

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

## Применение методов ИК-термографии для исследования природных пожаров и процессов горения

Егор Леонидович Лобода<sup>1,2</sup>, Владимир Владимирович Рейно<sup>3</sup>

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

<sup>2,3</sup> *Институт оптики атмосферы СО РАН, Томск, Россия*

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

<sup>3</sup> *reyno@iao.ru*

**Аннотация.** В статье приведен обзор оригинальных методов исследования природных пожаров и процессов горения с применением скоростной ИК-термографии. Сформулированы основные принципы применения ИК-термографии для исследования процессов горения: поля температуры в пламени, структуры турбулентного пламени, образующегося при горении растительных горючих материалов, а также применение ИК-термографии для исследования к-фазного горения. Показано, что ИК-термография может применяться на практике для определения кромки пожара в условиях сильного задымления.

**Ключевые слова:** природные пожары, горение, пламя, ИК-термография, характеристики пламени

**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., Рейно В.В. Применение методов ИК-термографии для исследования природных пожаров и процессов горения // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 5. С. 34–42. doi: 10.17223/29491665/5/5

Original article  
doi: 10.17223/29491665/5/5

## Application of IR thermography methods to study wildland fires and combustion processes

Egor L. Loboda<sup>1,2</sup>, Vladimir V. Reyno<sup>3</sup>

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

<sup>2,3</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*

<sup>3</sup> *reyno@iao.ru*

**Abstract.** The article provides an overview of original methods for studying wildfires and combustion processes using IR thermography. The basic principles of using IR thermography to study combustion processes are formulated, such as temperature fields in the flame, the structure of the turbulent flame formed during the combustion of plant combustible materials, as well as the use of IR thermography to study k-phase combustion. It is shown that the IR thermography can be used to determine the edge of a fire in conditions of heavy smoke.

**Keywords:** wildland fires, combustion, flame, IR thermography, flame characteristics

**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. & Reyno, V.V. (2024) Application of IR thermography methods to study natural fires and combustion processes. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 5. pp. 34–42. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/5/5

### Введение

Применение методов ИК-термографии в мире широко используется в медицине, в технологических процессах, например, при изготовлении стекла и

пластмассы, определении мест самовозгорания угольных складов и т.д. Но в основном приходится на диагностику электротехнического, теплового оборудования и ограждающих конструкций зданий на предмет теплопотерь. Исследования этих объектов

связаны с определением карты температуры поверхности твердых тел, а точнее, регистрируется температурный контраст частей оборудования по отношению к заведомо исправной части и называется «избыточной температурой» или по отношению к температуре окружающего воздуха и называется «превышением температуры». Так как процесс преобразования тепловизионного электрического сигнала в температуру носит нелинейный характер, то погрешность инфракрасных (ИК) камер в измерении абсолютных значений температур составляет  $\pm 2\%$ . В то же время высокая чувствительность современных ИК-камер (не хуже  $0,07\text{ }^\circ\text{C}$ ) к перепадам температур измеряемой поверхности и описанный выше метод ухода от абсолютных значений температуры и измерения только разницы температур позволяют уверенно диагностировать оборудование и элементы зданий на самой ранней стадии дефектов.

Упомянутые выше объекты, по сути, являются серыми телами как минимум в ИК-диапазоне длин волн, их спектр излучения непрерывен и подчиняется закону Планка. Поэтому для повышения чувствительности регистрирующего оборудования измерения производятся в широком спектральном диапазоне. В случае же когда объектом исследования является пламя, то спектр его излучения существенно отличается от спектра излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Этот факт обуславливает необходимость более детального рассмотрения спектра излучения пламени с целью выбора узких рабочих спектральных интервалов.

Необходимо заметить, что ввиду роста доступности ИК-техники «ненаучного класса» в литературе стало появляться значительное число публикаций, где авторы без какого-либо обоснования применяют ИК-технику, не вдаваясь в подробности ни спектральных характеристик прибора, ни спектральных характеристик объекта исследования. При этом, подбирая эффективные значения коэффициентов излучения, получают относительно правдоподобные результаты измерений, полагая, что низкая инструментальная погрешность гарантирует хороший результат.

Однако такие подходы приводят к грубым осреднениям получаемых результатов. Во-первых, следует отметить, что при работе с высокотемпературными объектами применение ИК-камер средневолнового диапазона (с рабочим диапазоном  $2\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ ) позволяет получить лучший тепловой контраст, чем в случае применения длинноволновых приборов ( $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ ). Во-вторых, при работе с высокотемпературными объектами динамический диапазон матриц ИК-камеры накладывает значительные ограничения на диапазон измеряемых температур, который обычно расширяют за счет режима «Multi-IT», но с потерей разрешения

по времени. В-третьих, применение широкого спектрального диапазона при работе с объектами, чей спектр излучения не является непрерывным или существенно отличается от спектра излучения АЧТ, приводит к «размазыванию» термограммы и потере детализации тепловой структуры.

Например, более 25 лет назад в авторском коллективе ИОА СО РАН и ТГУ были получены первые термограммы с помощью ИК-камеры Inframetrics 760 с рабочим диапазоном  $3\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  на одноэлементном фотоприёмнике. Из анализа изображений термограмм, сделанных в одни и те же моменты времени для одной массы и типа растительных горючих материалов (РГМ) для разных спектральных интервалов  $3\text{--}5$  и  $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  было установлено, что наиболее информативен для отображения пламени спектральный интервал  $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$ .

На рис. 1, *a* показана термограмма распределения яркостной температуры при горении опада хвои кедра в спектральном интервале  $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$  при  $T_{\text{max}} = 556\text{ }^\circ\text{C}$ , а на рис. 2, *b* показана термограмма в спектральном интервале  $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  при  $T_{\text{max}} = 532\text{ }^\circ\text{C}$ . Из анализа термограммы можно определить, что в диапазоне  $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$  лучше видны само пламя и поднятый передний фронт горения, который формируется за счёт продуктов пиролиза. В спектральном интервале  $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  наблюдается слабая излучательная способность пламени, и его тепловизионное изображение почти не просматривается. Инфракрасное изображение в интервале  $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  определяется наличием излучения конденсированной фазы продуктов горения. Спектр излучения конденсированных продуктов горения близок к спектру излучения АЧТ и значительно шире среднего ИК-диапазона в сторону длинных волн. При этом величина коэффициента излучения отдельно взятых частиц приближается к значению 1, которая в общем случае требует поправки с учетом концентрации компонентов. На рис. 2 показаны термограммы горения штабеля сосновых досок объёмом примерно  $4\text{ м}^3$ . Следует отметить, что даже несмотря на достаточно большую концентрацию конденсированных продуктов горения в пламени в спектральном интервале  $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$ , отчетливо видна только горячая поверхность твердого топлива, а изображение пламени слабое или практически отсутствует.

Из анализа изображений видно, что в спектральном интервале  $8\text{--}12\text{ }\mu\text{m}$  изображение более фрагментарно и не замыто излучением пламени. Напротив, в спектральном интервале  $3\text{--}5\text{ }\mu\text{m}$  фронтальная поверхность пламени, обращённая к наблюдателю, имеет высокую излучательную способность и слой пламени несколько ослабляет излучение, исхо-

дующее от конденсированной фазы продуктов горения. Значения температур на термограммах (см. рис. 2) не скорректированы под реальные значения

коэффициентов излучения, которые обычно корректируются по средним показаниям термопар до реальных значений.

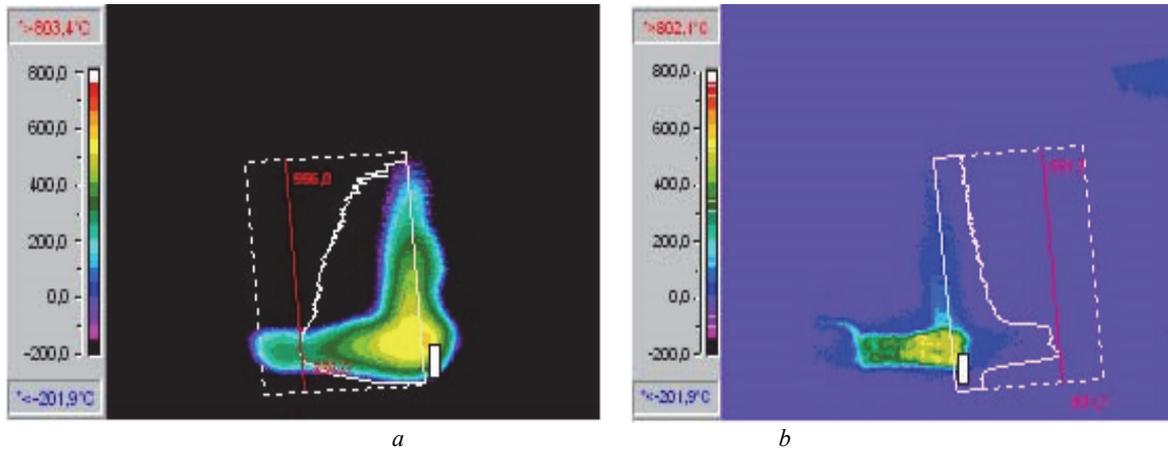


Рис. 1. Термограмма пламени при горении РГМ в диапазоне длин волн: *a* – 3–5 мкм; *b* – 8–12 мкм [1]

Fig. 1. Flame thermogram during RGM combustion in the wavelength range: *a* – 3–5  $\mu\text{m}$ ; *b* – 8–12  $\mu\text{m}$  [1]

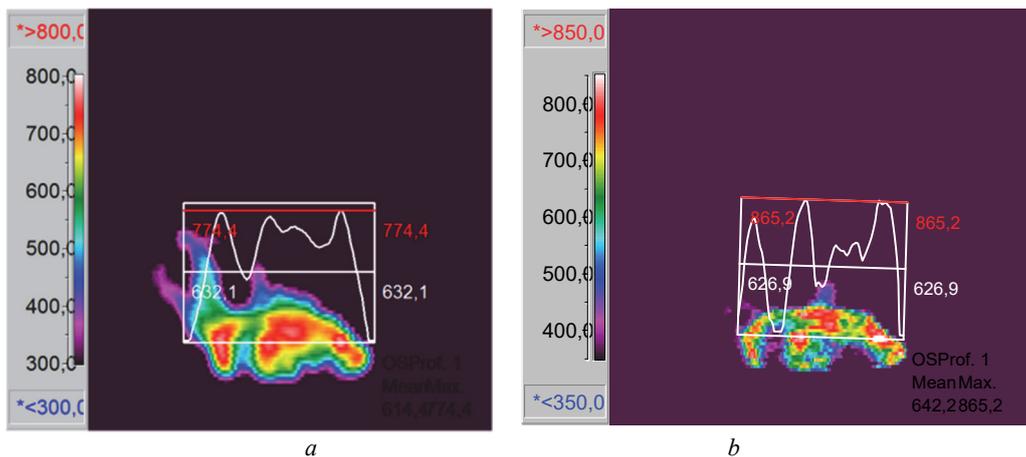


Рис. 2. Термограмма горения штабеля сосновых досок в диапазонах длин волн: *a* – 3–5 мкм; *b* – 8–12 мкм [1]

Fig. 2. Thermogram of combustion of a stack of pine boards in the wavelength ranges: *a* – 3–5  $\mu\text{m}$ ; *b* – 8–12  $\mu\text{m}$  [1]

Очевидно, что спектр излучения основных газообразных продуктов горения сосредоточен в среднем ИК-диапазоне и для успешной работы необходима ИК-камера с рабочим диапазоном длин волн от 2,0 до 5,5 мкм.

Избежать указанных выше недостатков в полной мере или невозможно, или это требует значительных материальных затрат, так как стоимость скоростных ИК-камер «научного класса» неприлично высока, а с 2008 г. еще существует запрет на экспорт в Россию быстроредействующих тепловизоров со средневолновым рабочим диапазоном (1,5–5 мкм). Следует отметить, что наиболее широко распространенные камеры на неохлаждаемых болометрах ограничены частотой

считывания кадров 9 Гц и узким диапазоном измерения температур не более 200°. Тем не менее приборы «научного класса» имеются в ряде научных коллективов, и такие камеры позволяют применять узкополосные оптические фильтры. Применяя фильтры, можно селективно обрабатывать излучение исследуемых объектов по участку спектра излучения, а также расширять динамический диапазон измеряемых температур за счет снижения интегрального потока излучения, падающего на матрицу камеры.

Учитывая, что при пламенном горении различных топлив значительный вклад в излучение пламени вносят летучие продукты пиролиза и газообразные продукты горения, а применение узкополосных

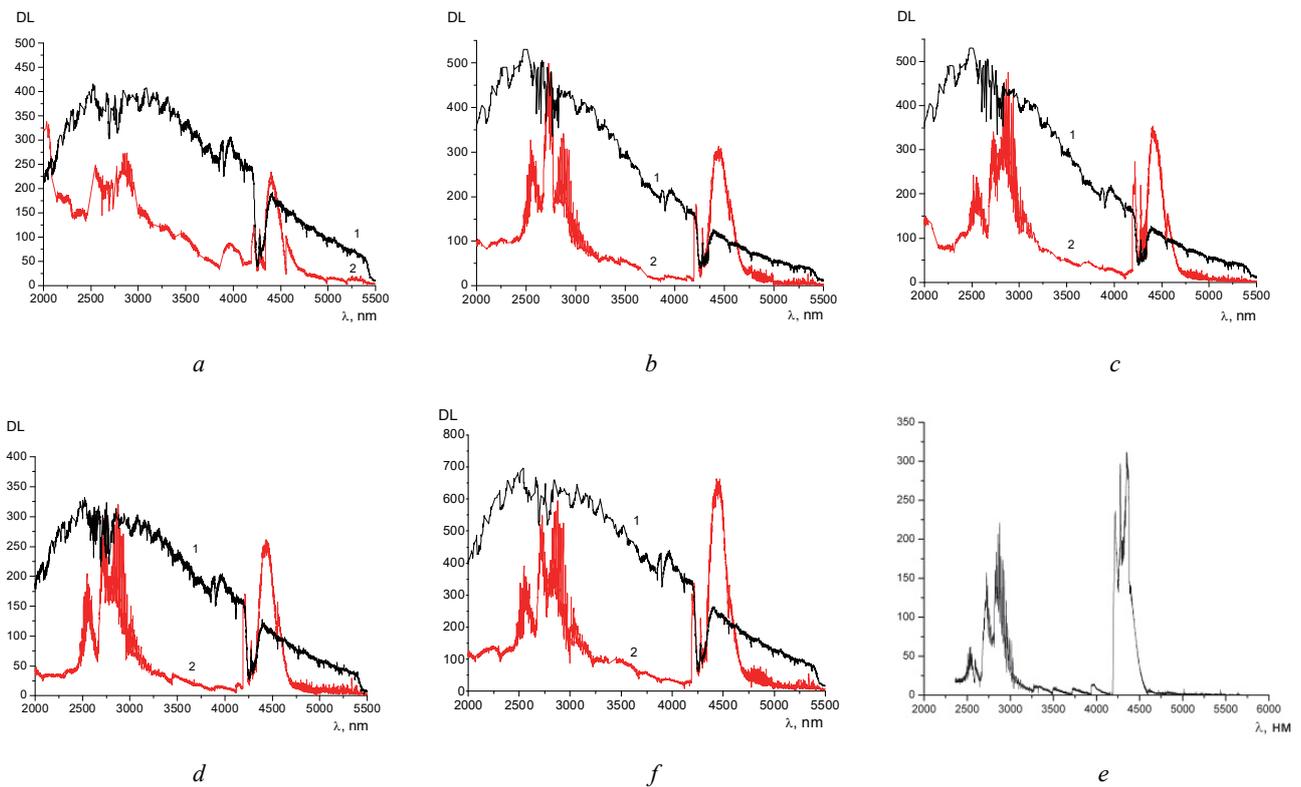
фильтров в средневолновом ИК-диапазоне представляется перспективным подходом для определения полей температуры в пламени.

### Спектр излучения фронта горения

С точки зрения применения ИК-термографии для определения полей температуры во фронте горения следует отдельно рассматривать пламенный режим горения от к-фазного горения. Далее на примере пламенного горения некоторых видов горючих материалов, в том числе – РГМ, и к-фазного горения на примере торфа показано принципиальное различие в

спектральных характеристиках объекта исследования. Наиболее сложной задачей является измерение температуры в пламени.

На рис. 3 приведены осредненные по времени регистрации спектры излучения пламени (кривая 2), образующегося при горении указанных выше горючих материалов, и спектр излучения АЧТ (кривая 1) при температуре, соответствующей максимальной температуре в пламени при горении рассматриваемых горючих материалов. Эти спектры получены при одинаковых условиях и масштабах проведения экспериментов, по оси ординат отложена амплитуда сигнала в уровнях АЦП, а по оси абсцисс значения длин волн.



**Рис. 3.** Спектр излучения АЧТ (кривая 1) и пламени (кривая 2), образующегося при горении: *a* – дизельного топлива; *b* – хвои кедра; *c* – хвои сосны; *d* – древесины сосны; *f* – древесины березы; *e* – спирт [2]

**Fig. 3.** Radiation spectrum of the blackbody (curve 1) and the flame (curve 2) formed during combustion of: *a* – diesel fuel; *b* – cedar needles; *c* – pine needles; *d* – pine wood; *f* – birch wood; *e* – alcohol [2]

Из анализа рис. 3 и состава продуктов горения рассматриваемых горючих материалов можно сделать вывод, что наиболее мощные полосы излучения соответствуют основным продуктам горения – парам воды и углекислому газу. Это наиболее ярко выражено в спектрах излучения для достаточно простых углеводородов на примере спирта, при горении которых другие компоненты, в особенности конденсированные продукты горения, отсутствуют. В случае горения других горючих материалов в спектре излу-

чения пламени присутствует излучение разной интенсивности в диапазоне длин волн 3–4 мкм. Это излучение обусловлено в большей степени излучением конденсированных продуктов горения (сажи и дыма), концентрация которых различна для разных видов горючих материалов. Очевидно, что интенсивность излучения конденсированных продуктов горения в пламени связана с их концентрацией, которая, в свою очередь, зависит от типа горючего материала и полноты сгорания.

Необходимо отметить, что при горении РГМ, представленных в данной работе, в спектре излучения пламени в начале спектрального интервала присутствуют полосы излучения, качественно похожие на части спектров излучения пламени в диапазоне 2,0–2,5 мкм, представленные в работах [3–5], а спектр излучения пламени, образующегося при горении спирта, на рис. 3, *e* качественно практически идентичен спектру, представленному в работе [6], полученному на аналогичном измерительном оборудовании, с отличием в амплитуде измеренного сигнала. Это отличие обусловлено разными режимами горения топлива, которые обеспечивали разное поступление окислителя в зону горения.

При применении методов ИК-термографии для исследования процессов горения необходимо учитывать, что ИК-камеры, представленные в настоящее время на рынке, по рабочему спектральному диапазону делятся в основном на два типа: с рабочим диапазоном 2–5 и 7–12 мкм. Очевидно, что для исследования процессов горения необходимо применять ИК-камеры, позволяющие работать в спектральном интервале 2–5 мкм, так как вторая группа ИК-камер не позволит «увидеть» пламя и может применяться лишь для регистрации экранированных пламенем объектов, таких как горящие дрова или обугленные остатки. Применение же ИК-камер с рабочим спектральным диапазоном 2–5 мкм целесообразно совместно с узкополосными фильтрами, что дает возможность выбрать спектральный интервал для решения конкретной задачи, а в случае решения задачи по определению полей температуры в пламени правильный выбор фильтра обеспечит хорошую детализацию тепловизионного изображения, поправочный эффективный коэффициент излучения, близкий к 1, что позволит уменьшить погрешность измерений. Также следует отметить, что согласно результатам, приведенным в работе [7], необходимо, чтобы технические характеристики ИК-камеры позволяли производить съемку с частотой не менее 40 кадров в секунду, что обусловлено нестационарностью и турбулентными процессами, протекающими в пламени. Способы оценки характеристик турбулентности в пламени при горении РГМ и некоторых видов топлив подробно изложены в работах [8–10].

Кроме того, следует иметь в виду, что ИК-камеры калибруются по излучению АЧТ, и, сравнивая спектр излучения пламени со спектром излучения АЧТ для одной и той же максимальной температуры, можно увидеть, что в диапазоне от 4 до 5 мкм в спектре излучения пламени присутствует излучение, превышающее по интенсивности излучение АЧТ. Из этого следует, что выбор узкого спектрального интервала в

диапазоне 4,0–4,7 мкм нецелесообразен для измерения температуры в пламени, так как в этом случае необходимо учитывать концентрации продуктов горения CO и CO<sub>2</sub> и их вклад в интегральное излучение пламени, ибо в противном случае поправочный эффективный коэффициент излучения пламени будет превышать значение 1.

Для регистрации поля температуры в пламени наиболее предпочтительными являются узкие спектральные интервалы, находящиеся в диапазоне длин волн 2,5–3,0 мкм, так как в этом диапазоне интенсивность излучения пламени не превышает интенсивность излучения АЧТ для соответствующей температуры, причем в этом спектральном интервале находятся достаточно мощные полосы излучения с эффективным коэффициентом излучения, близким к 1. Например, очень удобным на практике является спектральный диапазон 2,5–2,7 мкм, в который попадает излучение паров воды и углекислого газа, образующихся при горении.

Необходимо отдельно обратить внимание, что для корректного определения полей температуры в пламени при проведении исследований необходимо осуществлять подбор эффективного коэффициента излучения пламени по реперным термодарным измерениям, так как коэффициент излучения пламени зависит не только от состава продуктов химических реакций, но и от влагосодержания горючих материалов [1, 7] в случае, если полосы излучения паров воды попадают в рабочий спектральный интервал прибора. Подробно способы определения эффективного коэффициента излучения описаны в работе [1].

В случае если стоит задача регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов или температуры поверхности горючих материалов и при этом не требуется регистрация температуры в пламени, то следует выбирать узкий спектральный интервал, лежащий в диапазоне длин волн 3,3–4,0 мкм, где отсутствуют мощные полосы поглощения и излучения основных продуктов горения и в основном присутствует только излучение конденсированных продуктов горения, интенсивность которого относительно невелика.

Существенно проще представляется задача измерения температуры фронта горения при к-фазном режиме горения. На рис. 4 представлена типичная термограмма тлеющей поверхности торфа, а на рис. 5 показан спектр излучения торфа до границы 5,5 мкм, полученный при помощи спектрографа SOLAR TII MS2001i; в сравнении с расчётной кривой Планка. При сравнении этих кривых видно, что спектр излучения торфа близок к спектру абсолютно черного тела, провалы на огибающей спектра торфа и АЧТ вызваны наличием свободного углекислого газа в атмосфере.



Рис. 4. Термограмма тлеющей поверхности торфа [1]

Fig. 4. Thermogram of the smoldering peat surface [1]

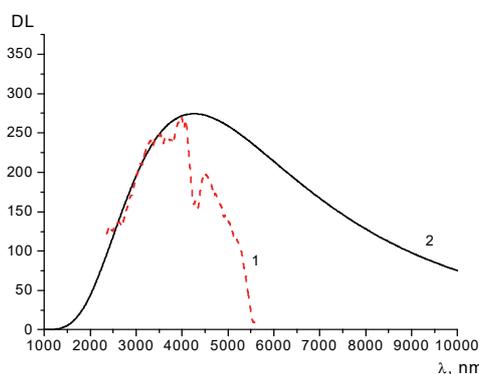


Рис. 5. Спектр излучения тлеющей поверхности торфа (кривая 1) и расчетный спектр излучения АЧТ (кривая 2) [1]

Fig. 5. Radiation spectrum of the smoldering surface of peat (curve 1) and the calculated radiation spectrum of the black body (curve 2) [1]

Учитывая сходство спектра излучения торфа со спектром АЧТ, для определения эффективного коэффициента излучения  $\epsilon$  использовался следующий метод: для максимального значения температуры, полученного термопарой, подбиралась область на поверхности образца в непосредственной близости от термопары, затем по гистограмме выбиралась наиболее часто встречаемая температура в этой области и при помощи программного обеспечения, которым укомплектована ИК-камера, находили коэффициент излучения для наилучшего согласования значений температуры. В результате были получены значения  $\epsilon [2,5-2,7 \text{ мкм}] = 0,95 \pm 0,01$ .

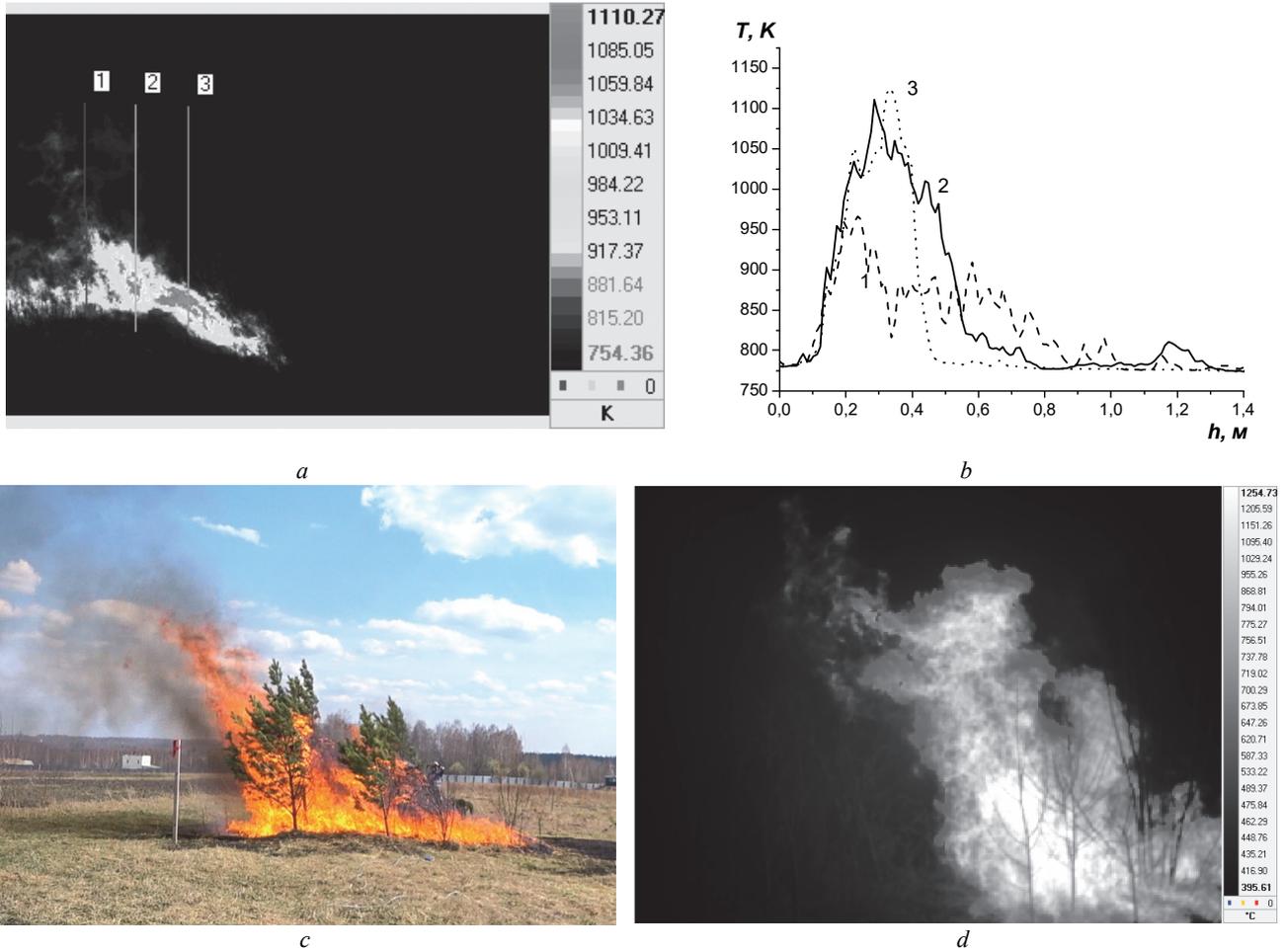
#### Опыт применения ИК-термографии при исследовании природных пожаров в полунатурных условиях

С 2009 по 2023 г. коллективом кафедры физической и вычислительной механики проводились исследования различных типов пожаров (степной, верховой, торфяной) в полигонных условиях на Базовом экспериментальном комплексе ИОА СО РАН (оборудование

ЦКП «Атмосфера»). На рис. 6 представлены типичные термограммы степного пожара и профили температуры в пламени, изображения и термограммы верхового пожара.

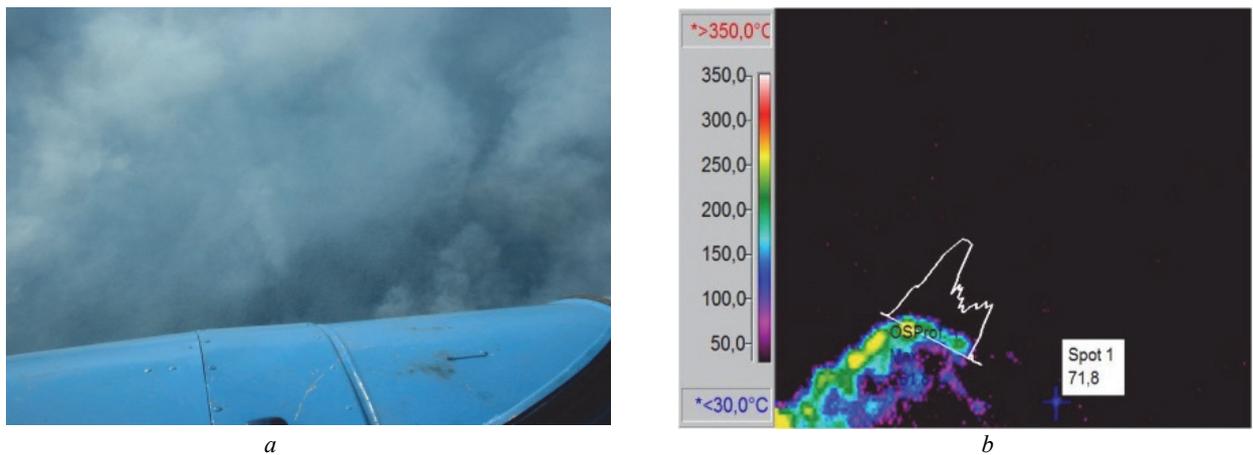
В результате проведенных экспериментов с помощью методов ИК-термографии определены поля температуры в пламени, скорость и динамика распространения фронта пожара, особенности его воздействия на постройки и ограждения, получены характеристики турбулентности в пламени (определены характерные масштабы турбулентности и частоты пульсации температуры).

Следует отметить, что в диапазоне 8–12 мкм наличие дыма или дымовой завесы слабо влияет на регистрацию и наблюдение нагретых объектов (рис. 7). Поэтому применение этого спектрального интервала в ИК-камерах, установленных на борту летательных аппаратов, позволяет пилотам Авиалесоохраны наблюдать кромку пожара сквозь густой дым и принимать правильное решение о высадке пожарного десанта за кромку для тушения пожара или локального применения средств тушения.



**Рис. 6.** Термограмма фронта степного пожара (а); профили температуры (b) во фронте степного пожара, образованного от точечного источника зажигания: 1, 2 и 3 – соответствуют сечению 1, 2 и 3 на рис. 6, а; фотография модельного верхового пожара (с); термограмма фронта верхового пожара (d)

**Fig. 6.** Thermogram of the front of a steppe fire (a); temperature profiles (b) in the front of a steppe fire formed from a point ignition source: 1, 2 and 3 – correspond to section 1, 2 and 3 in Fig. 6, a; photograph of a model crown fire (c); thermogram of the crown fire front (d)



**Рис. 7.** Фотография в видимом диапазоне (а) и термограмма кромки пожара (b) с борта вертолета над очагом лесного пожара [1]

**Fig. 7.** Photography in the visible range (a) and a thermogram of the fire edge (b) from a helicopter above a forest fire [1]

Пространственное разрешение инфракрасного изображения пламени обеспечивается форматом фотоприёмной матрицы, например, размер матрицы 320×240 пикселей уже обеспечивает неплохое качество. При наблюдении очагов горения на больших дистанциях следует применять сменные объективы с узким полем зрения (телевики) и матрицы больших размеров, например 640×512. Хотя такого детального разрешения объектов, какое мы привыкли наблюдать в видимом диапазоне, в инфракрасном диапазоне невозможно получить в силу дифракционного ограничения, так как длина волны в ИК-диапазоне примерно в 10 раз больше, чем в видимой части спектра.

### Заключение

Резюмируя вышенаписанное, можно утверждать, что применение методов скоростной ИК-термографии для исследования природных пожаров и разнообразных процессов горения представляется перспективным, но сопряжено с рядом фундаментальных проблем. Исследование полей температуры во фронте к-фазного горения является наиболее простой задачей, которая может решаться как с помощью приборов средневолнового, так и длинноволнового диапазонов. При исследовании пламенного горения необходимо учитывать оптические характеристики пламени, которые могут существенно зависеть от типа горючих материалов, их влагосодержания, полноты сгорания, выбора спектрального интервала исследования и пр.

При исследовании полей температуры и структуры пламени при изучении природных пожаров следует учитывать следующие рекомендации:

1. Для исследования полей температуры и структуры пламени необходимо применять скоростные ИК-камеры «научного класса» средневолнового диапазона с возможностью применения набора узкополосных оптических фильтров, объективов и за счёт применения опции «Multi IT» («сшивки кадров») расширять диапазон измерения температур, выбирая оптимальную скорость записи.

2. Необходимо применять узкополосные оптические фильтры средневолнового ИК-диапазона с полосой пропускания, лежащей в интервале длин волн 2,5–3,3 мкм (2,5–2,7 мкм – рекомендуемый спектральный интервал), где присутствует мощное излучение паров воды и углекислого газа и отсутствует влияние газоконденсированной фазы.

3. Не рекомендуется использовать спектральный интервал от 4 до 5 мкм в силу того, что интенсивность излучения на этих длинах волн СО и СО<sub>2</sub> превышает интенсивность излучения АЧТ, по излучению которого калибруются приборы, что может привести к нефизичным значениям эффективного коэффициента излучения (больше 1).

Применение ИК-камер на борту летательного аппарата позволяет при сильном задымлении хорошо идентифицировать движение передней кромки пожара, что обеспечит безопасность и точность высадки десанта Авиалесоохраны и сброс воды для локализации пожара.

### Список источников

1. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Применение термографии при исследовании процессов горения. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2016. 80 с.
2. Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.
3. Acem Z., Parent G., Monod B. et al. Experimental study in the infrared of the radiative properties of pine needles // Experimental Thermal and Fluid Science. 2010. № 34. P. 893–899.
4. Agueda A., Pastor E., Perez Y. et al. Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels // International Journal of Thermal Science. 2010. № 49. P. 543–554.
5. Boulet P., Parent G., Acem Z. et al. On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires // Fire Safety Journal. 2011. Vol. 46 (1–2). P. 21–26.
6. Ситнов С.А., Мохов И.И., Джола А.В. Влияние сибирских пожаров на содержание монооксида углерода в атмосфере над европейской частью России летом 2016 г. // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 2. С. 146–152. doi: 10.15372/AOO20170207
7. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов при различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры // Оптика атмосферы и океана. 2011. № 11. С. 1002–1004.
8. Loboda E.L., Matvienko O.V., Vavilov V.P., Reyno V.V. Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale // Infrared Phys. Technol. 2015. Vol. 72. P. 1–7. doi: 10.1016/j.infrared.2015.07.001
9. Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kop'ev E.P., Shadrin E.I., Rejno V.V., Vavilov V.P., Lucenko A.V. Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV // Infrared Physics and Technology. 2018. Vol. 92. P. 240–243. doi: 10.1016/j.infrared.2018.06.006
10. Loboda E.L., Matvienko O.V., Agafontsev M.V., Reyno V.V., Vavilov V.P. IR thermography study of flow structure and parameters in diffusion flames // Infrared Physics and Technology. 2021. Vol. 117. P. 1–11. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103851

## References

1. Loboda, E.L., Reino, V.V. & Agafontsev, M.V. (2016) *Primenenie termografii pri issledovanii protsessov goreniia* [Application of thermography in the study of combustion processes]. Tomsk : Tomsk University Press.
2. Loboda, E.L., Reyno, V.V. & Agafontsev, M.V. (2015) Choice of a Spectral Range for Measuring Temperature Fields in a Flame and Recording High-temperature Objects Screened by the Flame Using IR Diagnostic Methods. *Russian Physics Journal*. 2. pp. 278–282. doi: 10.1007/s11182-015-0493-x
3. Acem, Z., Parent, G., Monod, B. & et al. (2010) Experimental study in the infrared of the radiative properties of pine needles. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 34. pp. 893–899.
4. Agueda, A., Pastor, E., Perez, Y. & et al. (2010) Experimental study of the emissivity of flames resulting from the combustion of forest fuels. *International Journal of Thermal Science*. 49. pp. 543–554.
5. Boulet, P., Parent, G., Acem, Z. & et al. (2011) On the emission of radiation by flames and corresponding absorption by vegetation in forest fires. *Fire Safety Journal*. 46 (1–2). pp. 21–26.
6. Sitnov, S.A., Mokhov, I.I. & Dzhola, A.V. (2016) Impact of Siberian wildfires on the content of carbon monoxide in the atmosphere over European Russia in summer 2016. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 30 (2). pp. 146–152. doi: 10.15372/AOO20170207
7. Loboda, E.L. & Reino, V.V. (2011) The influence of flame emissivity on the flame temperatures by IR-methods at the burning of forest and steppe fuels at various moistures. The frequency analysis of temperature change in a flame. *Optika Atmosfery i Okeana*. 24(11). pp. 1002–1004. (In Russian).
8. Loboda, E.L., Matvienko, O.V., Vavilov, V.P. & Reyno, V.V. (2015) Infrared thermographic evaluation of flame turbulence scale. *Infrared Physics & Technology*. 72. pp. 1–7. doi: 10.1016/j.infrared.2015.07.001
9. Loboda, E.L., Anufriev, I.S., Agafontsev, M.V., Kop'ev, E.P., Shadrin, E.I., Rejno, V.V., Vavilov, V.P. & Lucenko, A.V. (2018) Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV. *Infrared Physics and Technology*. 92. pp. 240–243. doi: 10.1016/j.infrared.2018.06.006
10. Loboda, E.L., Matvienko, O.V., Agafontsev, M.V., Reyno, V.V. & Vavilov, V.P. (2021) IR thermography study of flow structure and parameters in diffusion flames. *Infrared Physics and Technology*. 117. pp. 1–11. doi: 10.1016/j.infrared.2021.103851

### Информация об авторах:

**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

**Рейно Владимир Владимирович** – старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (Томск, Россия). E-mail: reyno@iao.ru

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

### Information about the authors:

**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

**Reyno Vladimir V.**, Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: reyno@iao.ru

*The authors 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*