

УДК 536.46:533.6

Экспериментальное исследование глубины фронта горения торфа ИК-методами

Е.Л. Лобода*

*Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36*

Поступила в редакцию 30.11.2011 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований по определению глубины фронта горения слоя торфа. В качестве образцов исследовались четыре типа торфа с различным ботаническим составом, плотностью, степенью разложения и влагосодержанием. Определены глубина фронта горения торфа и профили температуры.

Ключевые слова: торф, фронт горения, температура, ИК-измерения; peat, fire front, temperature, IR-measuring.

Торфяные пожары являются довольно распространенным природным явлением, которое наносит значительный вред окружающей среде и деятельности человека. Одним из наиболее ярких примеров негативного воздействия торфяных пожаров служат пожары летом 2010 г. в средней полосе России. Тушение торфяных пожаров является достаточно трудоемкой и сложной задачей. В этой связи необходимо своевременное прогнозирование возникновения и распространения торфяного пожара. Для их прогнозирования используются математические модели, например [1]. Для проверки достоверности полученных результатов математического моделирования необходимо проводить сравнение с экспериментальными данными.

Важными характеристиками горения слоя торфа являются глубина фронта горения и профили температуры в нем. Работы по экспериментальному исследованию горения торфа проводятся учеными различных стран мира [2–4], однако данные о распределении температуры во фронте разнятся и, как правило, указывается лишь диапазон изменения температуры. Конкретных значений глубины фронта горения и профилей температур в нем найти не удалось. Также в литературе отсутствует единое мнение о величине температуры на передней кромке фронта торфяного пожара, под которым понимается зона, где происходит горение вещества. Например, в работе [1] используется величина температуры 650 К для определения передней кромки фронта торфяного пожара, указанная в [2]. В работах [3, 4] приводится диапазон изменения температуры внутри фронта горения. При этом в работе [4] говорится, что по мере продвижения фронта горения температуры изменяются от 683 до 873 К.

Если же следовать логике [5], то фронт пожара находится между изотермами 780 К. Следует сразу же оговориться, что в работе [5] речь идет о лесном пожаре, где имеет место совсем иной механизм горения. Поэтому для определения глубины фронта горения торфа необходимо определить температуру передней кромки фронта горения.

Методика проведения эксперимента

Для исследований использовались образцы торфа из различных болот Томской области, в том числе входящих в известную систему Васюганских болот. Ботанический состав образцов, глубина залегания h , степень разложения R и зольность z приведены в табл. 1.

Необходимо отметить, что образцы 1 и 2 различаются глубиной залегания, плотностью ρ и практически не отличаются ботаническим составом.

Образцы торфа предварительно подвергали сушке в сушильном шкафу ШСП-0,5-200 при температуре 373 К для достижения влагосодержания, при котором проводились эксперименты. Образцы вырезали различного размера от $0,03 \times 0,03 \times 0,03$ м до $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ м с сохранением его первоначальной структуры, которые после этого укладывали в термоизолированный кожух. Зажигание производили нагретой пластиной равномерно по всей плоскости. В одной серии экспериментов зажигание начинали с верхней стороны образца, а в другой — с боковой стороны.

Плотность образцов приближалась к естественной и варьировалась в пределах $\rho = 20,4 - 690$ кг/м³. Массу образцов определяли с помощью электронных весов AND HL-400 с точностью 0,1 г, влагосодержание — анализатором влажности AND MX-50

* Егор Леонидович Лобода (loboda@mail.tsu.ru).

Ботанический состав и характеристики образцов торфа

№ образца	Тип торфа	h, м	Состав растительных остатков	Содержание, %	R, %	z, %	ρ, кг/м ³						
1	Сфагновый верховой (фускум-торф)	0–0,1	Сфагнум бурый (<i>Sphagnum fuscum</i>)	90	5	3,1	20,4						
			Сфагнум магелланский (<i>Sphagnum magellanicum</i>)	5									
			Сфагнум узколистый (<i>Sphagnum angustifolium</i>)	+									
			Кустарнички (<i>Shrubs</i>)	5									
			Клюква мелкоплодная (<i>Oxycoccus microcarpus</i>)	+									
			Хамедафне обыкновенная (<i>Chamaedaphne calyculata</i>)	+									
			Сосна обыкновенная (<i>Pinus sylvestris</i>)	+									
			2	Сфагновый верховой (магелланикум-торф)				0,1–0,3	Сфагнум бурый (<i>Sphagnum fuscum</i>)	15	5	3,1	156,25
									Сфагнум магелланский (<i>Sphagnum magellanicum</i>)	85			
Кустарнички (<i>Shrubs</i>)	+												
Клюква мелкоплодная (<i>Oxycoccus microcarpus</i>)	+												
Хамедафне обыкновенная (<i>Chamaedaphne calyculata</i>)	+												
Багульник болотный (<i>Ledum palustre</i>)	+												
Пушица влагалищная (<i>Eriophorum vaginatum</i>)	+												
3	Низинный	0–0,4			Гипновые мхи (<i>Bryales</i>):	10	45		10,1	690			
					Дрепанокладус крючковидный (<i>Drepanocladus aduncus</i>)	45							
			Дрепанокладус Зендтнера (<i>Drepanocladus sendtneri</i>)	5									
			Бриум (<i>Bryum sp.</i>)	+									
			Осока (<i>Carex sp.</i>)	10									
			Осока двухтычинковая (<i>Carex diandra</i>)	15									
			Осока ситничек (<i>Carex juncella</i>)	+									
			Осока волосистоплодная (<i>Carex lasiocarpa</i>)	+									
			Вахта трехлистная (<i>Menyanthes trifoliata</i>)	15									
			Хвощ топяной (<i>Equisetum fluviatile</i>)	+									
			Береза пушистая (<i>Betula pubescens</i>)	+									
			4	Травяно-сфагновый переходный	0–0,35	Кора и древесина сосны (<i>Cortice et pinus lignum</i>)		25			35	7,5	152,8
						Кора и древесина березы (<i>Cortice et lingo betula</i>)		5					
Кора карликовой березки (<i>Cortice et betula nana</i>)	10												
Пушица (<i>Eriophorum</i>)	30												
Осока волосистоплодная (<i>Carex lasiocarpa</i>)	10												
Хвощ (<i>Equisetum</i>)	5												
Сфагнум магелланский (<i>Sphagnum magellanicum</i>)	10												
Сфагнум центральный (<i>Sphagnum centrale</i>)	5												

№ образца	Тип торфа	h, м	Состав растительных остатков	Содержание, %	R, %	z, %	ρ, кг/м ³
5	Шейхцериово-сфагновый переходный	0,4–0,5	Сфагнум балтийский (<i>Sphagnum balticum</i>)	65	10,5	3,33	121,4
			Сфагнум узколистный (<i>Sphagnum angustifolium</i>)	10			
			Пушица (<i>Eriophorum</i>)	10			
			Шейхцерия (<i>Scheuchzeria</i>)	5			
			Корешки вересковых кустарников	5			
			Клюква (<i>Oxycoccus palustris</i>)	5			
			Древесина сосны и березы (<i>Lignum pinus et betulis</i>)	единичное			
			Осока носиковая (<i>Carex rostrata</i>)	единичное			

Примечание. «+» — обилие вида меньше 5%; sp. — определение точной видовой принадлежности невозможно.

с точностью 0,01%. Влагосодержание исследуемых образцов варьировалось в пределах $w = 0,7–17,3\%$. Температуру воздуха, относительную влажность и атмосферное давление контролировали при помощи метеостанции Meteoscan RST01923. Температура воздуха T_e варьировалась в пределах 288–293 К. Относительная влажность воздуха ϕ изменялась в пределах 20–35%, атмосферное давление $P_e = 9,94 \cdot 10^4 – 1,02 \cdot 10^5$ Па.

Суммарные относительные погрешности определения параметров не превышали для влагосодержания $\delta w/w \cdot 100\% \leq 3,3\%$, для массы $\delta m/m \cdot 100\% \leq 1,2\%$, атмосферного давления $\delta P_e/P_e \cdot 100\% \leq 6,0\%$, температуры воздуха $\delta T/T \cdot 100\% \leq 5,3\%$, относительной влажности воздуха $\delta \phi/\phi \cdot 100\% \leq 2,5\%$ и времени $\delta t/t \cdot 100\% \leq 4,3\%$.

После зажигания образец выдерживался в течение 10–35 мин в зависимости от скорости распространения фронта горения и приближения его к стороне образца, противоположной стороне, где производилось зажигание. Затем образец разрезали при помощи остро отточенного лезвия. Этот подход обусловлен тем, что, имея малую скорость распространения фронта горения порядка $5 \cdot 10^{-6}$ м/с [2] за время разрезания и раскладывания образцов, которое не превышало 20 с, фронт горения не мог переместиться на расстояние, превышающее погрешность измерений.

Распределение температуры на срезе образцов регистрировали при помощи тепловизора JADE J530SB с узкополосным дисперсионным оптическим фильтром F0616 со спектральным интервалом 2,5–2,7 мкм, позволяющим измерять температуру в диапазоне 583–1773 К с погрешностью измерений, не превышающей 1%. При измерениях использовали калибровки завода-изготовителя для выбранного типа объектива и фильтра. Съемку производили с дистанции 1 м с фокусным расстоянием объектива $F = 50$ мм, а матрица тепловизора имела разрешение 320×240 пикселей. При такой геометрии эксперимента и выбранных оптических характеристиках тепловизора пространственное разрешение было значительно меньше 1 мм, а программное обеспечение тепловизора позволяет с точностью до 1 мм определять размеры исследуемого объекта.

При всех температурных измерениях при помощи тепловизора использовался коэффициент излучения $\epsilon = 0,96$, который был предварительно определен для всех образцов торфа с использованием реперных термпар по методике, аналогичной описанной в [6], имел незначительные различия и изменялся в пределах 0,95'0,96.

Результаты экспериментальных исследований

На рис. 1 представлены термограмма разреза образца № 1 (рис. 1, а) и профиль температуры (рис. 1, б) в сечении 1, отмеченном на рис. 1, а, при условии зажигания образца сверху. А на рис. 2 даны термограмма разрезов образца № 5 и профили температуры в сечениях 1–3 (рис. 2, а), соответственно, при условии зажигания образца сверху. Также на рис. 1, б и 2, б изображены изотермы 650, 680 и 780 К (прямые линии).

На рис. 3 приведены термограмма и профили температуры для разрезов образца торфа № 5, когда зажигание образца производилось сбоку. На рис. 2, б, рис. 3, б и 1, б наблюдается перегиб температурных кривых в районе изотерм 650 и 680 К, который можно объяснить тем, что в этом месте происходит смена процесса пиролиза торфа на его горение. В подавляющем большинстве экспериментов этот перегиб находится в диапазоне температур (680 ± 25) К, поэтому в дальнейшем для определения глубины фронта горения торфа использовался подход [5], в котором глубина фронта лесного пожара определяется как расстояние между изотермами 780 К, только для торфа следует брать изотерму 680 К.

В табл. 2 приведены результаты экспериментов по определению глубины фронта горения торфа при зажигании образцов сверху.

Следует отметить, что в горизонтальном направлении распространения фронта горения его глубина больше, чем при вертикальном распространении. Это обусловлено возможностью поступления окислителя в зону горения с двух сторон: сверху и со стороны движения фронта. Благодаря

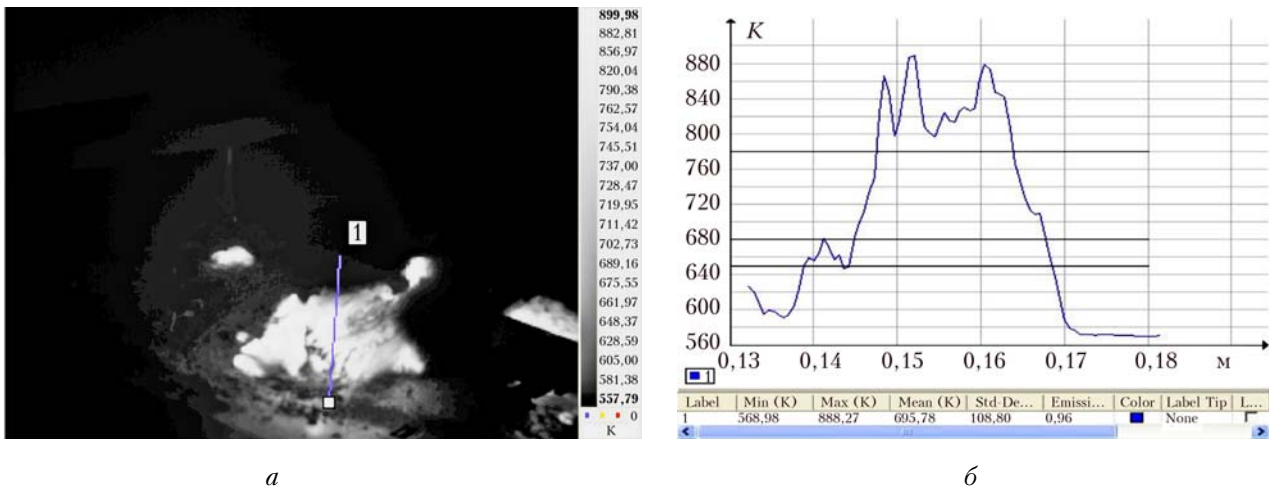


Рис. 1. Термограмма (а) и профиль температуры (б) в сечении 1 для образца торфа № 1 размерами 0,14 × 0,1 × 0,11 м с $w = 6,4\%$, $\rho = 20,4 \text{ кг/м}^3$ при $\epsilon = 0,96$. Зажигание образца производилось сверху

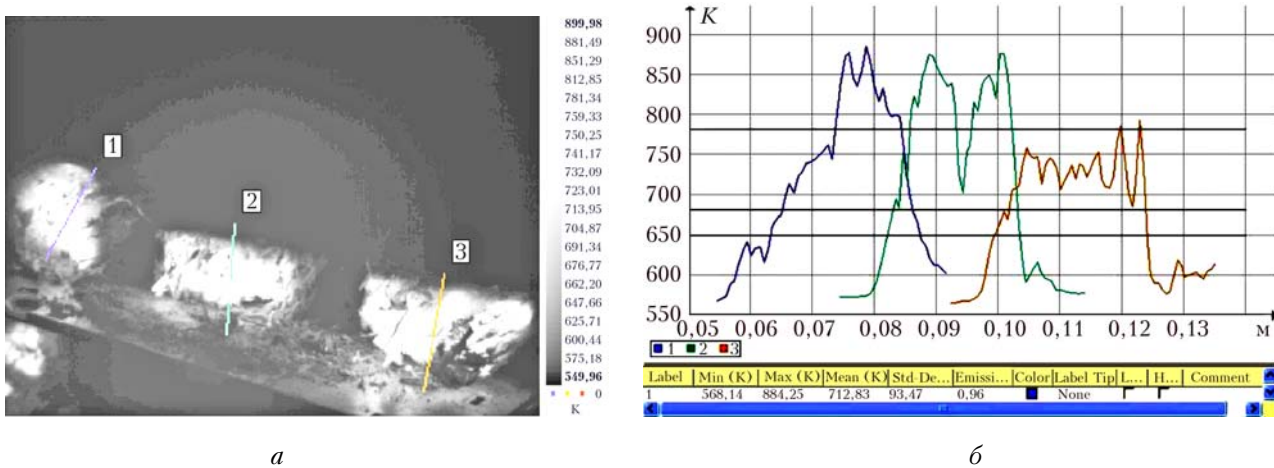


Рис. 2. Термограмма (а) и профили температуры (б) в сечениях 1–3 для образца торфа № 5 размерами 0,08 × 0,08 × 0,06 м с $w = 13,1\%$, $\rho = 121,4 \text{ кг/м}^3$ при $\epsilon = 0,96$. Зажигание образца производилось сверху

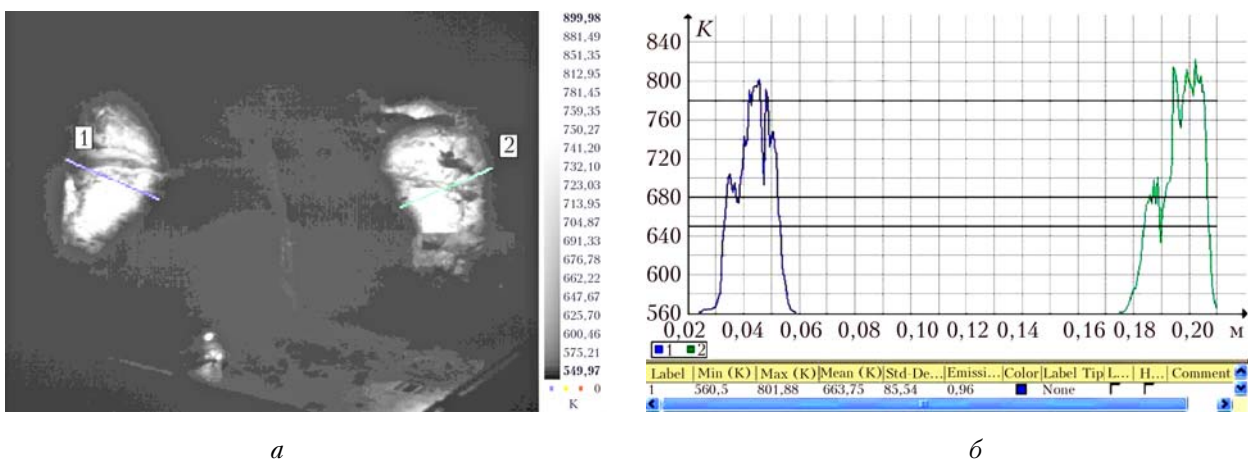


Рис. 3. Термограмма (а) и профили температуры (б) в сечениях 1–2 для образца торфа № 5 размерами 0,08 × 0,08 × 0,06 м с $w = 13,1\%$, $\rho = 121,4 \text{ кг/м}^3$ при $\epsilon = 0,96$. Зажигание образца производилось сбоку

Результаты экспериментального определения глубины фронта горения торфа

№ образца	w , %	Глубина фронта горения, мм	Зажигание	№ образца	w , %	Глубина фронта горения, мм	Зажигание
1	7	25 ± 3	сверху	3	2,6	12 ± 2	сверху
1	7	27 ± 3	сбоку	3	2,6	13 ± 2	сбоку
1	6,4	24 ± 3	сверху	4	13,1	23 ± 2	сверху
1	6,4	27 ± 2	сбоку	4	13,1	26 ± 2	сбоку
2	6,4	14 ± 2	сверху	4	17,3	18 ± 1	сверху
2	6,4	16 ± 3	сбоку	4	17,3	21 ± 2	сбоку
2	0,7	14 ± 2	сверху	5	13,1	20 ± 1	сверху
2	0,7	16 ± 3	сбоку	5	13,1	24 ± 2	сбоку

этому скорость распространения торфяного пожара по поверхности выше, чем в вертикальном направлении, что отмечено в работе [7]. Различие этих величин не превышает 20%. Однако с ростом плотности образца различие между глубиной фронта горения в разных направлениях его распространения уменьшается, так как уменьшается пористость образца и, соответственно, снижается коэффициент фильтрации, в результате чего ухудшается доступ окислителя к фронту горения.

Кроме того, было определено, что размеры образцов, изменявшиеся в диапазоне от $0,03 \times 0,03 \times 0,03$ до $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ м, на глубину фронта горения и температуру во фронте горения не влияют. Также не оказывает существенного влияния и влагосодержание торфа в диапазоне $w = 0,7'17,3\%$.

Важным фактором, влияющим на глубину фронта горения, являются плотность торфа и степень его разложения. Например, образцы № 1 и 2 практически не различаются ботаническим составом и взяты в одном и том же месте. Их существенное различие заключается в разной плотности. При этом у образца № 2 глубина фронта горения меньше, чем у образца № 1. В случае с низинным торфом (образец № 3) при увеличении плотности в несколько раз в сравнении с образцами вершинного торфа (образцы № 1, 2, 4, 5) глубина фронта горения близка к глубине фронта горения вершинного торфа образца № 2 при $\rho = 156,25 \text{ кг/м}^3$.

* * *

В результате экспериментов обнаружено следующее:

1. Глубина фронта горения торфа изменяется в пределах 10–28 мм.
2. Глубина фронта горения торфа зависит от типа торфа, степени его разложения и плотности.
3. Глубина фронта горения торфа слабо зависит от изменения влагосодержания, изменяющегося

в диапазоне $w = 2,6'17,3\%$, и не зависит от размеров образца в диапазоне от $0,03 \times 0,03 \times 0,03$ до $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ м.

4. Местоположение передней кромки фронта горения торфа следует определять по изотерме (680 ± 25) К.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 11-01-00673-а, 10-01-91054-НЦНИ-а, 12-01-00142-а, НОЦ-г/к № 02.740.11.0674.

1. Гришин А.М., Якимов А.С. Математическое моделирование теплофизических процессов при заживании и тлении торфа // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 151–167.
2. Борисов А.А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. Экспериментальные исследования и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров / Под ред. В.Е. Накорякова. Новосибирск: Наука, 1984. С. 5–12.
3. Rein G., Garcia J., Simeoni A., Tihay V., Ferrat L. Smouldering natural fires: comparison of burning dynamics in boreal peat and Mediterranean humus // WIT Transaction on Ecology and the Environment. 2008. N 119. P. 183–192. doi: 10.2495/FIVA080191.
4. Суков Я.В. Исследование параметров заживания и горения торфа с помощью физического и математического моделирования: Автореф. ... дис. канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2010. 23 с.
5. Albini F.A. Physical model for fire spread in brush // 2 Int. Sympos. on Combustion. Pittsburg, 1967. P. 553–560.
6. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л., Рейно В.В., Руди Ю.А., Кузнецов В.Т., Караваяев В.В. Экспериментальные исследования возникновения и распространения степного пожара в природных условиях // Вестн. ТГУ. Математика и механика. 2011. № 2(14). С. 91–102.
7. Субботин А.Н. Закономерности развития подземного пожара при разных условиях тепло- и массообмена с внешней средой // Теплообмен ММФ-2000. Теплообмен в химически реагирующих системах: IV Минский Междунар. форум. Минск: ИТМО НАНБ, 2000. Т. 4. С. 224–231.

E.L. Loboda. Experimental research of peat burning front depth by IR-methods.

Results of experimental researches by determination of depth of peat layer burning are presented. As samples, four types of peat with various botanical structures, densities, degrees of decomposition, and moistures were investigated. Peat burning front depth and temperature profile are determined.