

Р.Ш. Цвык

**ИК-спектры излучения пламени при горении опада кедра***Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 4.05.2007 г.

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований спектров пламени при горении опада кедра в диапазоне 1,5–5 мкм. Спектр излучения пламени имеет значительные максимумы в полосах поглощения (излучения) углекислого газа  $\text{CO}_2$  и паров воды  $\text{H}_2\text{O}$ . Большинство линий излучения идентифицировать не удается, так как их источниками могут быть различные газы, которые генерируются в результате пиролиза и процесса горения.

**Введение**

Известно [1], что сильно задымленное светящееся пламя излучает так же, как абсолютно черное тело (АЧТ). Источником сплошного спектра излучения являются частицы сажи и вовлекаемые в пламя частицы атмосферного аэрозоля. Температура частиц близка к температуре несущего их газа. Основной особенностью излучения пламени без частиц (несветящегося) является селективность, т.е. способность излучать энергию только в определенных полосах электромагнитного спектра.

Общепринятой моделью излучения лесных пожаров [1, 2] является излучение серого тела  $R_c(\lambda, T)$ , Вт/см<sup>2</sup>, с коэффициентом излучения  $\epsilon \approx 0,5$ , которое в общем случае зависит от длины волны:

$$R_c(\lambda, T) = \epsilon(\lambda) R(\lambda, T) = \frac{A_1 \epsilon(\lambda) \lambda^{-5}}{\left( \exp\left(\frac{A_2}{\lambda T \cdot 10^{-4}}\right) - 1 \right)}, \quad (1)$$

где  $R(\lambda, T)$  — излучение абсолютно черного тела, спектр его излучения описывается функцией Планка;  $\lambda$  — длина волны излучения, мкм;  $A_1 = 3,739 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>,  $A_2 = 1,4388$  Вт/см<sup>2</sup> — постоянные коэффициенты;  $T$  — температура тела в кельвинах.

Спектр излучения пламени при горении лесных горючих материалов будет промежуточным, т.е. на фоне сплошного спектра излучения частиц будут наблюдаться максимумы в полосах излучения продуктов пиролиза и горения.

В процессе горения непрерывно образуются аэрозольные частицы, конечные и промежуточные газообразные продукты горения. Состав и пространственное распределение концентрации этих компонентов обычно нельзя определить с достаточной точностью. Задача значительно усложняется, если учесть, что все процессы непрерывно флуктуируют во времени и пространстве. В то же время радиационные и оптические (коэффициенты поглощения и излучения) характеристики пламени

и дымов зависят от распределения химических компонентов, аэрозолей и температуры в зоне пламенного и беспламенного (в тылу фронта пламени) горения. Необходимо учесть также изменение спектров поглощения (излучения) газов при высоких температурах, так как в этих условиях могут появляться новые линии и ослабляться, видоизменяться или исчезать линии, традиционные для обычных температур. Остается открытым вопрос о спектрах излучения и поглощения высокотемпературных газов, образующихся в результате химической реакции.

Сложность и неоднозначность процессов поглощения и излучения, генерации аэрозольных частиц, химических процессов окисления при горении лесных горючих материалов требуют дальнейшего проведения экспериментальных исследований оптических и физических характеристик таких сред. Эта информация необходима для оценки влияния пожаров на атмосферные процессы [4], разработки модели спектрального состава излучения в различных направлениях, которая позволит уточнить математическую модель лесных пожаров и расчеты влияния теплового потока на окружающие горючие материалы и возможность их возгорания [3].

В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований спектров излучения пламени в спектральном диапазоне 1,5–5 мкм.

**Аппаратура и методика измерений**

Исследования проводились на столе-полигоне, размещенном в камере диаметром 10 м, длиной 16 м, оборудованной двумя вентиляционными отверстиями диаметром 600 мм. Условия эксперимента позволяли моделировать низовой лесной пожар при естественной конвекции без ветра. Стол-полигон размером 0,8 на 3,6 м был покрыт 200-мм слоем земли. Навеска из ЛГМ укладывалась равномерно на площади 0,4 × 0,5 м. Фронт пламени двигался к монохроматору, что обеспечивало максимальную интенсивность спектра на выходной

щели монохроматора при прохождении фронта через плоскость резкого изображения.

Измерения спектров излучения проводились модернизированным монохроматором МДР-6У со сменными дифракционными решетками и однократным разложением спектра. Перед входной щелью монохроматора шириной до 1 мм устанавливался диск, который модулировал световой поток с частотой 1100 Гц, и линза из КВг с полосой пропускания  $0,25 \div 20$  мкм, которая формировала на щели изображение зоны измерения. За выходной щелью монохроматора, перед которой разворачивается спектр излучения, установлен фотоприемник ФУО-614-5, чувствительный в области 1–6 мкм. Сигнал с фотоприемника подавался на селективный усилитель, детектировался, оцифровывался 12-разрядным АЦП, вводился и обрабатывался на ЭВМ. Встроенная в монохроматор заводская система обеспечивала время развертки десятки минут. После модернизации монохроматора время развертки спектра составило 6,4 с. Необходимость увеличения скорости развертки диктовалась двумя требованиями. Первое – кратковременностью процесса горения и его пространственно-временными флуктуациями. Второе – движение фронта горения приводит к тому, что исследуемая область находится в области резкого изображения (область максимальной интенсивности на выходе монохроматора) в течение 10–20 с. При калибровке в этой области устанавливалась модель источника излучения АЧТ (стержень из силита – материала, используемого для источников излучения в спектрометрах). Поворот решетки осуществлялся равномерно, обеспечивая линейность развертки спектра с ошибкой не более 3%. Калибровка по длинам волн проводилась по результатам измерения с узкополосными фильтрами и по линиям поглощения атмосферными парами воды ( $H_2O$ ) и углекислого газа ( $CO_2$ ).

Для получения реальных спектров излучения необходимо знать спектральную чувствительность фотоприемника  $S_n(\lambda)$ , спектральный состав излучения АЧТ  $S_u(\lambda)$  и коэффициент передачи монохроматора с конкретной решеткой и используемой оптикой  $S_m(\lambda)$ , коэффициент передачи атмосферы  $S_a(\lambda)$ . Для учета спектрального коэффициента передачи фотоприемной системы, включая коэффициент передачи атмосферного участка трассы  $f(\lambda) = S_n(\lambda)S_m(\lambda)S_u(\lambda)$ , предполагалось, что АЧТ излучает по закону Планка (1). Тогда

$$f(\lambda) = U_n(\lambda)/U_p(\lambda), \quad (2)$$

где  $U_n(\lambda)$  и  $U_p(\lambda)$  – измеренный и расчетный (с точностью до постоянного коэффициента  $A_1$ ) спектры.

Расчет коэффициентов передачи для каждой из решеток позволил откорректировать спектры излучения, включая влияние поглощения атмосферными газами на трассе длиной  $\approx 1$  м между пламенем и фотоприемником монохроматора.

На рис. 1 приведен пример результатов измерения спектрального коэффициента передачи  $f(\lambda)$

при температуре АЧТ 1500 К и спектрального пропускания атмосферы  $T_{np}(\lambda)$ , которое рассчитано с использованием Интернет-информационной системы ИОА СО РАН «Спектроскопия атмосферных газов» (<http://spectra.iao.ru>).

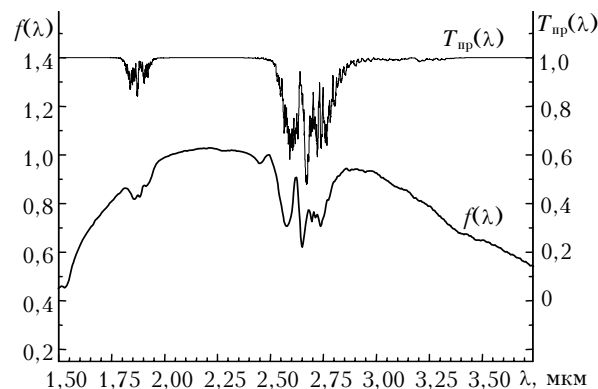


Рис. 1. Измеренный коэффициент передачи  $f(\lambda)$  с решеткой 300 штр./мм и расчетная спектральная зависимость пропускания  $T_{np}(\lambda)$  стандартной атмосферы для летних условий на трассе длиной 1 м

Все дальнейшие расчеты коэффициентов поглощения и излучения выполнены с использованием этой информационной системы и Интернет-информационной системы «Carbon Dioxide Spectroscopic Databank (CDSD)» для расчетов  $CO_2$  при высоких температурах (<http://cdsd.iao.ru/>). Температура АЧТ определялась оптическим пирометром с вольфрамовой нитью и термпарой. Из данных следует, что общая ошибка измерения спектра по амплитуде составляет  $\sim \pm 5\%$ . Ослабление сигнала в области  $1,81 \div 1,95$  и  $2,5 \div 2,8$  мкм обусловлено поглощением атмосферными парами  $H_2O$  и  $CO_2$ , которое является значительным даже на общей длине трассы «источник – приемник» около 1 м.

## Результаты измерений

На рис. 2, а, б приведены примеры спектров излучения пламени в диапазоне 1,5–3,5 мкм (решетка 600 штр./мм) и 2,65–5,5 мкм (решетка 300 штр./мм) при горении опада кедра. На рис. 2, в приведен средний спектр излучения горящего бытового газа при достаточно стабильном горении пламени. По вертикальной оси отложены значения сигнала (мВ), нормированные на коэффициент передачи соответствующей дифракционной решетки. Для сравнения на рисунках приведены расчетные с точностью до постоянного множителя спектры излучения АЧТ с указанием температуры. Отдельные спектры на рис. 2, а, б соответствуют различным участкам фронта горения. По мере приближения фронта пожара к монохроматору растет уровень сигнала.

На рис. 2, г приведены расчетные значения спектрального пропускания стандартной атмосферы  $T_{np}(\lambda)$  при  $T = 300$  К на трассе 1 м, относительные спектральные коэффициенты излучения стандартной атмосферы при  $T = 1000$  К на трассе 0,1 м

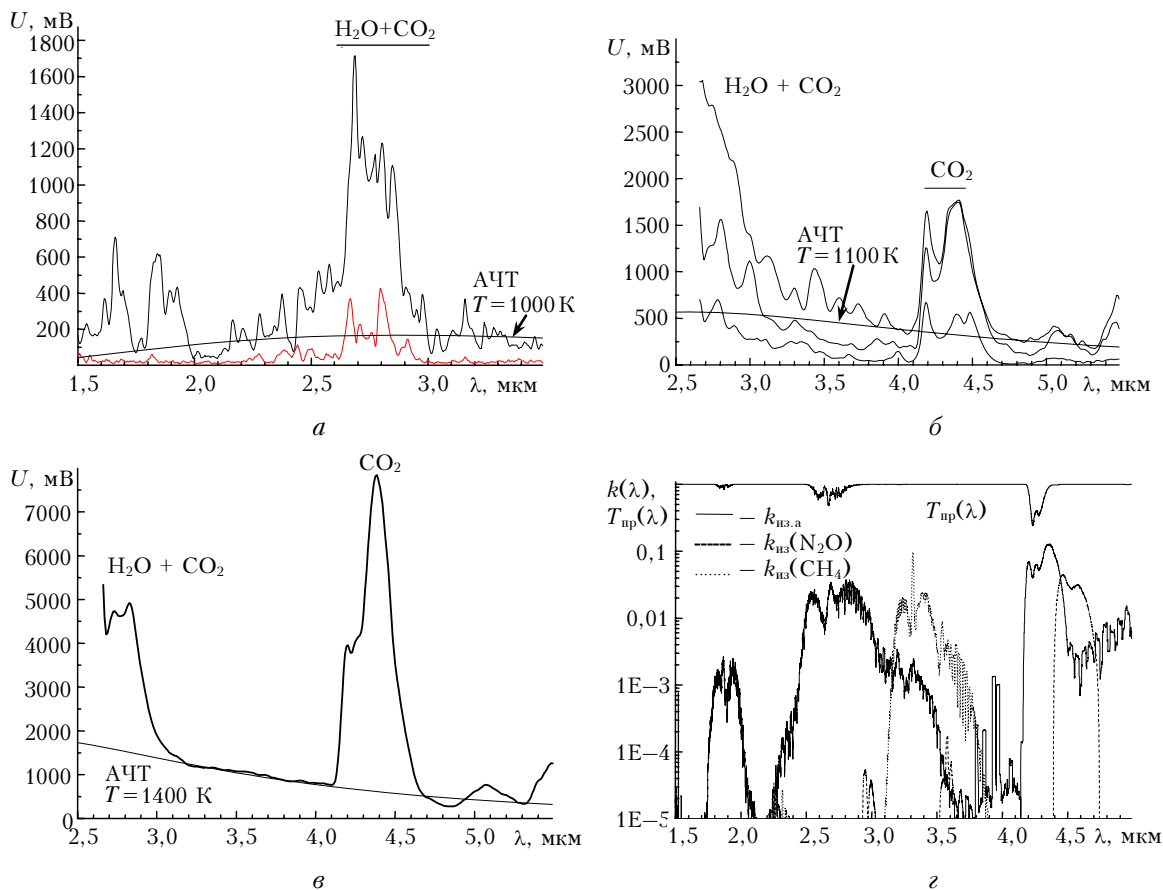


Рис. 2. Спектры излучения: *a, б* – пламени при горении опада кедр; *в* – при горении бытового газа; *г* – расчетное спектральное пропускание стандартной атмосферы  $T_{пр}(\lambda)$ , относительные коэффициенты излучения стандартной атмосферы  $k_{из.а} = k_{из} T_{пр}(\lambda)$  ( $k_{из}$  – коэффициент излучения без учета атмосферы) с учетом коэффициента пропускания внешнего участка атмосферы (вне пламени);  $k_{из}(N_2O)$ ,  $k_{из}(CH_4)$  – коэффициенты излучения компонент  $N_2O$ ,  $CH_4$  при  $T = 300$  К

(толщина фронта горения) с учетом спектрального пропускания атмосферы, закиси азота  $N_2O$  и метана  $CH_4$  при комнатной температуре (данные для высоких температур нами не найдены). Так как концентрации газов неизвестны, то для сближения расчетных спектральных коэффициентов излучения введены постоянные множители.

Из рис. 2, *a, б* и сравнения с расчетными коэффициентами излучения (рис. 2, *г*) видно, что в спектре излучения пламени (на фоне сплошного спектра излучения частиц, по форме близкого к спектру излучения АЧТ) наблюдаются максимумы в полосах излучения продуктов горения. На рис. 2, *a, б* четко идентифицируются полосы излучения основных продуктов горения –  $H_2O$  и  $CO_2$  ( $CO_2$  – полосы с центрами 2,7; 4,3 мкм и  $H_2O$  – полосы 1,87; 2,7 мкм). Амплитуда сигнала в этих максимумах примерно в 5–10 раз больше спектра АЧТ. В первую очередь появляются сильные полосы – 2,7 и 4,3 мкм.

В спектре излучения пламени при горении бытового газа (рис. 2, *в*) не видно значительных полос излучения, кроме  $H_2O$  и  $CO_2$ . При горении опада хвои кедр спектры более сложные. Предполагаемыми газами могут являться: соединения азота  $N_2O$  – сильная полоса 4,4–4,7 мкм и более слабые 3,5–3,65; 3,16–3,24; 2,9–3,1; 2,25–2,3 мкм;  $NO_2$  –

полоса 3,4–3,5 мкм; углеводороды – полоса с центром 3,3 мкм;  $CO$ -полосы излучения 4–4,6 мкм и 4,6–5,0 мкм; радикалы  $OH$ , имеющие большое количество линий излучения от видимого до 4,5 мкм. В обзоре [4] сообщается о том, что в продуктах сжигания травы содержатся  $H_2O$ ,  $CO_2$ , углеводороды, окись азота, метанол, уксусная и муравьиная кислоты, формальдегид и гидроксигетальдегид. Источником горючих газов являются: гемицеллюлоза, содержащая шестиуглеродные –  $C_6H_{10}O_5$  и пятиуглеродные звенья –  $C_5H_8O_4$ , а также целлюлоза – полисахарид типа  $(C_6H_{10}O_5)_n$ . При нагревании они разлагаются на  $CO$ ,  $H_2O$  и  $CH_4$ . В состав лесных материалов также входит лигнин – устойчивое высокомолекулярное соединение, заполняющее межклеточное пространство, строение которого до конца не расшифровано, хлорофилл в опаде деревьев и смолы в хвойных деревьях [3].

На спектрах четко видна полоса поглощения атмосферного  $CO_2$  (центр 4,3 мкм), которая компенсируется при учете коэффициента передачи. Однако в спектре излучения в этой области (рис. 2, *б*, рис. 3, *a*) наблюдается достаточно сильное поглощение. Оно может быть обусловлено объемным распределением концентрации поглощающих газов, в основном  $CO_2$ , которые генерируются

в процессе горения. Причем коэффициенты поглощения и излучения зависят от температуры, распределение которой по направлению движения фронта пожара близко к гауссоиду [6, 7].

В работе [5], в качестве примера, приведена возможность наблюдения спектра излучения пламени через атмосферу в области 4–5 мкм. При этом используется то обстоятельство, что ширина полосы излучения пламени значительно шире полосы поглощения в атмосфере. На рис. 3 приведены результаты аналогичного анализа путем сравнения расчетного пропускания стандартной атмосферы при  $T = 296$  К на трассе 1000 м с расчетным спектральным коэффициентом излучения слоя газа толщиной 0,1 м при  $T = 1000$  К и экспериментальным спектром излучения пламени при горении опада хвои кедра и бытового газа с учетом пропускания на измерительной трассе 1 м. Расчетный и экспериментальный спектры нормированы на максимальное значение.

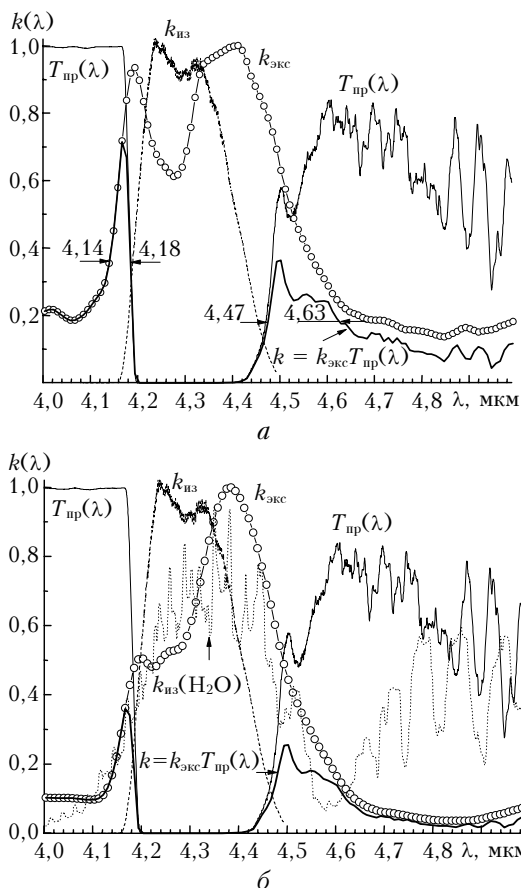


Рис. 3. Спектр пропускания атмосферы в полосе поглощения 4–5 мкм для летней атмосферы на трассе 1000 м –  $T_{пр}(\lambda)$ . Нормированные на максимальное значение: расчетный коэффициент излучения слоя газа при температуре  $T = 1000$  К для  $\text{CO}_2 - k_{из}$  и  $\text{H}_2\text{O} - k_{из}(\text{H}_2\text{O})$ ; экспериментальный спектр излучения пламени при горении опада хвои кедр –  $k_{экc}$  (а), бытового газа (б); ожидаемый экспериментальный спектр излучения пламени на расстоянии 1000 м  $k = k_{экc}T_{пр}(\lambda)$

Отметим, что в наших измерениях экспериментальный спектр излучения пламени значительно

шире расчетного и близок к спектру, приведенному в работе [5]. Так же совпадают спектры излучения после прохождения через атмосферу. Из данных следует, что диапазоны 4,14–4,18 мкм и 4,48–4,63 мкм перспективны для обнаружения пламени опада деревьев. Причем диапазон 4,14–4,18 мкм может быть расширен до 3,5–4,18 мкм с учетом полосы пропускания атмосферы и достаточно интенсивным сплошным спектром излучения пламени. Аналогичные результаты получены при анализе спектра излучения пламени при горении бытового газа. В этом случае экспериментальный спектр уже, чем спектр пламени опада кедр.

Спектр излучения опада кедр (рис. 3, а) на уровне 0,5 шире расчетного на 0,045 мкм в области 4,2 мкм и на 0,2 мкм в области 4,5 мкм. Возможно, что причиной уширения спектра является вклад в излучение других газов, например паров  $\text{H}_2\text{O}$  [полоса излучения на длинах волн более 4 мкм (рис. 3, б)],  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ , имеющих полосу излучения в этой области. Уширение экспериментального спектра может быть связано с тем, что высокая температура  $\text{CO}_2$  обусловлена не просто нагревом газа, а образованием его в результате химической реакции при горении углеводородов и окиси углерода  $\text{CO}$ .

На рис. 4 для области 1,5–3,5 мкм приведены результаты анализа, аналогичного приведенному на рис. 3.

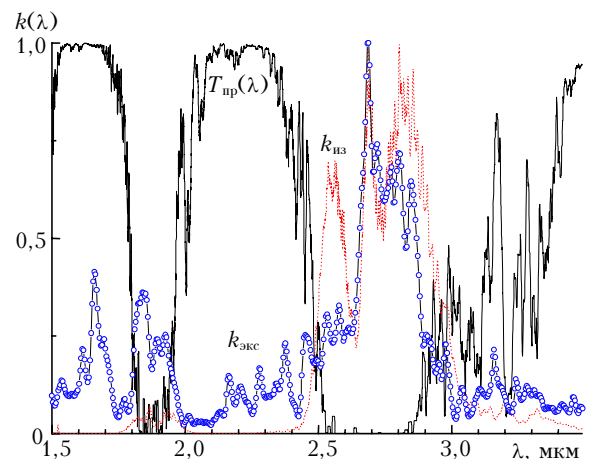


Рис. 4. Спектр пропускания атмосферы  $T_{пр}(\lambda)$  в полосе поглощения 1,5–3,5 мкм для летней атмосферы на трассе 1000 м. Нормированные на максимальное значение: расчетный коэффициент излучения  $k_{из}$  атмосферы при  $T = 1000$  К, экспериментальный спектр излучения  $k_{экc}$  пламени при горении опада хвои кедр

Видно, что экспериментальный спектр уже расчетного в полосе 2,5–3 мкм. В отличие от полосы 4–5 мкм экспериментальный спектр излучения не выходит за пределы полосы поглощения, поэтому регистрация пламени целесообразна в известных и широко используемых полосах пропускания атмосферы: 1,5–1,8; 2–2,5; 3,5–4 мкм.

## Выводы

1. Сложная структура спектра излучения пламени при горении лесных материалов обусловлена термохимическими процессами, в результате которых

основным источником излучения являются продукты горения ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Источниками дополнительных линий в спектре излучения пламени могут быть различные соединения азота, углеводородов, радикалы и др.

2. В ИК-области в спектре пламени удается идентифицировать полосы излучения углекислого газа  $\text{CO}_2$  (полосы в области 4,3; 2,7 мкм) и паров воды  $\text{H}_2\text{O}$  (в области 1,9; 2,7 мкм). В области 4–5 мкм ширина полосы излучения превышает расчетный спектр излучения при  $T = 1000$  К и ширину полосы поглощения атмосферы. На экспериментальных спектрах излучения АЧТ четко видна полоса поглощения атмосферного  $\text{CO}_2$  на длине волны 4,3 мкм (аналогично данным рис. 1), которая компенсируется при учете коэффициента передачи на атмосферном участке трассы. Однако достаточно сильное поглощение в спектре излучения в этой области остается (рис. 2, б – провал в центре на длине волны поглощения  $\text{CO}_2$  – 4,3 мкм), которое, по-видимому, обусловлено поглощением  $\text{CO}_2$ , генерируемым в объеме пламени в результате процесса горения.

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.
2. Мирзоева Л.А., Камешков Г.Б., Лустберг Э.Л., Маковцев Г.А., Захаренков Г.В.. Космическая опико-электронная аппаратура обнаружения очагов лесных пожаров // Оптический журнал. 1992. № 8. С. 17–21.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые методы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 406 с.
4. Кондратьев К.Я., Исидоров В.А. Воздействие сжигания биомассы на химический состав атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 106–115.
5. Госсорг Ж. Инфракрасная томография. М.: Мир, 1988. 400 с.
6. Гришин А.М., Цвык Р.Ш. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния радиационного и комбинированного теплообмена на возникновение и распространение низовых, лесных пожаров // Тр. V Минского междунар. форума по тепло- и массообмену, 2004. Минск, 2004. Т. 1. С. 170–172.
7. Grishin A.M., Tsvyk R.Sh. Experimental and Theoretical Study of Impact of Radiation and Combined Heat Exchange on Appearance and Propagation of Surface Forest Fires // J. Heat Transfer Res. 2005. V. 36. N 7. P. 529–542.

***R.Sh. Tsvyk. IR radiation spectra from falling and burning cedar needles.***

The experimental results of studying the flame spectra (1,5–5  $\mu\text{m}$ ) of burning cedar needle fall are presented. The spectrum of flame radiation has significant maxima in absorption (radiation) bands of  $\text{CO}_2$  and  $\text{H}_2\text{O}$ . Most radiation lines cannot be identified, because different gases, generated during burning and pyrolysis, can be their sources.