результате столкновительных катастроф и входа тел в плотные слои атмосферы с гиперзвуковой скоростью. Данные математические модели необходимо использовать для прогноза пожарной опасности в результате входа космических тел в плотные слои атмосферы и различных техногенных высокоинтенсивных процессов.

5. Необходимо продолжение исследований и развитие способов раннего обнаружения очагов пожаров, основанных как на наземных средствах мониторинга, так и с применением авиации, в том числе беспилотной. Имеющиеся наработки в области раннего обнаружения природных пожаров в ТГУ следует рассматривать как способы мониторинга природных пожаров для охраны особо охраняемых объектов и территорий.

6. Современные возможности спутникового мониторинга показывают низкую эффективность для пожаров площадью менее 100 га. Для глобального мониторинга относительно крупных пожаров необходимо дальнейшее развитие спутникового мониторинга, основывающегося на развитии возможностей спутниковой группировки и развитии алгоритмов атмосферной коррекции, использующих мультиспектральные данные, и методов спутникового мониторинга профилей температуры атмосферы, влажности, концентрации поглощающих газов, концентрации аэрозоля и построения масок облачности.

7. Тушение пожаров с применением УВ для существенного повышения эффективности необходимо комбинировать с охлаждением РГМ путем сброса воды с борта летательного аппарата. Такой комбинированный подход позволяет более чем в 2 раза снизить расход воды и затраты на работу авиации для гарантированного тушения пожара. Данный подход целесообразно применять при возникновении ЧС или

защите особо важных и охраняемых объектов от крупных природных пожаров.

#### Список источников

1. *Гришин А.М.* Мой путь в науку и образовательную деятельность. Кемерово : Практика, 2009. 167 с.
2. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука СО АН СССР, 1992. 407 с.
3. *Kasischke E.S., Christensen N.L., Stocks B.J.* Fire, Global Warming, and the Carbon Balance of Boreal Forests // *Ecological Applications*. 1995. Vol. 5 (2). P. 437–451. doi: 10.2307/1942034
4. *Voulgarakis A., Field R.D.* Fire Influences on Atmospheric Composition, Air Quality and Climate // *Current Pollution Reports*. 2015. Vol. 1. P. 70–81. doi: 10.1007/s40726-015-0007-z
5. *Vinogradova A.A., Smirnov N.S., Korotkov V.N., Romanovskaya A.A.* Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2015. Vol. 28 (6). P. 566–574. doi: 10.1134/S1024856015060184
6. *Sitnov S.A., Mokhov I.I., Dzhola A.V.* The confluence of Siberian fires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over the European part of Russia in the summer of 2016 // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. Vol. 30. P. 146–152.
7. Canadian Forest Fire Danger Rating System User's Guide.
8. *Deeming I.E., Lancaster I.W., Fosberg M.A., Furman R.W., Schroeder M.H.I.* The National Fire-Danger Rating System // *USDA Forest Service Research Paper RM-84*. February, 1972. 165 p.
9. *Лобода Е.Л.* Физическое и математическое моделирование природных пожаров и применение методов инфракрасной диагностики для исследования : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2012. 287 с.
10. *Курбатский Н.П., Костырина Т.В.* Национальная система расчета пожарной опасности США // *Обнаружение и анализ лесных пожаров*. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1977. С. 38–90.
11. *Нестеров В.Г.* Горимость леса и методы ее определения. М. ; Л. : Гослесбумиздат, 1949. 76 с.
12. *Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шатулина Т.А.* Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // *Метеорология и гидрология*. 1968. № 9. С. 102–104.
13. *Вонский С.М., Жданко В.Н.* Методические указания по оценке степени засушливости пожароопасных сезонов и расчету вероятности их наступления. Л. : ЛенНИИЛХ, 1967. 22 с.
14. *Гришин А.М.* Физика лесных пожаров. Томск : Изд-во ТГУ, 1994. 218 с.
15. *Курбатский Н.П.* Сезонные изменения влажности хвои, листьев и веточек у основных древесных пород тайги // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск, 1970. С. 155–185.
16. *Жуковская В.И.* Увлажнение и высыхание гигроскопических лесных горючих материалов // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск, 1970. С. 105–153.
17. *Телицын Г.П.* Лесные пожары, их предупреждение и тушение в Хабаровском крае. Хабаровск : Дальневосточный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, 1988. 96 с.
18. *Доррер Г.А.* Модель суточной динамики влагосодержания проводников горения // *Лесные пожары и их последствия*. Красноярск : ИЛ и ДСОАН СССР, 1985. С. 110–124.
19. *Валендик Э.Н., Кисляхов Е.К., Амбарников В.Н.* Оценка пожарной опасности элементов лесного ландшафта по их СВЧ-излучению // *Аэрокосмические методы исследования лесов : тезисы докладов Всесоюзной конференции (Красноярск, 7–9 июля 1984 г.)*. Красноярск : ИЛИД им. В.Н. Сукачева, 1984. С. 120–121.
20. *Сухинин А.И., Касун Д.Р., Стокс Б.Дж.* Дистанционное зондирование лесных пожаров в Сибири с использованием информации NOAA // *Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия: материалы международной конференции*. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 123–126.
21. *Сухинин А.И., Пономарев Е.И.* Оценка влагосодержания лесных горючих материалов по радиационной температуре. Деп. в ВИНИТИ 15.04.98 № 1144-В98.
22. *Пономарев Е.И.* Статистические модели динамики пожарной опасности в Красноярском крае // *Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия: материалы международной конференции*. Томск : Изд-во Том. ун-та, 1999. С. 121–122.
23. *Курбатский Н.П.* Терминология в лесной пирологии // *Вопросы лесной пирологии*. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1972. С. 171–231.
24. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Катаева Л.Ю., Лобода Е.Л.* Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов // *Физика горения и взрыва*. 2001. Т. 37, № 1. С. 65–76.
25. *Лобода Е.Л.* Физико-математическое моделирование сушки и зажигания слоя лесных горючих материалов : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2002. 125 с.
26. *Барановский Н.В.* Оценка вероятности возникновения лесных пожаров с учетом метеоусловий, антропогенной нагрузки и грозовой активности // *Пожарная безопасность*. 2009. № 1. С. 93–99.
27. *Фильков А.И.* Детерминированно-вероятностная система прогноза лесной пожарной опасности : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2005. 162 с.
28. Лесной дозор. URL: <http://www.lesdozor.ru>
29. Патент № 2395319 Российская Федерация. Способ мониторинга пожарной обстановки / Резников В.М., Онищенко Ю.А., Щеголькова В.В. № 2008129952/12, заявл. 21.07.2008; опубл. 27.07.2010. Бюл. № 21. 3 с.
30. Патент 124512 Российская Федерация. Автоматизированная система мониторинга лесных и торфяных пожаров / Никитин О.Р., Породников А.В. № 2012111950/08, заявл. 27.03.2012; опубл. 27.01.2013. Бюл. № 3. 5 с.
31. Патент 2747667 Российская Федерация. Комплексная система мониторинга природных пожаров / Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Касымов Д.П., Рейно В.В. № 2020126921, заявл. 12.08.2020; опубл. 12.05.2021. Бюл. № 14. 7 с.

32. Loboda E.L., Kasymov D., Agafontsev M., Reyno V., Lutsenko A. et al. Crown Fire Modeling and Its Effect on Atmospheric Characteristics. // Atmosphere. 2022. Vol. 13. Art. no. 1982. P. 1–9. doi: 10.3390/atmos13121982
33. Лобода Е.Л., Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Рейно В.В., Гордеев Е.В., Тарканова В.А. и др. Влияние малых природных пожаров на характеристики атмосферы вблизи очага горения // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 10. С. 818–823. doi: 10.15372/AOO20201011
34. Разенков И.А., Надеев А.И., Зайцев Н.Г., Гордеев Е.В. Ультрафиолетовый турбулентный лидар УОР-5 // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 04. С. 289–297. doi: 10.15372/AOO20200407
35. Афонин С.В. Многофакторный физический подход к атмосферной коррекции спутниковых инфракрасных изображений земной поверхности : дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2011. 285 с.
36. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания крон деревьев // Физика горения и взрыва. 1998. Т. 34, № 4. С. 13–22.
37. Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов в результате космических и техногенных катастроф // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 2. С. 18–30.
38. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 5. С. 107–115.
39. Perminov V.A., Fraynova K.O., Lukianov A. Numerical Modeling of the Process of Thermal Impact of Wildfires on Buildings Located near Forests // Materials Science Forum Scientific Journal. 2019. Vol. 970: Modern Problems in Materials Processing, Manufacturing, Testing and Quality Assurance II. P. 82–87.
40. Perminov V.A., Marzaeva V.I. Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Spread in the Presence of Fire Breaks and Barriers of Finite Size // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2020. Vol. 56 (3). P. 332–343. doi: 10.1134/S0010508220030107
41. Suzuki S., Manzello S.L. Ignition Vulnerabilities of Combustibles around Houses to Firebrand Showers: Further Comparison of Experiments // Sustainability. 2021. Vol. 13 (4). Art. No. 2136. P. 1–14. doi: 10.3390/su13042136
42. Manzello S.L., Suzuki S., Gollner M.J., Fernandez-Pello A.C. Role of Firebrand Combustion in Large Outdoor Fire Spread // Progress in Energy and Combustion Science. 2020. Vol. 76. Art. No. 100801. P. 1–19. doi: 10.1016/j.pecs.2019.100801
43. Касымов Д.П., Агафонцев М.В., Перминов В.В., Лобода Е.Л., Лобода Ю.А., Рейно В.В., Орлов К.Е. Исследование устойчивости к воспламенению строительных конструкций из древесины при тепловом воздействии потока горящих частиц // Физика горения и взрыва. 2023. Т. 59, № 2. С. 91–100. doi: 10.15372/FGV20230211
44. Perminov V.V., Kasymov D.P. Use of a firebrand generator in the study of wildland and anthropogenic fires // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2389. P. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2389/1/012014
45. Патент № 183063 Российская Федерация. Генератор горящих и тлеющих частиц / Касымов Д.П., Перминов В.В., Фильков А.И., Агафонцев А.М., Рейно В.В., Гордеев Е.В. № 2017145135, заявлено 21.12.2017; опубл. 07.09.2018. Бюл. № 25. 6 с.
46. Ковалев Ю.М. Математическое и физическое моделирование инициирования детонации в твердых взрывчатых веществах и распространение ударных волн в пологом лесу при лесных пожарах : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1987. 195 с.
47. Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А. Детонационные процессы во фронте горения растительных горючих материалов // Пожарная безопасность. 2023. № 1 (110). С. 27–34. doi: 10.37657/vniipro.pb.2023.110.1.002
48. Авторское свидетельство № 1147413 СССР МКИ А 62 С. Способ локализации лесных пожаров / Гришин А.М., Абалтусов В.Е., Бабаев В.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. № 3359093/29, заявл. 01.12.1981. ВНИИГПЭ ; опубл. 1985. Бюл. № 12. 3 с.
49. Авторское свидетельство № 1136811 СССР МКИ А 62 С. Способ тушения лесного пожара / Гришин А.М., Зверев В.Г., Плюхин В.В., Грузин А.Д., Бабаев В.М., Абалтусов В.Е. № 3516796/29-12, заявл. 01.12.1982; опубл. 1985. Бюл. № 4. 3 с.
50. Авторское свидетельство № 1657198 А1, А 62 С 3/02 от 22.02.1980 г. Устройство для тушения лесного пожара / Гришин А.М., Голованов А.Н., Андреев Н.А., Пряхин П.Н. № 4661158, заявл. 03.01.1989; опубл. 23.09.1991. Бюл. № 23. 2 с.
51. Лобода Е.Л., Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., Рейно В.В., Хасанов И.Р., Колесников И.А., Лобода Ю.А., Базаров Д.Д. Комбинированные подходы в тушении очага горения растительных горючих материалов // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67, № 3. С. 53–60. doi: 10.17223/00213411/67/3/6

## References

1. Grishin, A.M. (2009) *Moj put' v nauku i obrazovatel'nuju dejatel'nost'* [My path to science and educational activities]. Kemerovo : Praktika Publishing House.
2. Grishin, A.M. (1997). *Mathematical modeling forest fire and new methods fighting them*. Tomsk : Publishing House of Tomsk University.
3. Kasischke, E.S., Christensen, N.L. & Stocks, B.J. (1995) Fire, Global Warming, and the Carbon Balance of Boreal Forests. *Ecological Applications*. 5(2). pp. 437–451. doi: 10.2307/1942034
4. Voulgarakis, A. & Field, R.D. (2015) Fire Influences on Atmospheric Composition, Air Quality and Climate. *Current Pollution Reports*. 1. pp. 70–81. doi:10.1007/s40726-015-0007-z
5. Vinogradova, A.A., Smirnov, N.S., Korotkov, V.N. & Romanovskaya, A.A. (2015) Forest fires in Siberia and the Far East: Emissions and atmospheric transport of black carbon to the Arctic. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 28. pp. 512–520. doi: 10.1134/S1024856015060184
6. Sitnov, S.A., Mokhov, I.I. & Dzhola, A.V. (2017) The confluence of Siberian fires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over the European part of Russia in the summer of 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 30. pp. 146–152.
7. Canadian Forest Fire Danger Rating System User's Guide.
8. Deeming, I.E., Lancaster, I.W., Fosberg, M.A., Furman, R.W. & Schroeder, M.HI. (1972) The National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service Research Paper RM-84.
9. Loboda, E.L. (2012) *Fizicheskoe i matematicheskoe modelirovanie prirodnyh pozharov i primenenie metodov infrakrasnoj diagnostiki dlja issledovaniya* [Physical and mathematical modeling of natural fires and the use of infrared diagnostic methods for research]. Dr. Sc. Diss. Tomsk.

10. Kurbatsky, N.P. & Kostyrina, T.V. (1977) Natsional'naiia sistema rascheta pozharnoi opasnosti SShA [US National Fire Hazard Calculation System]. In: *Obnaruzhenie i analiz lesnykh pozharov* [Detection and analysis of forest fires]. Krasnoyarsk : IliD SO AN USSR. pp. 38–90.
11. Nesterov, V.G. (1949) *Gorimost' lesa i metody ee opredeleniia* [Forest fire danger and methods for its determination]. Moscow ; Leningrad : Goslesbumizdat.
12. Nesterov, V.G., Gritsenko, M.V. & Shatulina, T.A. (1968) *Ispol'zovanie temperatury tochki rosy pri raschete pokazatel'ia gorimosti lesa* [Using dew point temperature in calculating the forest fire rate]. *Meteorologiya i gidrologiya – Meteorology and Hydrology*. 9. pp. 102–104.
13. Vonsky, S.M. & Zhdanko, V.N. (1967) *Metodicheskie ukazaniia po otsenke stepeni zasushlivosti pozharoопасnykh sezonov i raschete veroiatnosti ikh nastupleniia* [Guidelines for assessing the degree of dryness of fire-dangerous seasons and calculating the probability of their occurrence]. Leningrad : LenNILH.
14. Grishin, A.M. (1994) *Fizika lesnykh pozharov* [Physics of forest fires]. Tomsk : Tomsk State University Press.
15. Kurbatsky, N.P. (1970) Sezonnnye izmeneniia vlazhnosti khvoi, list'ev i vetochek u osnovnykh drevesnykh porod taigi [Seasonal changes in the humidity of needles, leaves and twigs of the main tree species of the taiga]. *Voprosy lesnoi pirologii – Questions of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk. pp. 155–185.
16. Zhukovskaya, V.I. (1970) Uvlazhnenie i vysykhaniie gigroskopicheskikh lesnykh goriuchikh materialov [Humidification and drying of hygroscopic forest combustible materials]. *Voprosy lesnoi pirologii – Questions of Forest Pyrology*. Krasnoyarsk. pp. 105–153.
17. Telitsyn, G.P. (1988) *Lesnye pozhary, ikh preduprezhdenie i tushenie v Khabarovskom krae* [Forest fires, their prevention and extinguishing in the Khabarovsk Territory]. Khabarovsk : Far Eastern Research Institute of Forestry.
18. Dorrer, G.A. (1985) *Model' sutochnoi dinamiki vlagosoderzhaniia provodnikov goreniiia* [Model of daily dynamics of moisture content of combustion conductors]. In: *Lesnye pozhary i ikh posledstviia* [Forest fires and their consequences]. Krasnoyarsk : IL and DSOAN USSR. pp. 110–124.
19. Valendik, E.N., Kisilyakhov, E.K. & Ambarnikov, V.N. (1984) Otsenka pozharnoi opasnosti elementov lesnogo landshafta po ikh SVCh izlucheniui [Assessment of the fire danger of forest landscape elements based on their microwave radiation]. In: *Aerokosmicheskie metody issledovaniia lesov* [Aerospace methods for forest research] : abstracts of the All-Union Conference proceedings (Krasnoyarsk, July 7-9, 1984). Krasnoyarsk : ILiD im. V.N. Sukacheva. pp. 120–121.
20. Sukhinin, A.I., Kahun, D.R. & Stokes, B.J. (1999) Distantionnoe zondirovaniie lesnykh pozharov v Sibiri s ispol'zovaniem informatsii NOAA [Remote sensing of forest fires in Siberia using NOAA information]. In: *Pozhary v lesu i na ob'ektakh lesokhimicheskogo kompleksa: vozniknovenie, tushenie i ekologicheskie posledstviia* [Fires in the forest and at forest chemical complex facilities: occurrence, extinguishing and environmental consequences] : international conference proceedings. Tomsk : Tomsk University Press. pp. 123–126.
21. Sukhinin, A.I. & Ponomarev, E.I. (1998) *Otsenka vlagosoderzhaniia lesnykh goriuchikh materialov po radiatsionnoi temperature* [Estimation of moisture content of forest combustible materials based on radiation temperature]. Depositing at VINITI, No. 1144-B98.
22. Ponomarev, E.I. (1999) Statisticheskie modeli dinamiki pozharnoi opasnosti v Krasnoiarskom krae [Statistical models of fire danger dynamics in the Krasnoyarsk Territory]. In: *Pozhary v lesu i na ob'ektakh lesokhimicheskogo kompleksa: vozniknovenie, tushenie i ekologicheskie posledstviia* [Fires in the forest and at forest chemical complex facilities: occurrence, extinguishing and environmental consequences] : international conference proceedings. Tomsk : Tomsk University Press. pp. 121–122.
23. Kurbatsky, N.P. (1972) Terminologiya v lesnoi pirologii [Terminology in forest pyrology]. In: *Voprosy lesnoi pirologii* [Issues of forest pyrology]. Krasnoyarsk : ILiD SO AN USSR. pp. 171–231.
24. Grishin, A.M., Golovanov, A.N., Kataeva, L.Yu. & Loboda, E.L. (2001) Postanovka i reshenie zadachi o sushke sloia lesnykh goriuchikh materialov [Statement and solution of the problem of drying a layer of forest combustible materials]. *Fizika goreniiia i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 37 (1). pp. 65–76.
25. Loboda, E.L. (2002) *Fiziko-matematicheskoe modelirovaniie sushki i zazhiganiia sloia lesnykh goriuchikh materialov* [Physics and mathematical modeling of drying and ignition of a layer of forest combustible materials]. Cand. Sc. Diss. Tomsk.
26. Baranovsky, N.V. (2009) Otsenka veroiatnosti vozniknoveniia lesnykh pozharov s uchetom meteoulovii, antropogennoi nagruzki i grozovoi aktivnosti [Assessing the probability of forest fires taking into account weather conditions, anthropogenic load and thunderstorm activity]. *Pozharnaia bezopasnost' – Fire Safety*. 1. pp. 93–99.
27. Filkov, A.I. (2005) *Determinirovanno-veroiatnostnaia sistema prognoza lesnoi pozharnoi opasnosti* [Deterministic-probabilistic system for forecasting forest fire danger]. Cand. Sc. Diss. Tomsk.
28. DSK, LLC. (n.a.) *Lesnoj Dozor* [Forest Watch] [Online]. Available from: <http://www.lesdozor.ru>
29. Reznikov, V.M., Onishchenko, Yu.A. & Shchegolkova, V.V. (2010) *Sposob monitoringa pozharnej obstanovki* [Method for monitoring fire conditions]. Patent No. 2395319 Russian Federation. № 2008129952/12, appl. 21.07.2008; publication date 27.07.2010, Bul. No. 21.
30. Nikitin, O.R. & Porodnikov, A.V. (2013) *Avtomatizirovannaya sistema monitoringa lesnykh i torfyanykh pozharov* [Automated system for monitoring forest and peat fires]. Patent No. 124512 Russian Federation. № 2012111950/08, appl. 27.03.2012; publication date 27.01.2013, Bul. No. 3.
31. Loboda, E.L., Agafontsev, M.V., Kasymov, D.P. & Reino, V.V. (2021) *Kompleksnaya sistema monitoringa prirodnykh pozharov* [Integrated system for monitoring natural fires]. Patent No. 2747667 Russian Federation. № 2020126921, appl. 12.08.2020; publication date 12.05.2021, Bul. No. 14.
32. Loboda, E.L., Kasymov, D., Agafontsev, M., Reyno, V., Lutsenko, A. & et al. (2022) Crown Fire Modeling and Its Effect on Atmospheric Characteristics. *Atmosphere*. 13. Art. No. 1982. doi: 10.3390/atmos13121982
33. Loboda, E.L., Kasymov D.P., Agafontsev M.V., Reinom V.V., Gordeev E.V., Tarkanovam V.A. & et al. (2020) Impact of small-scale wild fires on the air parameters near burning centers. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the Atmosphere and Ocean*. 33 (10). pp. 818–823. (In Russian). doi: 10.15372/AOO20201011
34. Razenkov, I.A., Nadeev, A.I., Zaitsev, N.G. & Gordeev, E.V. (2020) Turbulent UV lidar BSE-5. *Optika atmosfery i okeana – Optics of the atmosphere and ocean*. 33 (4). pp. 289–297. (In Russian). doi: 10.15372/AOO20200407

35. Afonin, S.V. (2011) *Mnogofaktornyi fizicheskii podkhod k atmosfernoii korrektsii sputnikovyykh infrakrasnykh izobrazhenii zemnoi poverkhnosti* [Multifactorial physical approach to atmospheric correction of satellite infrared images of the earth's surface]. Dr. Sc. Diss. Tomsk.
36. Grishin, A.M. & Perminov, V.A. (1998) Matematicheskoe modelirovanie zazhiganiia kron derev'ev [Mathematical modeling of tree crown ignition]. *Fizika gorenii i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 34 (4). pp. 13–22.
37. Grishin, A.M., Efimov, K.N. & Perminov, V.A. (1996) Zazhiganie lesnykh massivov v rezul'tate kosmicheskikh i tekhnogennykh katastrof [Ignition of forests as a result of space and man-made disasters]. *Fizika gorenii i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 32 (2). pp. 18–30.
38. Grishin, A.M. & Perminov, V.A. (1996) Zazhiganie lesnykh massivov pod deistviem vysotnogo istochnika luchistoi energii [Ignition of forests under the influence of a high-altitude source of radiant energy]. *Fizika gorenii i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 32 (5). pp. 107–115.
39. Perminov, V.A., Fraynova, K.O. & Lukianov, A. (2019) Numerical Modeling of the Process of Thermal Impact of Wildfires on Buildings Located near Forests. *Materials Science Forum Scientific Journal*. 970 : Modern Problems in Materials Processing, Manufacturing, Testing and Quality Assurance II. pp. 82–87.
40. Perminov, V.A. & Marzaeva, V.I. (2020) Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Spread in the Presence of Fire Breaks and Barriers of Finite Size. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 56 (3). pp. 332–343. doi: 10.1134/S0010508220030107
41. Suzuki, S. & Manzello, S.L. (2021) Ignition Vulnerabilities of Combustibles around Houses to Firebrand Showers: Further Comparison of Experiments. *Sustainability*. 13(4). Art. No. 2136. pp. 1–14. doi: 10.3390/su13042136
42. Manzello, S.L., Suzuki, S., Gollner, M.J. & Fernandez-Pello, A.C. (2020) Role of Firebrand Combustion in Large Outdoor Fire Spread. *Progress in Energy and Combustion Science*. 76. Art. No. 100801. pp. 1–19. doi: 10.1016/j.pecs.2019.100801
43. Kasymov, D.P., Agafontsev, M.V., Perminov, V.V., Loboda, E.L., Loboda, Yu.A., Reino, V.V. & Orlov, K.E. (2023) Resistance to ignition of wood building structures under the thermal influence of flow of burning particles. *Fizika gorenii i vzryva – Physics of Combustion and Explosion*. 59 (2). pp. 91–100. (In Russian). doi: 10.15372/FGV20230211
44. Perminov, V.V. & Kasymov, D.P. (2022) Use of a firebrand generator in the study of wildland and anthropogenic fires. *Journal of Physics: Conference Series*. 2389. pp. 1–6. doi: 10.1088/1742-6596/2389/1/012014
45. Kasymov, D.P., Perminov, V.V., Filkov, A.I., Agafontsev, A.M., Reino, V.V. & Gordeev, E.V. (2018) *Generator goryashchih i tleyushchih chastic* [Generator of burning and smoldering particles]. Patent No. 183063 Russian Federation. № 2017145135, appl. 21.12.2017; publication date 07.09.2018, Bul. No. 25.
46. Kovalev, Yu.M. (1987) *Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie initsirovaniia detonatsii v tverdykh vzryvchatykh veshchestvakh i rasprostranenie udarnykh voln v pologe lesa pri lesnykh pozharakh* [Mathematical and physical modeling of the initiation of detonation in solid explosives and the propagation of shock waves in the forest canopy during forest fires]. Cand. Sc. Diss. Tomsk.
47. Loboda, E.L., Agafontsev, M.V. & Staroseltseva, A.A. (2023) Detonation processes in the combustion front of plant combustible materials. *Fire Safety*. 1 (110). pp. 27–34. (In Russian). doi: 10.37657/vniipo.pb.2023.110.1.002
48. Grishin, A.M., Abaltusov, V.E., Babaev, V.M., Gruzin, A.D. & Zverev, V.G. (1985) *Sposob lokalizatsii lesnykh pozharov* [Method of localizing forest fires]. Author's certificate No. 1147413 USSR MKI A 62 S. № 3359093/29, appl. 01.12.1981; publication date 1985, Bul. No. 12.
49. Grishin, A.M., Zverev, V.G., Plyukhin, V.V., Gruzin, A.D., Babaev, V.M. & Abaltusov, V.E. (1985) *Sposob tusheniya lesnogo pozhara* [Method of extinguishing a forest fire]. Author's certificate No. 1136811 USSR MKI A 62 S. № 3516796/29-12, appl. 01.12.1982; publication date 1985, Bul. No. 4.
50. Grishin, A.M., Golovanov, A.N., Andreev, N.A. & Pryakhin, P.N. (1991) *Ustrojstvo dlya tusheniya lesnogo pozhara* [Device for extinguishing a forest fire]. Author's certificate No. 1657198 A1, A 62 C. № 4661158, appl. 03.01.1989; publication date 23.09.1991, Bul. № 23.
51. Loboda, E.L., Agafontsev, M.V., Staroseltseva, A.A., Reyno, V.V., Khasanov I.R., Kolesnikov I.A., Loboda Yu.A. & Bazarov, D.D. (2024) A combined approach to extinguishing the source of combustion of vegetative combustible materials. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 67 (3). pp. 53–60. (In Russian). doi: 10.17223/00213411/67/3/6

#### Информация об авторе:

**Лобода Егор Леонидович** – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); главный научный сотрудник Лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы СО РАН (Томск, Россия). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

*Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.*

#### Information about the author:

**Loboda Egor L.**, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department of Physical and Computational Mechanics, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

*The author declares no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 25.03.2024; одобрена после рецензирования 08.04.2024; принята к публикации 16.05.2024*

*The article was submitted 25.03.2024; approved after reviewing 08.04.2024; accepted for publication 16.05.2024*