

Ю.Н. Самсонов<sup>1</sup>, С.А. Попова<sup>1</sup>, О.А. Беленко<sup>2</sup>, О.В. Чанкина<sup>1</sup>

## Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири

<sup>1</sup>Институт химической кинетики и горения СО РАН,

<sup>2</sup>Сибирская государственная геодезическая академия, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 17.12.2007 г.

Измерения дымовой эмиссии при проведении натурно-модельных пожарных экспериментов показали, что в атмосферу эмитируется от 0,2 до 1 т аэрозольного вещества с 1 га сгоревшего леса. Это составляет от 1 до 7% от полного количества биомассы (15–25 т/га), сгорающей при типичном лесном пожаре в Сибири. Выявлено, что от 3 до 10 млн т аэрозольного вещества поступает в атмосферу вследствие лесных пожаров. Анализ химического состава дымовых проб показал, что от 3 до 15 % его массы составляют вещества минерально-почвенного происхождения (Na, Si, Ca, K, Fe, Zn и др.). Углеродсодержащие аэрозоли, возникшие вследствие неполного сгорания органических веществ в зоне горения биомассы, составляют 60–90% от полного количества аэрозольной эмиссии. Доля элементного углерода в эмиссии составляет в среднем 7–15%. Более 80% массы дымовой эмиссии находится в аэрозольных частицах размерами менее 3 мкм.

### Введение

Стихийное горение биомассы («дикие» пожары) представляет собой природное явление, при этом ежегодно сгорает 3–5 млрд т биомассы, что сопоставимо с количеством органического топлива (нефть, уголь), используемого человеком. Хотя проблема горения биомассы и сопутствующие экологические, химические, оптические и погодно-климатические аспекты касаются всех регионов Земли, непосредственным объектом исследований были пожары в бореальных (северных) лесах Сибири. Российские бореальные леса оцениваются в 700 млн га, причем их большая часть – это почти сплошные хвойные леса Сибири.

Хотя статистика недооценивает масштабы лесных пожаров в России, но спутниковые наблюдения показывают [1, 2], что пожары ежегодно происходят на площади 10–14 млн га в лесной и лесостепной зонах Сибири (это является третьим по масштабам природным пожарным явлением после сезонных пожаров в африканских саваннах и в (суб)тропических лесах). При сгорании горючих материалов (древесина, кустарник, трава, мох, лишайник и т.д.) выделяются как газовые продукты горения, так и аэрозольные дымовые частицы.

Массовая доля аэрозольной эмиссии варьируется от 1–2 до 5–7% от количества сгоревшей биомассы в зависимости от условий горения (собственные и литературные данные), однако ее роль в атмосферном теплообмене часто является доминирующей. Это связано с тем, что в дымовой эмиссии присутствуют тонкодисперсные частицы, состоящие из элементного

углерода (сажа, графит). Такие частицы, находясь длительное время в атмосфере, поглощают и рассеивают солнечное излучение, т.е. могут влиять на теплообмен между атмосферой, земной поверхностью и солнечной радиацией и, следовательно, могут воздействовать на локальную погоду и глобальный климат.

В этом отношении важно отметить, что потенциальное климатическое действие аэрозольной эмиссии (похолодание) является компенсирующим по отношению к воздействию газовых продуктов горения (двуокись и окись углерода, метан), гипотетически приводящих к глобальному потеплению. Поэтому количественные сведения об интенсивности, химическом и дисперсном составе дымовой эмиссии от крупномасштабных лесных пожаров являются необходимыми для создания и верификации прогностических компьютерных моделей глобального или регионального погодно-климатического тренда. Они важны в исследованиях оптических и химических свойств атмосферы, а также для оценок респираторного качества приземного воздуха.

В статье представлены экспериментальные результаты, полученные в 2000–2007 гг., в рамках комплексных исследований пожаров в таежных хвойных лесах в Красноярском крае, проводимых совместно российскими (Институт леса СО РАН, Институт химической кинетики и горения СО РАН), американскими (USDA Forest Service) и канадскими (Canadian Forest Service) специалистами. Исследования 2000–2003 гг. проводились в преимущественно сосновых лесах, и их результаты были частично опубликованы в [3–5]. Пожарные эксперименты

2006–2007 гг. проводились в лиственных лесах, но со значительной долей других древесных пород. Разные виды лесов связаны с разными типами почв и с ландшафтными особенностями, они характеризуются разными видами напочвенной флоры, кустарниковыми, древесными и иными типами лесных горючих материалов. В этом отношении необходимы репрезентативные и сопоставимые экспериментальные сведения о поведении пожаров в разных типах лесов, о мощности газоаэрозольной дымовой эмиссии в различных условиях, о ее химическом составе и дисперсных характеристиках.

### **Проведение натурно-модельных лесных пожаров и методика отбора аэрозольных дымовых проб**

Эксперименты проводились в виде натурно-модельных пожаров на четырех гектарных участках в среднем течении Енисея и Ангары (Ярцево, 2000–2002; Говорково, 2002; Хребтовский, 2003; Невонка, 2006–2007 гг.). Для каждого пожарного эксперимента (18 за период работ) формировалась лесная площадка  $200 \times 200 \text{ м} = 4 \text{ га}$  (иногда  $100 \times 100 \text{ м} = 1 \text{ га}$ ). Вокруг «пожарных» площадок устраивались защитные полосы в виде просек и/или минерализованных (почвенных) полос, препятствующих выходу пожара за пределы экспериментального участка. Предварительно на площадке проводились биоэкологические и пирологические учеты и документирование количества и распределения лесных горючих материалов по разным уровням (напочвенная подстилка, мхи, лишайники, травы, кустарники, древесная поросль, взрослые деревья и т.п.).

Аналогичные учеты проводились после пожарного эксперимента, что позволяло оценивать количественно и качественно воздействие пожара на лесную экосистему, в том числе определять количество сгоревшей биомассы с единицы площади. Формировалась «сетка» учетных точек по пожарной территории (49 точек с интервалом  $25 \times 25 \text{ м}$ ), в которых устанавливались устройства для измерения скоростей продвижения огневого фронта и температурных характеристик на разных высотах (до 10 м от горячей поверхности). Информация в цифровом формате в режиме реального времени передавалась и сохранялась на даталоггерах, закрытых слоем почвы от перегрева. На высоте 1000 м «зависал» вертолет, регистрируя инфракрасной цифровой камерой тепловые характеристики горячей территории и продвижение огневого фронта. Зажигание проводилось в виде «огневой ленты» по всей длине наветренного края площадки, обычно во второй половине дня. Скорость продвижения огневого фронта зависела от условий опыта (запас горючего материала на площадке и его сухость, сила приземного ветра) и варьировалась от 0,5 до 9 м/мин. При предпожарных учетах, а также во время и после проведения эксперимента велись документальные записи, позволяющие сохранить сведения об условиях и характере каждого лесного пожара. Это является важным

преимуществом натурно-модельных экспериментов, позволяющих проводить комплексные исследования лесных пожаров в контролируемых и документируемых условиях. Проведение подобных учетов и контролируемых измерений во время стихийных лесных пожаров практически невозможно.

С целью отбора аэрозольных и газообразных проб вертолет периодически пролетал через дымовой шлейф от горячей территории на разных высотах — от 100 до 300 м (сведения о концентрациях и химическом составе газоаэрозольной эмиссии на разных высотах в данной статье не рассматриваются). Одновременно в наземных условиях выполнялся отбор аэрозольных проб прокачкой задымленного воздуха через аэрозольные фильтры двух типов: фильтры АФА-ХА из тонковолокнистого полимерного материала (фильтры Петрянова) и стекловолоконные фильтры Gelman. Фильтры предварительно просушивались в течение 7 дней в герметичном стеклянном эксикаторе над слоем свежeproкаленного цеолита до их предельной сухости, взвешивались и хранились до пожарных экспериментов в пластиковых пакетах. После завершения отбора дымовых аэрозолей фильтры доставлялись в лабораторию, где вновь выполнялась процедура «просушивание и взвешивание». Таким способом определялась масса аэрозольного вещества, собранного на каждом фильтре, по этим данным рассчитывались массовые концентрации дымовой эмиссии в местах отбора проб (объемная скорость и длительность прокачки регистрировались в журнале. Кроме того, шла регистрация суммарного объема прокачанного дыма газовым счетчиком СГ-2).

С целью определения дисперсных характеристик дымовой эмиссии производилось сепаратное осаждение частиц разных размеров из дымового потока на стеклянные пластины инерционных импакторов двух типов — в диапазоне примерно от 30–40 до 1–3 мкм на пятиступенчатый прямоугольный каскадный импактор и от 10 до 100 мкм на так называемый ротационный импактор открытого типа [4, 5]. Стеклянные пластины предварительно покрывались тонким липким слоем Апиэзона, просушивались и взвешивались. После опытов вновь проводились просушивание и взвешивание пластин, позволяющие определить количество осевшего на них аэрозольного вещества той или иной размерной фракции. Пластины с осажденными частицами фотографировались на цифровом микроскопе Axioscope 2 plus. Для определения дисперсных характеристик сфотографированных размерных фракций применялись компьютерные программные средства, описанные в [5, 6]. Кроме того, во время пожарных экспериментов использовался фотоэлектрический аэрозольный счетчик ПКЗВ-906 для измерения спектра размеров тонкодисперсной фракции дымовой эмиссии (0,3–3 мкм).

Химический состав аэрозольной эмиссии определялся в лабораторных условиях высокочувствительными методами: методом рентгеновской флуоресценции с возбуждением синхротронным излучением (РФА СИ) для элементного анализа аэрозолей, собранных на полимерных фильтрах АФА-ХА, и методом

реакционной газовой хроматографии для измерения органических веществ и элементарного углерода, собранных на стекловолоконных фильтрах Gelman. Методом РФА СИ регистрировались химические элементы с атомными номерами, начиная с калия (иногда от серы или хлора) и далее по периодической таблице.

Чувствительность метода к разным элементам исследовалась ранее [7], и она варьировалась примерно от 0,05–0,1 мкг/см<sup>2</sup> для кальция и калия до 0,0004–0,001 мкг/см<sup>2</sup> для стронция Sr, циркония Zr или молибдена Mo. Здесь чувствительность выражена как минимально регистрируемое количество элемента на единице площади фильтра, т.е. в виде его поверхностной концентрации. В тех случаях, когда экспериментальное измерение номинально показывало концентрацию, существенно меньшую этого предела, то этому измерению приписывалось нулевое значение. Такая процедура позволяла исключить из рассмотрения измерения с недостаточной надежностью полученных данных (это было важно в случае их среднегеометрического усреднения, для среднеарифметических вычислений указанная процедура несущественна).

Количество в аэрозольных пробах углеродсодержащих органических веществ измерялось методом реакционной газовой хроматографии на установке, описанной в [5, 8]. Метод основан на каталитическом окислении органических веществ, собранных на стекловолоконном фильтре Gelman, в углекислый газ с его последующей каталитической конверсией в метан, количество которого измерялось высокочувствительным пламенно-ионизационным детектором.

Как видим, в данном методе происходит превращение каждого атома углерода из молекулы органического соединения сначала в молекулу CO<sub>2</sub>, затем в молекулу CH<sub>4</sub>. Другими словами, метод фактически измеряет число (массу) атомов углерода, содержащихся в исследуемой пробе в виде органических соединений, вне зависимости от их конкретного химического строения.

Полная масса углерода в органическом веществе аэрозольных проб определялась исходя из предварительно полученной калибровочной зависимости «сигнал детектора – масса углерода в эталонной пробе», при этом в качестве эталонных веществ использовались несколько органических соединений известного химического состава. Однако при определении полной массы органического вещества в дымовых пробах следует учитывать тот факт, что в молекулы органических соединений кроме атомов углерода входят также атомы кислорода, водорода и азота. Органические составляющие дымовых аэрозолей имеют химическое происхождение от типичных лесных горючих материалов – целлюлозы (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub>, гемицеллюлозы (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>)<sub>n</sub>, лигнины, смолы. Массовая доля атомов углерода в таких химических соединениях варьируется от 45 до 55%, в среднем 50% [9]. По этой причине мы должны увеличить вдвое экспериментально измеренную массу углерода для того, чтобы определить полную массу органических веществ в аэрозольной пробе. Количество

в дымовой пробе элементарного углерода (в виде графита, сажи, black carbon) определялось на этой же установке и окислялось на первой стадии в углекислый газ кислородом. Здесь не требуется удваивать измеренную массу, поскольку в этом случае определяется непосредственно количество элементарного углерода, находящегося в данной аэрозольной пробе.

## Массовая концентрация и полное количество дымовой аэрозольной эмиссии

Наземные пробы аэрозолей отбирались прокачкой задымленного воздуха через фильтры. Объемные скорости и длительности прокачки составляли 130 л/мин и 3–6 мин для фильтров АФА-ХА, 30 л/мин и 7–15 мин – для фильтров Gelman. Это позволяло в течение каждого пожарного эксперимента (обычно 2–3 ч) собирать 4–8 проб на стекловолоконные и 6–12 проб на полимерные фильтры. Пробы отбирались в нескольких местах вдоль боковой границы пожарной площадки, на которую сносился чуть косым ветром дымовой поток с горячей территории. Места отбора проб смещались по мере продвижения огневого фронта от исходной наветренной к конечной подветренной границе пожарного участка. Фильтродержатели с закрепленными в них фильтрами располагались непосредственно над дымящей (горящей) поверхностью на высоте 0,5–1 м. В такой позиции на фильтры попадают только что образовавшиеся аэрозоли, еще не подвергнутые вторичным физическим трансформациям (например, насыщению атмосферной влагой) и химическим реакциям в свободной атмосфере (например, с окислами азота и серы, с кислотными примесями). Кроме того, здесь наблюдается почти вертикальный конвективный подъем горячего дыма.

Измеряя скорость подъема ( $U \approx 0,5 \pm 1,5$  м/с) и длительность активного дымления в данном месте ( $t \approx 10$ –40 мин), по измеренным массовым концентрациям дымовой эмиссии  $C$  (мг/м<sup>3</sup>) можно оценивать количество аэрозольного вещества  $M$  (т/га), эмитированного за время пожара с единицы площади:

$$M = 6 \cdot 10^{-4} C U t. \quad (1)$$

На высоте 2–3 м и выше происходят «пригибание» дымовых потоков и их смешивание с окружающим воздухом. По этой причине измерение дымовой концентрации на какой-то произвольной высоте характеризует текущую концентрацию в данной точке, но из этой величины было бы трудно получить обобщающие «пожарные» сведения.

В табл. 1 представлены аэрозольные концентрации, измеренные и усредненные в разных пожарных экспериментах за период 2000–2003 [3–5] и 2006–2007 гг.

Концентрация в каждой точке отбора пробы рассчитывалась, исходя из прибавки веса фильтра после прокачки через него дыма и из объема прокачанного дыма. Измеренные таким образом концентрации в пробах, отобранных в разных точках

Таблица 1

## Усредненные массовые концентрации дымовой эмиссии

Пожарные опыты в лесах					
сосновых				лиственничных	
2000 г. (2 опыта)	2001 г. (4 опыта)	2002 г. (5 опытов)	2003 г. (2 опыта)	2006 г. (2 опыта)	2007 г. (3 опыта)
Усредненные концентрации дымовой аэрозольной эмиссии, мг/м <sup>3</sup>					
88; 57; 73; 65	73; 54; 44; 50; 41; 40; 54; 60	50; 19; 13; 30; 28; 42; 21; 20; 43; 39	55; 46; 40; 35	58; 29; 36; 25	57; 47; 69; 74; 64; 60
Среднее значение, мг/м <sup>3</sup>					
46				51	

Примечание. Включены данные как для полимерных фильтров АФА-ХА, так и для стекловолоконных Gelman, поэтому общее количество данных превышает полное число пожарных опытов (18), выполненных за весь период работ.

и в разные моменты времени, сильно варьируются по величине даже в рамках отдельного пожарного опыта (см. далее табл. 2 и 3). Столь большие вариации обусловлены тем, что горение и, соответственно, дымление протекают неоднородно как по горячей площади, так и по времени. В наибольшей степени это связано с постоянными флуктуациями направления и силы ветра вблизи горячей поверхности, так что к фильтродержателю периодически может приходиться интенсивный дымовой поток либо поток дыма пройдет чуть мимо. В результате даже на близкорасположенных фильтрах количество вещества может различаться в несколько раз. В этой связи было важно взять достаточное количество проб во время пожарного опыта и проводить повторяющиеся опыты, чтобы после усреднения их данных получать величины, характеризующие дымовые эмиссии в тех или иных условиях.

Как следует из табл. 1, усредненные концентрации для разных пожарных экспериментов варьировались в пределах от 13 до 88 мг/м<sup>3</sup>, но в большинстве случаев они находятся в диапазоне 40–60 мг/м<sup>3</sup> (в среднем 48 мг/м<sup>3</sup>). Исходя из средней концентрации  $C \approx 48$  мг/м<sup>3</sup>, средней скорости восходящего потока дыма  $U \approx 1$  м/с и длительности дымления  $t \approx 20$  мин, находим из (1) среднее количество дымового вещества  $M \approx 0,5–0,6$  т/га (в диапазоне 0,2–1 т/га для разных пожаров), эмитированного в воздух с 1 га сгоревшего леса. Учитывая, что обычно при лесном пожаре сгорает 15–25 т растительных материалов (собственные измерения [3–5, 10] и литературные данные [11, 12]), приходим к выводу, что в аэрозольную дымовую эмиссию превращается от 1–2 до 5–7% сгоревшей биомассы, в зависимости от типа и интенсивности пожара (это также соответствует оценкам, сделанным ранее в [3–5], и литературным данным [11–13]).

Сравнение концентраций, измеренных для пожаров в (условно) лиственничных лесах (2006–2007 гг., 25–74 мг/м<sup>3</sup>, среднее значение 51 мг/м<sup>3</sup>),

с концентрациями при пожарах в (условно) сосновых лесах (2000–2003 гг., 13–88 мг/м<sup>3</sup>, 46 мг/м<sup>3</sup>), показывает, что существенных различий нет (с учетом большой дисперсии локальных и даже усредненных величин). Это отражает тот факт, что общее количество (41–62 т/га в сосняках, 49–78 т/га в лиственничных лесах, собственные данные), видовой и морфологический состав лесного горючего материала в различных таежных лесах хотя и отличаются, но варьируются сравнительно мало, поэтому тип, поведение пожара и, следовательно, интенсивность дымления определяются главным образом сухими погодными условиями в предпозарный период (это предопределяет пирологическое качество горючих материалов) и метеоусловиями непосредственно во время пожара.

Существует ли корреляция между характером пожара, например интенсивностью его горения (выраженной качественно и количественно [10]), и мощностью дымовой эмиссии и/или изменениями в химическом и дисперсном составе дымовых частиц? В принципе такая зависимость должна бы существовать, и она наблюдается при лабораторно-стендовом сжигании образцов лесных горючих материалов. Действительно, количество образующегося дыма при интенсивном (пламенном) горении биомассы заметно меньше даже визуально, чем при последующем тлеющем режиме. Более того, осадок на фильтре от «пламенного дыма» визуально (черного цвета, вероятно, от углеродного вещества) отличается от аэрозольного осадка из «тлеющего дыма» (желто-коричневый, иногда маслянистый). Однако проявление этой взаимосвязи для реальных лесных пожаров оказывается смазанным. Дело в уже упоминаемых вариациях движения дымовых потоков, подходящих к точке отбора аэрозольных проб. За время прокачки через фильтр (5–15 мин) к нему периодически может приходиться дым как из зоны пламенного горения, так и из тлеющей зоны, и это может замаскировать искомую корреляцию.

Тем не менее показательны два пожарных опыта, выполненные один за другим на лесном участке Говорково в 2002 г. (см. табл. 1). Один из пожаров был очень интенсивным как визуально, так и по измерениям температур и скорости передвижения огневого фронта; другой пожар был весьма умеренным. Однако средняя концентрация дымовой эмиссии во втором пожаре (50 мг/м<sup>3</sup>) оказалась намного выше средней концентрации для интенсивного пожара (19 мг/м<sup>3</sup>).

Можно обоснованно полагать, что при интенсивном пожаре витающим в зоне горения крупинкам биомассы и парам органических соединений, постоянно выделяющимся из прогретого растительного материала, труднее миновать обширную зону пламенного горения без глубокой степени выгорания. Это приводит к уменьшению концентрации аэрозольного вещества (т.е. не полностью сгоревшего органического материала) в дымовой эмиссии. С другой стороны, в условиях интенсивного пожара происходит более глубокое выгорание общего запаса горючих материалов, так что суммарное количество аэрозольной

эмиссии может быть даже выше, чем при относительно медленном горении/дымлении.

### Содержание микроэлементов в дымовой аэрозольной эмиссии и их происхождение

В пожарных опытах 2000–2003 гг., выполненных в типичных сосновых лесах Центральной Сибири, методом РФА СИ измерялось содержание в аэрозольных пробах так называемых микроэлементов: калия, кальция, титана, железа и еще 10–15 элементов. Было показано, что парциальные количества тех или иных элементов могут отличаться друг от друга на два–три порядка, что отражает разное естественное содержание элементов в природных почвах и/или в растительных тканях [7, 14, 15].

По приведенным в [3–5] данным можно оценить, что суммарная доля всех измеренных элементов составляла 0,3–1% от полной массы аэрозолей, причем основную долю составляют пять или шесть

элементов: калий, кальций, железо, марганец, титан, цинк. В связи с тем что эти элементы существуют в природе в виде солей, окислов или комплексных соединений и что метод РФА СИ малочувствителен к «легким» элементам (натрий, алюминий, кремний, кислород и др.), которые в 10–20-кратном избытке содержатся в природных почвах, была сделана оценка суммарной доли минерально-почвенных веществ и оказалось, что она составляет 3–15% от полной массы исходной дымовой эмиссии.

Опыты 2006–2007 гг. в лиственных лесах в целом подтвердили эти данные. Например, измерения методом РФА СИ 20 элементов (от калия до свинца) в пробах для двух пожарных экспериментов 2006 г. показали, что их суммарное количество (с учетом упомянутых «легких элементов») варьировалось от 7 до 19% (в среднем 13%).

Аналогичные данные получены для трех пожарных экспериментов 2007 г. (табл. 2), из которых следует, что в приземной дымовой эмиссии содержится от 5 до 16% минерально-почвенных веществ (в среднем 11%).

Таблица 2

Содержание микроэлементов в дымовой пожарной эмиссии (пожарные опыты в (условно) лиственных лесах, 2007 г.)

Но- мер про- бы	K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Br	Rb	Sr	Zr	Nb	Mo	Pb	Масса пробы, мг	Полная концен- трация, мг/м <sup>3</sup>	Доля элемен- тов, %																		
Количество микроэлемента в пробе (фильтр АФА-ХА), мкг																																									
<i>Пожарный эксперимент 10 июля 2007 г.</i>																																									
1	13	0	1,1	0,2	0,2	0,4	2,6	0,02	0,08	0,12	0,2	0	0	0,02	0,02	0,01	0,03	0	0,011	0,06	3,7	6	5																		
2	39	40	4,0	0,2	0,5	2,6	9,4	0	0,04	0,06	0,1	0,01	0	0,11	0,06	0,16	0,04	0,01	0,004	0,03	11,3	19	9																		
4	26	17	1,0	0	0,3	0,9	2,2	0,04	0,01	0,11	0,1	0,03	0	0,10	0,03	0,04	0,01	0,00	0,014	0,03	15	25	3																		
5	132	88	2,6	0,2	0,7	9,8	6,6	0,04	0,06	0,14	0,9	0,03	0	0,42	0,15	0,29	0,05	0,01	0,003	0,09	84,4	141	3																		
6	51	38	5,4	0	0,4	2,9	16,5	0,05	0,03	0,10	0,3	0,01	0,04	0,18	0,09	0,13	0,04	0	0,016	0,03	43,2	72	3																		
7	53	67	2,8	0	0,1	3,6	9,9	0,03	0,07	0,20	0,4	0,03	0,07	0,16	0,05	0,22	0,01	0	0	0	39	65	4																		
8	106	172	6,9	1,1	0,3	6,4	12,5	0,01	0,09	0,29	0,4	0,02	0,11	0,14	0,07	0,65	0,04	0	0,010	0	32,9	55	9																		
9	60	102	4,6	0,9	0,6	10	8,3	0,05	0,12	0,16	0,4	0,02	0,03	0,27	0,07	0,28	0,04	0	0,008	0,04	57,7	96	3																		
10	22	13	3,7	0,2	0,2	0,7	5,7	0,07	0,03	0,03	0,3	0,02	0,02	0,04	0,04	0,08	0,03	0	0,006	0	15,1	25	3																		
																					Среднее:	57	5																		
<i>15 июля 2007 г.</i>																																									
11	71	31	1,3	0,2	0,5	2,1	4,6	0	0	0,09	0,7	0,02	0	0,51	0,08	0,05	0,01	0	0,013	0,10	6,4	11	18																		
12	56	43	1,5	0,3	0,2	2,4	3,5	0,07	0,01	0,03	0,1	0,01	0	0,22	0,04	0,05	0	0,01	0	0,07	36,3	61	3																		
13	693	124	9,5	0,4	0,6	10,0	20,4	0,20	0,17	0,67	5,2	0,04	0	1,79	0,44	0,14	0,06	0,01	0,035	0,63	29,7	50	29																		
14	287	56	3,9	0	0,3	2,9	6,5	0	0,08	0,44	2,1	0,02	0,05	0,88	0,23	0,04	0,04	0,01	0	0,14	34	57	11																		
15	62	59	2,5	0	0,8	2,2	6,7	0,09	0,16	0,45	0,8	0,03	0	0,34	0,07	0,06	0,03	0,01	0,009	0,12	29	48	5																		
16	70	134	2,8	0,3	0,3	7,0	7,0	0	0,03	0,10	1,0	0	0	0,26	0,06	0,20	0,03	0,01	0,017	0,06	30,5	51	7																		
18	84	58	8,1	0,8	0	5,1	13,8	0,03	0,07	0,38	0,6	0,03	0	0,18	0,09	0,08	0,05	0,01	0	0,13	27,5	46	6																		
19	145	1251	13,6	4,8	0,2	76,4	7,5	0	0,11	1,10	1,7	0,02	0,02	0,26	0,07	2,63	0,06	0,02	0,023	0,10	79,5	133	19																		
20	48	160	1,6	0,3	0,5	7,7	13,2	0,14	0,16	0,63	4,7	0,03	0	0,27	0,04	0,26	0,05	0,01	0,012	0,21	45,4	76	5																		
22	85	35	3,2	0,2	0,1	2,2	5,8	0,03	0	0,06	2,1	0,02	0	0,58	0,13	0,08	0,05	0,01	0	0,04	8,2	14	16																		
23	36	4	0,4	0,2	0	0,9	0	0	0	0	0,4	0	0	0,28	0,03	0	0	0	0,005	0,10	3,9	6	11																		
24	53	57	1,9	0,5	0,1	2,5	3,2	0	0,06	0,49	1,6	0,02	0	0,45	0,08	0,05	0,01	0	0,003	0,09	7,2	12	17																		
																					Среднее:	47	12																		
<i>17 июля 2007 г.</i>																																									
25	83	23	14,2	0,4	0,6	2,3	25	0,10	0,07	0,11	0,2	0,02	0	0,10	0,10	0,09	0,11	0,03	0,014	0,03	14,2	24	10																		
29	240	880	11,3	1,8	0,2	68	32	0,16	0,09	0,39	3,4	0,07	0	0,23	0,11	1,03	0,09	0,01	0,004	0,08	70,4	117	18																		
30	870	1520	14,5	2,1	0	134	29	0,13	0,11	1,03	9,5	0,08	0	0,27	0,23	1,79	0,07	0,01	0,007	0,18	67,3	112	38																		
31	280	418	12,4	1,1	0,0	38	27	0,12	0,03	0,14	3,4	0,02	0,07	0,23	0,12	0,50	0,09	0,01	0,123	0	23,1	38	34																		
32	162	173	2,3	0	0,4	11	2,9	0	0,06	0,13	1,6	0,01	0	0,12	0,06	0,17	0	0,01	0,008	0,01	26,6	44	13																		
33	69	67	2,0	0,4	0,2	4,2	0	0,02	0,01	0,06	0,5	0	0	0,07	0,02	0,05	0,01	0	0,009	0,01	24,6	41	6																		
34	119	268	5,7	0,7	0,1	25	11	0	0,03	0,10	1,4	0,02	0	0,08	0,05	0,31	0,04	0	0	0,09	38,5	64	11																		
35	95	78	0,4	0	0,4	3,6	0,0	0,03	0	0,13	0,2	0,05	0,05	0,01	0,02	0,07	0,02	0	0	0	102,2	170	2																		
36	69	136	2,4	0,3	0,1	10	3,3	0	0	0,07	0,4	0,02	0,04	0,02	0,03	0,15	0,03	0	0,025	0	13,3	22	17																		
37	126	396	13,0	1,6	0,1	26	25	0,08	0,06	0,18	1,4	0	0	0,48	0,15	0,34	0,07	0	0	0,26	26,5	44	22																		
38	98	82	6,1	0,6	0,4	7	9,4	0,05	0,02	0,03	0,2	0,07	0	0,02	0,05	0,09	0,03	0,01	0,003	0,04	65	108	3																		
																					Среднее:	69	16																		

Химический состав и дисперсные характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров...

Следует отметить очевидную зависимость количества минерально-почвенных веществ от случайной или природно-обусловленной предпожарной запыленности напочвенной подстилки и флоры (мох, листовая и хвойный опад), верхнего растительно-почвенного слоя и стеблей/стволов растений, которая может накапливаться месяцами и годами, но при сгорании проявляется в виде повышенной эмиссии (в [5] отмечен случай искусственной запыленности мохового слоя в опытах 2003 г., приведшей к негипичной 20–40% минерально-почвенной эмиссии).

С другой стороны, указанный выше многократный избыток «легких» элементов в почве и, соответственно, в дымовой эмиссии реально относится только к тем элементам (кремний, алюминий, кальций и др.), которые выносятся потоками горячего воздуха в виде почвенных пылинок с горячей почвенной подстилки. Однако известно, что некоторые элементы (калий, кальций, марганец, бром) являются необходимыми для функционирования растительных клеток, они в значительных количествах присутствуют непосредственно в растительных тканях. При сгорании растительной биомассы эти элементы эмитируются в атмосферу в составе дымовой эмиссии (метод, позволяющий дискриминировать элементы в аэрозолях на две группы, почвенного и растительного происхождения, известен в литературе и был использован нами в [3–5]).

Из табл. 2 видно, что в опытах 2007 г. основной вклад, более 90%, в минерально-почвенную эмиссию дали два элемента — калий и кальций. Источником калия (вероятно, в форме  $K_2CO_3$ ), несомненно, является горение растительной биомассы; что касается кальция ( $CaCO_3$ ), то он частично попал в воздух из сгоревших растительных тканей и, кроме того, содержался в минеральных частичках почвы. В этой связи вероятно, что оцененные выше доли минерально-почвенной эмиссии в опытах 2006 и 2007 гг. (13 и 11%) являются завышенными (они равны ~ 6%, если считать почву основным источником кальция, а горящую биомассу — источником калия).

Приведенные в табл. 2 данные об элементном составе дымовой эмиссии в пожарных опытах 2007 г., их сравнение с результатами 2006 г. (в таблице не приводятся), а также с данными для опытов 2000–2003 гг. [3–5] свидетельствуют, что не наблюдается принципиальных различий в микроэлементном составе эмиссий от пожаров в разных типах лесов. Наблюдаются лишь вариации в абсолютных и относительных концентрациях различных элементов, носящие случайный характер либо отражающие особенности самого метода РФА СИ. Этого можно было ожидать, поскольку в почвах на всех четырех лесных территориях не наблюдалось каких-либо геохимических аномалий природного или антропогенного происхождения, могущих проявиться в эмиссии того или иного элемента-маркера.

Исходя из средней доли минерально-почвенного вещества ~ 10% и из рассчитанной выше полной дымовой эмиссии 0,2–1 т/га, находим, что с 1 га сгоревшего леса эмитируется в атмосферу от 20 до 100 кг минерально-почвенных веществ, т.е. примерно

$7 \cdot 10^5$  т ежегодно в азиатской части России. Однако надо отметить, что здесь речь идет о первичной эмиссии, измеренной непосредственно над горячей/дымящей поверхностью. Поскольку имеются основания полагать, что значительная часть минеральной эмиссии состоит из весьма крупных частиц (частички почвенного происхождения в несколько десятков микрон), которые будут выпадать на землю недалеко от горящего леса (километры/десятки километров), то в региональном (сотни километров) и тем более в глобальном атмосферном переносе (тысячи/десятки тысяч километров) будут участвовать минеральные вещества (элементы), входящие лишь в состав малых частиц (~ 10 мкм и менее).

### Углеродсодержащие вещества в дымовой аэрозольной эмиссии

В табл. 3 приведены измеренные в дымовой аэрозольной эмиссии количества органических веществ и элементного углерода для пожарных экспериментов 2006 и 2007 гг. Как видим, в большинстве проб основная масса дымовой эмиссии (70–90%) состоит из органических веществ неопределенного химического состава (несомненно присутствуют соединения, входящие в состав древесных смол, лигнина, термически разложившейся целлюлозы) и на 2–18% (в среднем 8%) из элементного углерода. В целом эти результаты соответствуют ранее полученным данным для пожаров в сосновых лесах. Таким образом, как концентрации, так и минерально-почвенный и углеродсодержащий состав эмиссии приблизительно одинаковы при пожарах в разных типах лесов. Вероятно, что решающую роль играли погодные условия в предпожарный период и во время пожарных экспериментов, которые были примерно одинаковы как в 2000–2003, так и в 2006–2007 гг.

Есть ли взаимосвязь между интенсивностью лесного пожара и углеродсодержащим составом дымовой эмиссии (здесь не будет обсуждаться возможные изменения элементного состава минерально-почвенной фракции)? Выше уже отмечалось, что при интенсивном (пламенном) горении осадок дымовых частиц на фильтрах был меньше по массе и явно отличался по цвету и морфологии от аэрозолей, откачанных из тлеющей зоны. Аэрозольные слои на фильтрах из пламенной зоны были черного цвета и визуально выглядели состоящими из твердых частиц. Фильтры с «тлеющими» частицами, как правило, желто-коричневого или коричневого цвета, иногда маслянистые на вид. Несомненно, что черноту придают аэрозоли, частично или полностью состоящие из обугленного материала, т.е. из углерода в элементной форме (графит, сажа, black carbon). Желто-коричневые оттенки и маслянистость придают смолистые вещества, которые содержались в горящем материале хвойных деревьев.

Казалось бы, что в «черных» фильтрах должно быть повышенное содержание элементного углерода, однако результаты (см. табл. 3) это не подтверждают. Что касается суммарного содержания органических веществ, то не исключается небольшое их

**Количество углеродсодержащих веществ в дымовой аэрозольной эмиссии  
(пожарные опыты в (условно) лиственных лесах, 2006–2007 гг.)**

Номер пробы (фильтр Gelman)	Полная масса в пробе, мг	Массовая концентрация, мг/м <sup>3</sup>	Масса органического вещества, мг	Доля органического вещества, %	Масса элементарного углерода, мг	Доля элементарного углерода, %	Общая доля углеродсодержащих веществ, %	Цвет фильтра
<i>Пожарный эксперимент 23 июля 2006 г.</i>								
2	11,8	39	8,4	71	0,57	5	76	
3	9,9	30	7,6	77	0,53	5	82	
4	6,1	31	6,7	110	0,37	6	116	
5	8,3	42	8,4	101	0,6	7	108	
	В среднем:	<b>36</b>		<b>90</b>		<b>6</b>	<b>96</b>	
<i>3 августа 2006 г.</i>								
7	3,7	19	2,4	65	0,68	18	83	
8	7,2	24	4,9	68	0,26	4	72	
9	6,7	22	4,4	66	0,22	3	69	
10	5,1	17	4,4	86	0,17	3	90	
11	3,8	13	3,5	92	0,08	2	94	
13	11,6	37	7,6	66	0,96	8	74	
	В среднем:	<b>25</b>		<b>74</b>		<b>6</b>	<b>80</b>	
<i>10 июля 2007 г.</i>								
07-2	1,9	16	1,2	64	0,2	10	74	черн.
07-3	40	133	26	65	3,4	9	73	ж.-корич.
07-4	16,3	54	11,4	70	1,8	11	81	черн.
07-7	30,6	102	25	82	3,7	12	94	корич.
	В среднем:	<b>76</b>		<b>70</b>		<b>11</b>	<b>81</b>	
<i>15 июля 2007 г.</i>								
07-5	19,1	64	13,2	69	1,5	8	77	ж.-корич.
07-6	18,6	62	17,5	94	1,9	10	104	корич.
07-8	21,9	73	21,5	98	2,7	12	110	корич.
07-9	9,8	33	7,1	72	0,7	7	79	корич.
07-10	43,7	146	31,9	73	2,9	7	80	черн.
07-11	6,1	20	4,3	71	0,8	13	84	черн.
07-13	24,1	80	15,7	65	1,3	6	71	черн.
07-14	11,4	38	9,9	87	1,2	11	97	корич.
	В среднем:	<b>64</b>		<b>79</b>		<b>9</b>	<b>88</b>	
<i>17 июля 2007 г.</i>								
07-15	7,4	25	5,4	73	0,4	6	79	желт.
07-16	10,9	36	6,7	62	0,6	6	68	ж.-корич.
07-17	15,5	52	14,3	92	1,4	9	101	черн.
07-18	26,6	89	26,6	100	1,7	7	107	ж.-корич.
07-19	12,4	41	6,5	53	0,6	5	58	черн.
07-20	11,4	38	6,4	56	0,9	8	64	черн.
07-21	26,1	131	15,2	58	1,7	7	65	черн.
07-22	16,8	84	20,8	124	1,0	6	130	ж.-корич.
07-23	9,2	46	4,9	53	0,8	8	61	черн.
	В среднем:	<b>60</b>		<b>75</b>		<b>7</b>	<b>82</b>	

увеличение на фильтрах желто-коричневого и коричневого цветов («тлеющие» аэрозоли). Хотя примерно такие же выводы были получены ранее [4, 5], однако они должны быть уточнены в дальнейших исследованиях.

### **О дисперсных характеристиках дымовой аэрозольной эмиссии**

Дисперсные характеристики пожарной эмиссии, как и ее химический состав, представляют наибольший интерес. Это связано, во-первых, с зависимостью эффективности рассеяния и поглощения солнечного света от дисперсных размеров и химического состава аэрозольных частиц, витающих в атмосфере. Наибольшая способность к рассеянию света наблюдает-

ся у частиц субмикронных размеров, наибольшим поглощением обладают частицы, состоящие из обугленных материалов (сажа, графит, black carbon). С другой стороны, массы индивидуальных частиц пропорциональны кубу их диаметров, так что для характеристики аэродисперсной дымовой эмиссии также важны медианно-массовые параметры, т.е. распределение массы дымовой эмиссии по размерным фракциям. Во-вторых, длительность витания в атмосфере аэрозольных частиц также сильно зависит от их размеров, «пожарные» субмикронные и околомикронные частицы формально могли бы там «жить» месяцами (в реальной атмосфере такие частицы живут 10–15 дней, поскольку они «вымываются» дождевыми осадками), однако частицы диаметром 40–50 мкм осели бы на землю в течение одного

дня (предполагается, что дымовой столб/шлейф при лесном пожаре поднимается на высоту 0,5–1 км (наши наблюдения); при сильных крупномасштабных пожарах дым поднимается на 3–5 км [16]).

На рис. 1 в виде гистограммы показано распределение массы дымовой эмиссии, отдельно собранной на пять ступеней инерционного прямоугольного каскадного импактора, основанного на поворотах воздушно-дымового потока на 90° для каждого каскада/ступени (модель ПККИ, разработан и изготовлен в ИХКГ СО РАН). Первые четыре ступени представляют собой стеклянные пластины, покрытые тонким липким слоем Апиезона; пятая ступень, собирающая частицы размером менее 3 мкм, представляет собой фильтр АФА-ХА.

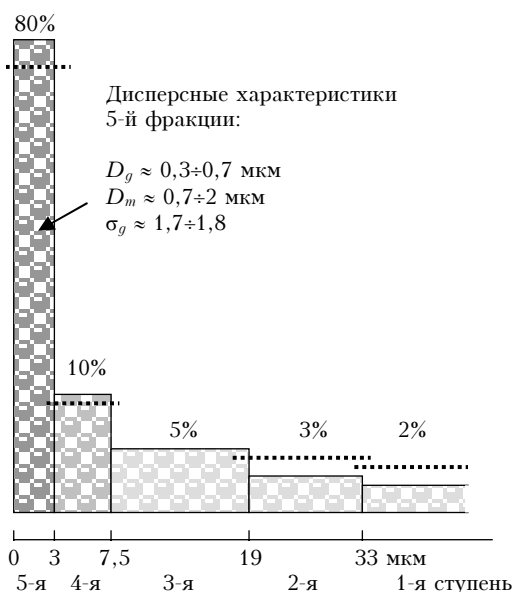


Рис. 1. Распределение массы дымовой аэрозольной эмиссии по отдельным ступеням (фракциям) каскадного импактора. Справа сверху на рисунке – характеристики тонкодисперсной 5-й фракции:  $D_g$  – средний счетный диаметр,  $D_m$  – медианно-массовый диаметр,  $\sigma_g$  – стандартное геометрическое отклонение для логнормального распределения

Из рис. 1 видно, что подавляющая часть дымовой эмиссии заключена в частицах менее 5–7 мкм (более того, преимущественно на 5-й ступени, т.е. менее 3 мкм). Однако здесь надо сделать уточнение.

Во-первых, известно, что крупные частицы (диаметром 30–40 мкм и больше), переносимые в воздухе (дыме) вместе с ветром, очень трудно отклонить и затянуть вместе с воздушным потоком в приемное отверстие импактора и затем «довести» их до 1-й ступени без больших потерь [17, 18].

Во-вторых, речь идет об относительно крупных аэрозолях, возникших вследствие выгорания органического материала из первоначальной крупинки растительной биомассы.

После (почти) полного выгорания органики образуется частица, состоящая из остаточного минерального вещества, вероятно из смеси  $K_2CO_3$  и  $CaCO_3$  (зольная частица). Эта частица, скорее всего, имеет несферическую форму (например, пластинчатую) и механически непрочная.

При попадании такой частицы в ускоренный воздушный поток на первой и следующей ступенях или же при ее столкновении со стеклянной пластиной/ступенью она может механически разрушиться, давая более мелкие частицы, способные пролетать и оседать на последующих ступенях (подобные процессы известны и описаны, например, в книге Н.А. Фукса [17]).

Это несомненно имеет место в наших экспериментах, так что истинная гистограмма должна быть несколько иной, т.е. должно быть несколько больше вещества на 1-й и 2-й, но меньше на 4-й и 5-й ступенях (это условно показано на гистограмме горизонтальными пунктирными линиями).

То, что в пожарной эмиссии присутствует значительное количество грубодисперсного вещества, видно из фотогафии (рис. 2), взятой из работы [5].

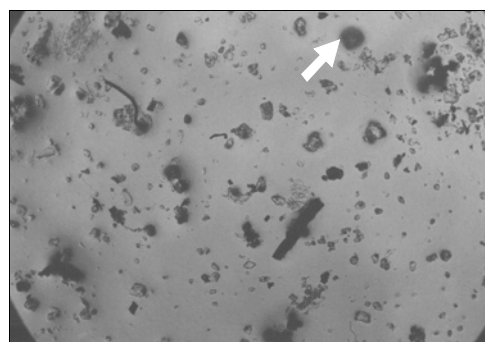


Рис. 2. Дымовые частицы, осажденные на пластину ротационного инерционного импактора (стрелкой показана частица диаметром ~20 мкм)

Здесь показаны дымовые частицы, собранные с помощью так называемого ротационного импактора открытого типа. Этот импактор, в отличие от ПККИ, наиболее эффективно собирает именно грубодисперсные дымовые аэрозоли (10–20 мкм и более), но не способен отбирать тонкие частицы, например 5–7 мкм и меньше. На фото видно, что в дымовой эмиссии имеется множество частиц диаметром 10–20 мкм и более.

Тем не менее из наших экспериментальных измерений и теоретических представлений следует, что массовая доля малых частиц (3–5 мкм и меньше) является преобладающей в дымовой эмиссии. В частности, измерение непосредственно во время пожарных опытов тонкодисперсной фракции дымовой эмиссии фотоэлектрическим счетчиком ПКЗВ показало (см. рис. 1), что медианно-массовые диаметры  $D_m$  в разных опытах и при разных дымовых концентрациях варьируются в пределах 0,7–2 мкм (средние счетные диаметры  $D_g$  в диапазоне 0,3–0,7 мкм). Это может представлять важность для компьютерного моделирования влияния дымовой эмиссии на атмосферный теплообмен, поскольку основная масса эмиссии оказывается в тонкодисперсном диапазоне, наиболее «опасном» для рассеяния солнечной радиации.

## Заключение

1. Массовые концентрации дымовой аэрозольной эмиссии, измеренные непосредственно над горячей/дымящей поверхностью, варьируются в диапазоне от



10–15 до 80–100 мг/м<sup>3</sup> (в среднем 48 мг/м<sup>3</sup>). Это приводит к эмиссии в атмосферу 0,2–1 т аэрозольного вещества с 1 га сгоревшей лесной территории, что составляет от 1–2 до 5–7% от полного количества сгоревшей биомассы, в зависимости от типа и интенсивности лесного пожара

2. Аэрозольная дымовая эмиссия состоит из трех типов химических веществ:

а) минерально-почвенные вещества, либо захваченные восходящими потоками горячего воздуха с поверхности «горящей» почвы и горящих запыленных растений (железо, титан, кальций, кремний и др.) либо изначально входящие в состав сгоревшей биомассы (калий, кальций, цинк, бром и др.). Суммарная доля минерально-почвенных веществ составляет 3–15% от полной массы аэрозольной эмиссии;

б) органические вещества, характерные для химического состава растительности (термически разложившаяся целлюлоза, смолы, лигнины). Их суммарная доля составляет 60–90% от полной аэрозольной эмиссии;

в) элементный углерод (графит, сажа, black carbon) как результат глубокого обугливания органики, его доля составляет 7–15%.

3. Основная масса дымовой эмиссии (свыше 80%) заключена в частицах размерами менее 5–7 мкм (преимущественно менее 3 мкм). Эти частицы практически полностью состоят из органического вещества и элементного углерода (с примесью, менее 1%, калия в виде K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>).

Работы выполнялись при поддержке грантов CRDF RBI-2416-KY-02, NASA NRA-99-OES-06, ISTC 3695, а также РФФИ № 08-05-00083.

1. Conard S.G., Ivanova G.A. Wildfires in Russian boreal forest: Potential impacts of fire regime characteristics on emission and global carbon balance estimates // Environ. Pollut. 1997. V. 98. P. 305–313.
2. Cahoon D.R., Stocks B.J., Levine J.S., Cofer W.R., Pierson J.M. Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 18627–18638.
3. Куценогий К.П., Самсонов Ю.Н., Чуркина Т.В., Иванов А.В., Иванов В.А. Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах Центральной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 461–465.
4. Samsonov Yu.N., Koutsenogii K.P., Makarov V.I., Ivanov A.V., Ivanov V.A., McRae D.J., Conard S.G., Baker S.P., Ivanova G.A. Particulate emission from fires in central Siberian Scots pine forest // Can. J. Forest Res. 2005. V. 35. P. 2207–2217.
5. Самсонов Ю.Н., Куценогий К.П., Макаров В.И., Иванов А.В., Иванов В.А. Аэрозольная эмиссия при лесных пожарах в бореальных лесах Сибири // Аэрозоли Сибири (ред. К.П. Куценогий). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 260–281.
6. Дюхина Е.И., Беленко О.А. Определение размеров и морфологии грубодисперсной фракции аэрозолей на основе компьютерного анализа микроизображений // Оптика атмосфер. и океана. 2004. Т. 17. № 5–6. С. 517–520.
7. Ковальская Г.А. Элементный состав атмосферных аэрозолей в массовых единицах как функция типов почвы, подвергшейся ветровой эрозии // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 506–510.
8. Makarov V.I., Samsonov Y.N., Korolev V.V., Koutsenogii K.P. Measurements of the contents of organic and inorganic carbons, 3,4-benzo(a)pyrene, and dibutyl phthalate in atmospheric aerosols in West Siberia // Nucleation and Atmospheric Aerosols (eds. M. Kulmala and P.E. Wagner). London: Pergamon, 1996. P. 714–717.
9. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука, 1977. 237 с.
10. McRae D., Conard S., Ivanova G., Sukhinin A., Baker S., Samsonov Y., Blake T., Ivanov V., Churkina T., Hao W., Koutsenogii K., Kovaleva N. Variability of fire behavior, fire effects, and emissions in Scotch pine forests of central Siberia // Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change. 2006. V. 11. Netherlands: Springer. P. 47–74.
11. Levine J.S., Cofer W.R., Cahoon D.R., Winstead E.L., Stocks B.J., Krasovoc V.A., Mtetwa L. Gaseous and particulate emission from burning in the boreal forest // Disturbance in Boreal Forest Ecosystems: Human Impacts and Natural Processes (ed. S.J. Conard). Washington DC: USDA, 2000. P. 164–174.
12. Levine J.S., Cofer III W.R. Boreal forest fire emission and the chemistry of the atmosphere // Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest. V. 138. Ecological. Studies (eds. E.S. Kasischke and B.J. Stocks). N.Y.: Springer-Verlag, 2000. P. 31–48.
13. Pittcock A., Ackerman T., Crutzen P., MacCracken M., Shapiro C., Turco R. (Eds.) Environment Consequences of Nuclear War. V. 1. Physical and Atmospheric Effects. N.Y.: Wiley, 1986. P. 391.
14. Куст А.А. Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент: Фан, 1987. 236 с.
15. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1979. 423 с.
16. Goldammer J., Conard S., Ivanova G., Sukhinin A. The Bor Forest Island Fire Experiment // Biomass Burning and Global Change. V. 2 (ed. J.S. Levine). The MIT Press, 1996. P. 848–873.
17. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. М.: АН СССР, 1955. 349 с. (Глава 4).
18. Baron P., Willeke K. (Eds.) Aerosol Measurements: Principles, Techniques, and Applications. N.Y.: Wiley, 2001 (Chapter 10). P. 1131.

*Yu.N. Samsonov, S.A. Popova, O.A. Belenko, O.V. Chankina. Chemical composition and disperse characteristics of aerosol smoke emission from fires in boreal forests of Siberia.*

Total amounts of particulate emissions during a fire are estimated to be 0.2–1 t/ha from sampling conducted on experimental fires. This value represents 1–7% of the total biomass (15–25 t/ha) consumed during a typical forest fire in Siberia. Based on these data, one can estimate that 3–10 million tonnes of aerosol materials are emitted into the atmosphere from fires. Chemical composition analysis of the sampled smoke matters indicates that 3–15% are of mineral (soil) origin (Na, Si, Ca, K, Fe, Zn, and other 10–15 elements). The carbonaceous aerosols created due to incomplete biomass burning during combustion range from 60–90% of the total aerosol mass. The fraction of aerosols containing elemental carbon (graphite, soot, black carbon) is 7–15%. More than 80% of smoke emission consist of the aerosol particles with sizes less than 3 μm.