

А.В. Иванов¹, В.И. Макаров²

Оценка объема эмиссий при сгорании некоторых видов лесных горючих материалов

¹Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск²Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 18.01.2002 г.

Проведен расчет объема эмиссий при горении некоторых видов лесных материалов. Установлено, что объемы выделяющихся СО и СО₂ меньше при высокоинтенсивном лесном пожаре. Аналогичные результаты получены и для других углеродсодержащих компонентов газовых эмиссий. Объем дисперсного углерода (С_{дисп}), образующийся при горении мха Шребера, также выше при низкоинтенсивном пожаре, при горении лишайника содержание С_{дисп} в эмиссиях выше при высокоинтенсивном пожаре.

Горение биомассы – это один из глобальных источников газоаэрозольной эмиссии в атмосферу Земли [1]. Известно, что ежегодно на нашей планете возникает более 200 тыс. лесных пожаров, которые повреждают около 0,5% общей площади лесов. Горение растений, подстилки и почвенного гумуса сопровождается выделением большого числа различных соединений, химический состав которых еще недостаточно хорошо изучен [2].

Для бореальных лесов пожары являются особенно актуальными. Ежегодно на борьбу с ними тратится большое количество сил и средств. Тем не менее пока не существует однозначного ответа на вопрос: «лесной пожар – благо или бедствие?». Работ, посвященных исследованию эмиссий при лесных пожарах в бореальных лесах Сибири, немного [3–9], а по оценке их количественного состава встречаются лишь единичные сведения [10].

В данной статье дана оценка объема и химического состава основных составляющих газовой эмиссии, элементного состава аэрозолей и продуктов горения различных видов лесных горючих материалов в лабораторных условиях и в полевых экспериментах.

Методики исследований и расчета объема эмиссий

Для опытов были взяты наиболее распространенные лесные горючие материалы (ЛГМ): мох Шребера, лишайник, осочка, брусника, листья березы, хвоя сосны и лесная подстилка. Предварительно было определено их влагосодержание. При сжигании этих ЛГМ производился отбор аэрозолей на фильтры из волокнистого полимерного материала АФА-ХА-20 и фильтры из стекловолоконного материала типа Glass Fibre Pre-filters диаметром 50 мм, при помощи помпы и специального оборудования.

Расчет объема эмиссий проводили по методике С.В. Белова [10]. При этом в качестве базовых пока-

зателей использовали данные Э.В. Конева [4] по содержанию таких химических элементов, как углерод, кислород, водород и азот в ЛГМ (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав некоторых видов лесных горючих материалов [4]

ЛГМ	Элемент, % (по массе)			
	С	Н	О	N
Осочка	47,9	5,51	39,37	1,64
Листья березы	49,36	6,28	42,59	1,6
Мох Шребера	50,11	5,77	39,69	1,43
Брусника	52,7	6,1	36,71	0,89
Хвоя сосны обыкновенной (многолетняя)	53,1	5,9	34,47	1,03
Хвоя сосны обыкновенной (однолетняя)	53,1	5,9	34,33	1,17
Лишайник	45,4	6,0	45,8	0,3
Багульник	54,7	6,8	34,86	0,94
Лесная подстилка	49,6	5,2	33,88	0,92

Расчет объема эмиссий при сгорании некоторых видов ЛГМ

Расчет потребления воздуха и количество продуктов сгорания производили на примере горения мха Шребера, химический состав которого продемонстрирован в табл. 1:

$$K = \frac{8}{3} C + 8H - O = \frac{8}{3} 0,502 + 8 \cdot 0,058 - 0,4 = 1,43 \text{ кг,}$$

где K – количество кислорода, кг; C – углерод, кг; H – водород, кг; O – кислород, кг.

Выполненные расчеты показывают, что для полного окисления углерода и водорода до СО₂ и воды для 1 кг абсолютно сухого горючего материала необходимо 1,43 кг кислорода. По определению – это кислородный коэффициент.

Кислородный коэффициент представляет собой отношение массы О₂ к массе горючего, при условии, что углерод и водород полностью окисляются до СО₂

и H₂O в процессе горения, но избытка кислорода нет. В атмосфере кислород находится в смеси с азотом и другими газами, которые не участвуют в процессе горения. Таким образом, в процессе горения газообразным окислителем является смесь кислорода и азота, поэтому для обеспечения сгорания ЛГМ воздуха требуется гораздо больше, чем чистого кислорода. При влажности 60% воздух содержит по массе O₂ – 22,85%, N₂ – 75,3, аргона – 1,29, водяного пара – 0,53, CO₂ – 0,046%.

Зная необходимое количество кислорода и процент содержания его по массе в воздухе, можем рассчитать потребность в воздухе при сгорании 1 кг мха Шребера:

$$B = \frac{K}{0,23} = \frac{1,43}{0,23} = 6,26 \text{ кг,}$$

где B – количество воздуха, кг.

Таким образом, для полного сгорания мха Шребера потребуется воздуха 6,26 кг. При проведении лабораторных опытов было установлено, что недожог (NB) для мха Шребера в среднем составляет 20%.

Далее, исходя из первоначального состава горючего материала, выполнили расчет выхода углекислого газа, азота, аргона и C_{дисп}:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= (O + \frac{8}{3} O) \times 0,8 + B \times 0,00046 = \\ &= (0,5011 + \frac{8}{3} \times 0,5011) \times 0,8 + 6,2626 \times 0,00046 = 1,47 \text{ кг;} \end{aligned}$$

$$N_2 = B \times 0,7528 + N = 6,2626 \times 0,7528 + 0,0143 = 4,73 \text{ кг;}$$

$$Ar = B \times Ar = 6,2626 \times 0,0129 = 0,08 \text{ кг;}$$

$$C_{\text{дисп}} = C \times NB = 0,5011 \times 0,2 = 0,10 \text{ кг.}$$

Аналогичным образом были рассчитаны потребность в воздухе и количество образовавшегося углекислого газа при сгорании других исследуемых лесных горючих материалов (табл. 2).

Таблица 2

Объем эмиссий при сгорании лесных горючих материалов

ЛГМ	Потребность при сгорании 1 кг абс. сух. материала, кг		Продукт сгорания, кг		Инертный газ	
	в кислороде	в воздухе	CO ₂	C _{дисп}	Ar	N ₂
Осочка	1,32	5,80	1,41	0,10	0,08	4,38
Листья березы	1,39	6,10	1,45	0,10	0,08	4,61
Мох Шребера	1,43	6,26	1,47	0,10	0,08	4,73
Брусника	1,53	6,66	1,55	0,11	0,09	5,03
Хвоя сосны (многолетняя)	1,54	6,75	1,56	0,11	0,09	5,10
Хвоя сосны (однолетняя)	1,54	6,76	1,56	0,11	0,09	5,10
Лишайник	1,23	5,39	1,33	0,09	0,07	4,06
Багульник	1,60	6,99	1,61	0,11	0,09	5,27
Лесная подстилка	1,40	6,13	1,46	0,10	0,08	4,62

Недожог горючих материалов означает неполное сгорание углерода, при этом часть его поднимается в

виде аэрозоля. Количественная оценка химического недожога при лесных пожарах была сделана сотрудниками Института леса и древесины СО АН СССР [4, 11]. При этом установлено, что обычно не сгорает около 10–20% углерода, содержащегося в горючих материалах. В нашем случае недожог составил 20%.

Имеющиеся данные по влагосодержанию ЛГМ позволили рассчитать количество выделившихся паров воды. Таким образом, при сгорании 1 кг мха Шребера в абсолютно сухом состоянии образуется 7,092 кг продуктов горения (CO₂, N₂, Ar, C_{дисп}) и 0,047 кг в виде золы.

Полученные нами результаты согласуются с результатами зарубежных исследователей, в частности по этим данным количество углекислого газа, образующегося при сгорании 1 кг абсолютно сухого горючего, равно 1,6 кг [12].

Анализ химического состава аэрозоля, осевшего на стекловолокнистый фильтр, позволил установить соотношение органического и неорганического углерода, образующегося при сгорании некоторых видов ЛГМ (табл. 3).

Таблица 3

Соотношение органического и неорганического углерода в аэрозолях

ЛГМ	Количество углерода в виде аэрозоля		
	$\frac{C_{\text{орг}}}{C_{\text{неорг}}}$	Углерод органический, кг	Углерод неорганический, кг
Осочка	4,1	0,08	0,02
Листья березы	18,2	0,09	0,005
Мох Шребера	4,95	0,08	0,02
Хвоя сосны (многолетняя)	7,7	0,09	0,01
Хвоя сосны (однолетняя)	2,6	0,08	0,03

Из табл. 3 видно, что в аэрозолях количество органического углерода больше неорганического углерода. Их соотношение изменяется от 2,6 (хвоя сосны) до 18,2 (листья березы).

В рамках Российско-американского проекта «Влияние пожаров на бореальные леса Евразии» летом 2000 г. было проведено два эксперимента по моделированию поведения пожаров разной интенсивности в сосняке лишайниково-зеленомошном. Площади экспериментальных пожаров составляли по 4 га каждая. Комплексность полевого эксперимента предопределила участие в нем специалистов разных профилей. При этом была проведена оценка запасов и количества сгоревших горючих материалов по видам (табл. 4).

Таблица 4

Количество сгоревших ЛГМ и потребность в окислителе при их горении

Интенсивность пожара	ЛГМ	Запасы ЛГМ, кг	Потребность, кг	
			в кислороде	в воздухе
Низкоинтенсивный	Лишайник	3022	3725	16301
	Мох Шребера	11853	16962	74230
Высокоинтенсивный	Лишайник	2396	2954	12925
	Мох Шребера	12591	18017	78850

Эмиссии при экспериментальных пожарах разной интенсивности в сосняке лишайниково-зеленомошном, кг/га

Интенсивность пожара		Эмиссия										Инертные газы	
		CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₇	H ₂ O	C _{дисп}	Ar	N ₂
Низко-интенсивный	Лишайник	1014	3177	83	12	2	6	4	3	1578	218	167	9731
	Мох Шребера	4391	13757	361	51	7	24	16	12	8215	1262	1017	59539
Высоко-интенсивный	Лишайник	709	2325	52	6	0,5	4	3	1	2265	274	210	12272
	Мох Шребера	4112	13487	303	34	3	21	15	7	8208	1188	958	56050

Используя полученные данные о количестве сгоревших лесных горючих материалов и о составе газовых эмиссий, выделяющихся при этом (анализ состава газовых эмиссий сделан и любезно предоставлен участником эксперимента Стивом Бейкером, Лесная служба США, Миссула), мы рассчитали по приведенной выше методике объемы эмиссий во время этих экспериментальных пожаров, которые приведены в табл. 5.

Обычно при расчетах эмиссий углерода при лесных пожарах используют весь запас напочвенных ЛГМ. По нашему мнению, это не совсем корректный подход. Для оценки эмиссий при лесном пожаре необходимо учитывать, что имеющийся запас ЛГМ сгорает не полностью, а величина недожога зависит от интенсивности горения.

Заключение

В результате выполненных экспериментальных работ рассчитаны возможные объемы эмиссий при пожарах разной интенсивности. Установлено, что объемы выделяющихся CO и CO₂ меньше при высокоинтенсивном лесном пожаре. Аналогичные результаты получены и для других углеродсодержащих компонентов газовых эмиссий.

Объем дисперсного углерода (C_{дисп}), Ar, N₂, образующийся при горении мха Шребера, также выше при низкоинтенсивном пожаре. При горении лишайника содержание этих компонентов (C_{дисп}, Ar, N₂) в эмиссиях выше при высокоинтенсивном пожаре. Для уточнения представлений об объеме газоаэрозольных эмиссий необходимо проведение дальнейших исследований. Такие исследования помогут уточнить объемы и состав эмиссий при лесных пожарах разной интенсивности, оценить их влияние на баланс углерода и изменение химического состава атмосферы в дымовом шлейфе.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН «Аэрозоли Сибири» и проекта РФФИ 01-04-49340.

A.V. Ivanov, V.I. Makarov. Estimation of volume emissions at combustion of some types of forest fuel materials.

The emissions from combustion of some types of forest fuel materials are calculated. It is established that amounts of emitted CO and CO₂ are less at a highly intensive wildfire. Similar results were obtained also for other carbonic components of gas emissions. The volume of disperse carbon (C_{дисп}) emitted from burning Shrebery moss is also higher at a low-intensive fire. At combustion of lichen, the amounts of C_{дисп} in emissions are larger at highly intensive fire.

1. *Kasischke E., Christensen N., Stocks B.* Fire, global warming, and the carbon balance of boreal forests // *Ecological Applications*. 1995. V. 5. N 2. P. 437–451.
2. *Исидоров В.А.* Органическая химия атмосферы. Л.: Химия, 1985. 264 с.
3. *Валендик Э.Н., Гевель Н.Ф.* О полноте сгорания некоторых лесных горючих материалов // *Проблемы лесной пирологии*. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1975. С. 127–137.
4. *Конов Э.В.* Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 237 с.
5. *Куценогий К.П., Валендик Э.Н., Буфетов Н.С., Барышев В.Б.* Эмиссии крупного лесного пожара в Сибири // *Сиб. экол. ж.* 1996. Т. 3. № 1. С. 93–101.
6. *Смоляков Б.С., Куценогий К.П., Макаров В.И., Ковальская Г.А., Смирнова А.И., Павлюк Л.А., Фильмонова С.Н.* Влияние лесных пожаров на химический состав аэрозоля // *Оптика атмосф. и океана*. 1999. Т. 12. № 6. С. 523–527.
7. *Bufetov N.S., Baryshev V.B., Valendik E.N., Koutsenogii K.P., Ivanov V.P., Kotchubey D.I.* // *International Aerosol Symposium, Atmospheric aerosols*. V. 1. Moscow, 21–25 March 1994. P. 30–42.
8. *Chankina O.V., Churkina T.V., Ivanov A.V., Ivanov V.A., Ivanova G.A., Koutsenogii K.P., Kovalskaya G.A.* Multielement composition of the aerosols of the forest fires of boreal forests upon burning of combustibles // *NIMA*. 2001. A-470. P. 444–447.
9. *Koutsenogii K.P., Makarov V.I., Kovalskaya G.A., Smolyakov B.S., Pavlyuk L.A.* The chemical composition of the aerosol particle produced by the forest fires in Siberia // *The joint fire conference and Workshop «Crossing the Millenium: Integrating Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management»*. Grove Hotel, Boise, Idaho, June 15–17. 2000. P. 219–222.
10. *Белов С.В.* Лесная пирология: Уч. пособие. Л.: ЛТА, 1982. 68 с.
11. *Курбатский Н.П.* Итоги и перспективы исследований природы лесных пожаров // *Горение и пожары в лесу*. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1973. С. 9–26.
12. *Ward D.E., Hardy C.C.* Smoke emissions from wildland fires // *Environ. International*. 1991. V. 17. P. 117–134.