

Химический состав продуктов тлеющего горения древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) и лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), багульника болотного (*Ledum palustre*) и лишайника (*Cladonia sp.*)

С.А. Попова, В.И. Макаров*

Институт химической кинетики и горения СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 3

Поступила в редакцию 7.02.2011 г.

Представлены результаты измерения химического состава газоаэрозольной эмиссии при тлеющем горении четырех типов растительных материалов, распространенных в бореальных лесах Сибири, — сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*), лиственницы сибирской (*Larix sibirica*), багульника болотного (*Ledum palustre*) и лишайника (*Cladonia sp.*). Эксперименты проводили на лабораторно-стендовой установке. Выделяемая дымовая эмиссия сначала осаждалась на стекловолокнистом фильтре, а затем вымораживалась при минус 50 °С. Определение химического состава продуктов тлеющего горения лесных горючих материалов проводилось методом хромато-масс-спектрометрии. При горении сосны и лиственницы выделяются гваякол (2-метоксифенол) и его производные, смоляные кислоты и другие соединения. Сирингол (2,6-диметоксифенол) и его производные выделяются при горении багульника. Отмечено, что в дымовой эмиссии лишайника содержание левоглюкозана значительно выше, чем в других сжигаемых материалах. Выявлено, что 1–2% от сгоревшей массы лесного горючего материала поступает в атмосферу в виде аэрозольного вещества, примерно столько же составляют продукты горения в газообразном состоянии.

Ключевые слова: горение биомассы, тлеющее горение, газоаэрозольная эмиссия; biomass burning, smoldering combustion, gaseous products, particulate emission.

Введение

Горение биомассы является мощным источником загрязнения окружающей среды. По некоторым данным, из разных источников горения, включая дикие пожары и контролируемые выжигания, в атмосферу поступает до 20–40% по массе высокодисперсного аэрозоля [1, 2]. Выделяемая при горении биомассы дымовая эмиссия может влиять на химические, оптические, микрофизические и радиационные свойства атмосферы, на процессы облакообразования [3–6]. Лесные пожары являются главным фактором, вносящим существенные изменения в лесные экосистемы и разные биологические среды (почва, вода, растения). Кроме того, эпидемиологические исследования показывают связь между массовой концентрацией высокодисперсного аэрозоля с уровнем заболеваемости [1]. В России сосредоточено около 23% лесов планеты, из них примерно 40% находятся в Сибири [7]. По оценкам

[8, 9], ежегодно на территории России пожарами охвачено свыше 10 млн га бореальных лесов, в результате в атмосферу выделяется 3–10 млн т аэрозольного вещества.

Химический и дисперсный состав газоаэрозольной эмиссии оценивается при проведении натурно-модельных пожарных опытов, когда определенная площадь (один или несколько участков) исследуемой экосистемы подвергается контролируемому выжиганию в реальных условиях [8, 10], и при отборе атмосферного воздуха в период пожаров [2, 11]. При лесных пожарах, когда горят растительный покров, подстилка и почвенный гумус, трудно сделать вывод о связи исходного состава лесных горючих материалов (ЛГМ) с химическим составом образующейся эмиссии, так как мощность и состав продуктов горения зависят от типа горючего материала, режима горения, метеорологических условий и т.д. Поэтому возникает необходимость в проведении экспериментов по горению индивидуальных растительных материалов.

Подобные эксперименты проводятся при сжигании ЛГМ в каминах жилых домов или в лабораторных камерах, где высота от подложки (основа-

* Светлана Анатольевна Попова (popova@kinetics.nsc.ru); Валерий Иванович Макаров (makarov@kinetics.nsc.ru).

ние) с горючим материалом до вытяжного отверстия может достигать 18 м, либо на открытых огороженных участках. Технические особенности отбора образцов при горении ЛГМ и сведения о химическом составе продуктов горения разных типов растительности (дуб, миндаль, сосна, эвкалипт и др.) описаны в работах [1, 3, 10, 12].

В работе [13] проводилось исследование химического состава дымовой эмиссии сосны (*Pinus ponderosa*) и тополя (*Populus trichocarpa*), образующейся при тлеющем горении на лабораторно-стендовой установке. В отличие от экспериментов в [3, 10, 12], выделяемая дымовая эмиссия при горении полностью вымораживалась при минус 50 °С без разделения на газовую и аэрозольную фазы. Цель наших исследований состояла в получении количественных данных о химическом составе газо-аэрозольной эмиссии при тлеющем горении некоторых ЛГМ, характерных для лесных экосистем Центральной Сибири, часто подвергающихся диким пожарам. Эксперименты проводили на модернизированной лабораторно-стендовой установке, описанной в [13].

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовались растения, широко распространенные в бореальных лесах Сибири. Багульник болотный является повсеместным растением травяно-кустарничкового яруса, напочвенный покров представлен лишайником, лишайница сибирская и сосна обыкновенная — представители древесной растительности. Подготовка растительного сырья заключалась в измельчении побегов и листьев багульника, лишайника, а также древесины сосны и лишайницы до однородного порошкообразного состояния с частицами размером менее 3 мм. Затем измельченные образцы ЛГМ высушивались на воздухе или в сушильном шкафу при температуре не выше 60–70 °С в течение 8 ч.

На рис. 1 представлена схема лабораторно-стендовой установки, на которой проводился отбор продуктов тлеющего горения ЛГМ. Она состоит из керамической чашки 1, электронагревательной спирали 2, термопары 3, стеклянной воронки 4, фильтродержателя 5, двух кварцевых ловушек 6, ротаметров 7, 8 и термостата 9.

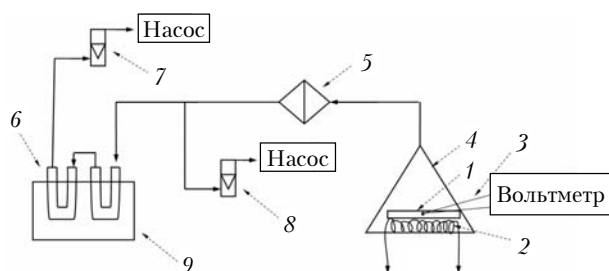


Рис. 1. Схема лабораторно-стендовой установки

Высушенная и размельченная навеска ЛГМ массой 15–20 г помещалась в керамическую чашку

диаметром 10 см и высотой 1 см. Под чашкой располагаются нихромовые спирали 2, обеспечивающие нагрев образца до температуры тлеющего горения (300–500 °С). Режим тлеющего горения образца поддерживался изменением напряжения, подаваемым на спирали.

Температура процесса горения измерялась хромель-алюмелевой термопарой 3. Образующиеся продукты горения ЛГМ сначала прокачиваются насосом с объемной скоростью 12 л/мин через стекловолоконный фильтр, который закреплен в фильтродержателе 5, где происходит улавливание дисперсной фазы. Далее часть потока с объемной скоростью 1 л/мин поступает в U-образные кварцевые трубки — ловушки 6, которые находятся в жидкостном термостате с температурой минус 50 °С. В термостате происходит вымораживание образующихся при горении органических соединений, прошедших через фильтр.

В течение всего времени горения ЛГМ на стенках стеклянной воронки образуется конденсат в виде капель коричневого цвета. Объемная скорость прососа контролировалась ротаметрами. Массу сгоревшего ЛГМ определяли по результатам взвешивания керамической чашки до и после эксперимента. Таким образом, в ходе эксперимента были получены образцы аэрозольной (осадок на стекловолоконном фильтре и капли на стеклянной воронке) и газовой (бесцветная жидкость в газовых ловушках) фаз дымовой эмиссии.

После окончания опыта капли на внутренней поверхности стеклянной воронки и жидкость в кварцевых ловушках экстрагировали дихлорметаном в отдельные колбы, стекловолоконный фильтр помещали в стеклянную емкость с 2 мл дихлорметана на 24 ч. Затем полученные экстракты конденсата и осадка аэрозольного фильтра фильтровали и выпаривали до 1 мл. Две последовательно соединенные кварцевые ловушки смывались отдельно, что позволяло оценить степень криогенного улавливания разных соединений. Показана высокая степень улавливания, так как в первой ловушке количество определенных веществ составляло 94–98% по сравнению со второй. Нужно отметить, что содержание оксида и диоксида углерода в газовой фазе не определяли.

Анализ полученных экстрактов проводили на хромато-масс-спектрометре HP 6890N/5973N (Agilent Technologies, USA). Для хроматографического разделения проб использовали капиллярную колонку HP-5MS ((5%)-дифенил-(95%)-диметилсилоксан) длиной 30 м и внутренним диаметром 0,25 мм с толщиной пленки 0,25 мкм. Температуру колонки программировали от 50 °С (3 мин) со скоростью 5 град/мин до 250 °С (15 мин). Температура испарителя 250 °С. Расход газа-носителя (гелий) 1 мл/мин.

Ввод пробы осуществляли без деления потока. Объем вводимой пробы 1 мкл. Масс-спектры получали методом электронного удара при энергии ионизирующих электронов 70 эВ. Идентификация соединений проводилась с использованием электронной библиотеки масс-спектров NIST-02. В качестве

внешнего стандарта использовался раствор бензофенона в гексане. Для оценки присутствия возможных примесей в образцах при тех же аналитических условиях были измерены пробы растворителя (дихлорметан) и экстракт чистого стекловолоконного фильтра в дихлорметане.

Результаты и обсуждение

Экспериментально показано, что при тлеющем горении сосны, лиственницы, багульника и лишайника аэрозольная эмиссия по массе составляет 1–2% от сгоревшего растительного материала и примерно столько же переходит в газовую фазу, которая определяется суммой веществ, полученных при криогенном концентрировании в охлаждаемых кварцевых трубках (рис. 2).

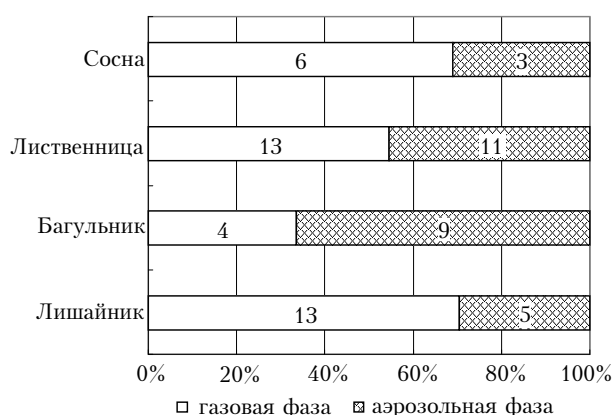


Рис. 2. Коэффициенты эмиссии (мг/г) суммы идентифицированных веществ в газовой и аэрозольной фазах

Отметим, что газовую фазу составляют низкомолекулярные органические вещества, конденсация которых проходит при низких температурах (таблица).

Широкий диапазон обнаруженных соединений и существенные различия в составе продуктов тлеющего горения разных ЛГМ показаны в таблице. Известно, что главными составными частями древесины являются целлюлоза, лигнин и гемицеллюлозы [14]. Целлюлоза и гемицеллюлозы состоят из углеводных фрагментов, а лигнин — из ароматических, поэтому при термической деструкции этих биополимеров образуются различные по химическому составу продукты. Лигнин — основной биополимер древесины, состоящий из трех мономеров: 3-метоксигидроксикоричного (кониферилового), 3,5-диметокси-4-гидроксикоричного (синапового) и *n*-гидроксикоричного (*n*-кумарового) фенолоспиртов. В ряде работ [3, 12] показано, что пропорции этих биомономеров варьируются в зависимости от типа растения. В частности, в работе [3] представлено распределение метоксифенолов как основных продуктов термической деструкции лигнина. Делается предположение, что присутствие в эмиссии продуктов горения гваякола и его производных (заместители в 4-м положении) характерно для древесины хвойных пород, сирингола и его производных — для древесины лиственных пород.

Как видно из таблицы, при тлеющем горении хвойной древесины выделяются только гваякол и его производные. В продуктах горения багульника выделяются и гваякол, и сирингол, и их производные, но в разных пропорциях. Обнаружено, что в эмиссии багульника сирингола в 2,5 раза больше,

Состав дымовой эмиссии разных типов ЛГМ

Вещество	Относительное содержание *			
	Лишайник	Багульник	Лиственница	Сосна
Propanoic acid, 2-oxo-, methyl ester	0,86 (z)	0,62 (z)	0,83 (z)	2,0 (z)
1,2-Cyclopentanedione	0,30 (z)	0,22 (z)	0,26 (z)	1,3 (z)
Furfural	11,3 (z)	10,6 (z)	2,8 (z)	6,9 (z)
2(5H)-Furanone	0,78 (z)	н.о.	0,67 (z)	1,8 (z)
Ethanone, 1-(2-furanyl)-	1,2 (z)	н.о.	0,18 (z)	0,31 (z)
2-Furanmethanol	2,3 (z)	1,7 (z)	0,88 (z-a)	0,55 (z)
2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl-	3,2 (z)	1,3 (z)	0,27 (z)	3,2 (z)
2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)-	1,0 (a)	1,0 (a)	1,0 (a)	1,0 (a)
5-Acetoxyethyl-2-furaldehyde	0,30 (a)	н.о.	0,06 (a)	0,10 (z-a)
Phenol, 2-methoxy- (Гваякол)	н.о.	0,66 (z-a)	0,59 (z-a)	5,6 (z)
Phenol, 2-methoxy-4-methyl-	н.о.	0,13 (z-a)	0,45 (z-a)	2,8 (z)
Phenol, 2-methoxy-4-(2-propenyl)-	н.о.	1,2 (a)	0,37 (a)	0,073 (a)
1,4-Benzenediol, 2-methoxy-	н.о.	0,07 (a)	0,22 (a)	0,076 (a)
4-Hydroxy-3-methoxybenzaldehyde (Vanillin)	н.о.	0,68 (a)	0,93 (a)	1,6 (a)
Benzeneacetic acid, 4-hydroxy-3-methoxy-	н.о.	н.о.	0,82 (a)	0,89 (a)
Ethanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	н.о.	1,4 (a)	0,29 (a)	1,04 (a)
2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-	н.о.	0,43 (a)	0,16 (a)	0,26 (a)
Phenol, 2,6-dimethoxy- (Сирингол)	н.о.	2,5 (a)	0,03 (a)	н.о.
Phenol, 2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-	н.о.	1,2 (a)	н.о.	н.о.
Benzaldehyde, 4-hydroxy-3,5-dimethoxy-	н.о.	2,3 (a)	н.о.	н.о.
3,5-Dimethoxy-4-hydroxyphenylacetic acid	н.о.	0,92 (a)	н.о.	н.о.

Вещество	Относительное содержание *			
	Лишайник	Багульник	Лиственница	Сосна
Ethanone, 1-(4-hydroxy-3,5-dimethoxyphenyl)-	н.о.	1,8 (a)	н.о.	н.о.
1,2-Benzenediol	н.о.	2,2 (a)	0,23 (a)	н.о.
1,2-Benzenediol, 4-methyl-	н.о.	0,33 (a)	0,004 (a)	0,015 (a)
4-Hydroxy-2-methoxycinnamaldehyde	н.о.	н.о.	1,1 (a)	1,6 (a)
3-Hydroxy-4-methoxybenzoic acid	н.о.	0,45 (a)	0,27 (a)	1,6 (a)
Pimaric acid	н.о.	н.о.	0,18 (a)	0,24 (a)
Dehydroabietic acid	н.о.	н.о.	0,19 (a)	2,4 (a)
7-Oxodehydroabietic acid, methyl ester	н.о.	н.о.	0,02 (a)	0,58 (a)
4-Epiabietic acid, dehydro- (Callitrisic acid)	н.о.	н.о.	н.о.	3,6 (a)
Phenanthrene, 1-methyl-7-(1-methylethyl)- (Reten)	н.о.	н.о.	0,002 (a)	0,14 (a)
1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glucopyranose	1,3 (a)	0,15 (a)	0,11 (a)	0,42 (a)
1,6-Anhydro-.beta.-D-glucopyranose (Levoglucozan)	4,8 (a)	2,7 (a)	0,51 (a)	0,41 (a)
4H-Pyran-4-one, 3-hydroxy-2-methyl- (Maltol)	0,14 (a)	0,33 (a)	0,08 (a)	0,033 (a)
4H-Pyran-4-one, 2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6-methyl-	0,24 (a)	0,11 (a)	0,05 (a)	0,063 (a)
4H-Pyran-4-one, 3,5-dihydroxy-2-methyl-	0,16 (a)	н.о.	0,047 (a)	0,055 (a)
Palustrol	н.о.	2,7 (a)	н.о.	н.о.
Ledol	н.о.	1,5 (a)	н.о.	н.о.
n-Hexadecanoic acid	0,54 (a)	4,6 (a)	0,27 (a)	0,58 (a)
Octadecanoic acid	0,17 (a)	1,8 (a)	0,067 (a)	0,058 (a)
Linoleic acid	0,23 (a)	н.о.	0,02 (a)	н.о.
Oleic acid	0,58 (a)	1,0 (a)	0,06 (a)	н.о.
Nonacosane	н.о.	2,9 (a)	н.о.	н.о.
Общее, % **	81	79	83	81

* Посчитано относительно 2-Furancarboxaldehyde, 5-(hydroxymethyl)- (концентрация этого вещества взята за единицу). В эмиссии лишайника концентрация его равна 22 мг/м³, багульника – 8,9 мг/м³, лиственницы – 65 мг/м³, сосны – 2,4 мг/м³; z – вещества, обнаруженные в ловушках; a – вещества, обнаруженные в аэрозольной фазе; z-a – вещества, обнаруженные в ловушках и аэрозольной фазе; н.о. – не обнаружено в пробе.

** Сумма обнаруженных соединений (%) от общей эмиссии.

чем гваякола и его производных. Полученные нами данные подтверждают выводы, представленные в работе [3], о распределении метоксифенолов относительно типа древесины, а именно: что в древесине лиственных пород преобладают производные сирингола, а в хвойной – гваякола. Отсутствие в продуктах горения лишайника ароматических и фенольных соединений можно объяснить тем, что в составе клеточных стенок грибов и водорослей, входящих в его состав, отсутствует лигнин.

Из результатов опытов следует, что основным продуктом термического разложения (> 300 °С) целлюлозной биомассы является левоглюкозан, который в значительном количестве содержится в продуктах горения лишайника. Левоглюкозан при горении испаряется и последовательно конденсируется и/или адсорбируется на уже существующие высокодисперсные частицы, чья суммарная площадь поверхности на единицу веса больше, чем грубодисперсная частица. Следует отметить, что одним из доминирующих компонентов дымовой эмиссии является фурфурол, который тоже относится к продуктам разложения целлюлозы [13].

Смоляные кислоты являются природными продуктами и биосинтезируются, главным образом,

хвойными деревьями. Эти соединения находятся преимущественно в смоле хвойной древесины и не содержатся в эпитикулярном воске, поэтому являются специфическими трассерами хвойной растительности. Обнаружены только в продуктах горения лиственницы и сосны. Поступление смоляных кислот в атмосферу, по-видимому, обеспечивается непосредственно при испарении (пимаровая, абиетиновая кислоты) или пиролизическом синтезе (дегидроабиетиновая кислота) в процессе горения [1]. Из полиароматических соединений в аэрозольных продуктах горения древесины сосны и лиственницы обнаружен ретен.

Присутствие в продуктах горения ЛГМ n-алканов и алкановых кислот объясняется их наличием в эпитикулярном воске, и, предположительно, высокая температура приводит к испарению этих соединений, которые могут затем конденсироваться в аэрозольную фазу. Отметим, что в количественном отношении треть эмиссии составляют продукты пиролиза лигнина, треть – термического разложения целлюлозы, остальную часть эмиссии составляют продукты природного происхождения, которые при высокой температуре испаряются и конденсируются на уже существующие частицы.

Заклучение

Созданная видоизмененная лабораторно-стендовая установка позволяет проводить отбор образцов в режиме тлеющего горения ЛГМ в аэрозольной и газовой фазах. Определено, что при тлеющем горении сосны, лиственницы, багульника и лишайника аэрозольная эмиссия по массе составляет 1–2% от сгоревшего растительного материала и столько же переходит в газовую фазу.

Получены сведения о химическом составе газо-аэрозольной эмиссии при тлеющем горении различных растительных материалов методом хромато-масс-спектрометрии. Наблюдаются существенные различия в составе эмиссии при сжигании разных материалов. Например, при горении сосны и лиственницы выделяются гваякол (2-метоксифенол) и его производные, гомо- и изованилиновая кислоты и другие соединения, а также смоляные кислоты. Сирингол (2,6-диметоксифенол) и его производные выделяются при горении багульника.

Отсутствие в продуктах горения лишайника ароматических соединений можно объяснить тем, что в составе клеточных стенок грибов и водорослей, входящих в его состав, отсутствует лигнин. Показано высокое содержание левоглюкозана в дымовой эмиссии лишайника по сравнению с другими сжигаемыми материалами.

Данные результаты могут быть использованы: для оценки газоаэрозольной эмиссии при лесных пожарах на основании данных по запасам лесных горючих материалов и степени их сгорания, для прогнозирования возможных путей фотохимических превращений в атмосфере, а также для оценки влияния на окружающую среду, в том числе и на здоровье человека.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов МНТЦ № 3695 и РФФИ № 08-05-00083.

1. Hays M.D., Geron C.D., Linna K.J., Smith N.D., Schauer J.J. Speciation of gas-phase and fine particle emissions from burning of foliar fuels // Environ. Sci. and Technol. 2002. V. 36, N 11. P. 2281–2295.
2. Yan B., Zheng M., Hu Y.T., Lee S., Kim H.K., Russell A.G. Organic composition of carbonaceous aerosol in an aged prescribed fire plume // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 12. P. 6381–6394.

S.A. Popova, V.I. Makarov. Chemical composition of smoldering combustion products of pine tree (*Pinus sylvestris*) and siberian larch (*Larix sibirica*) wood, marsh tea (*Ledum palustre*) and lichen (*Cladonia sp.*).

Results of the chemical composition measurement of gaseous products and particulate matter upon smoldering combustion of dominating vegetation of Siberian boreal forest (pine tree (*Pinus sylvestris*), Siberian larch (*Larix sibirica*), marsh tea (*Ledum palustre*), and lichen (*Cladonia sp.*)), are presented. Experiments were conducted using a laboratory setup. The smoke emitted was first deposited on a glass-fiber filter and then frozen out by cooling at -50°C . The chemical composition of the smoldering combustion products of forest materials was determined by gas chromatography/mass spectrometry method. Guaiacol (2 methoxyphenol) and its substitutes, resin acids and other compounds are emitted by the smoldering combustion of pine tree and Siberian larch. Syringol (2,6-dimethoxyphenol) and its substitutes are emitted by marsh tea burning. The content of levoglucosan in lichen smoke emission is shown to be much higher than that of other burned materials. It has been established that 1–2% of the burned wood combustible materials enter the atmosphere as particulate emission and the same is the portion of gaseous products.

3. Simoneit B.R.T., Rogge W.F., Mazurek M.A., Standley L.J., Hildemann L.M., Cass G.R. Lignin pyrolysis products, lignans, and resin acids as specific tracers of plant classes in emissions from biomass combustion // Environ. Sci. and Technol. 1993. V. 27, N 12. P. 2533–2541.
4. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Шмаргунов В.П. Вариации оптических постоянных и спектра размеров дымовых аэрозолей, образованных при термическом разложении разнородных древесных материалов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 248–258.
5. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Козлов В.С. Влияние коры древесных материалов на оптико-микроразлические свойства пиролизных дымов // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 5. С. 412–418.
6. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.В. Оптико-микроразлические свойства смешанных дымов от нескольких разнесенных источников // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 675–683.
7. Долгодворова С.Я., Черняева Г.Н. Биологические ресурсы лесов Сибири. Красноярск: Институт леса и древесины СО РАН, 1980. С. 137–143.
8. Самсонов Ю.Н., Беленко О.А., Иванов В.А. Дисперсные и морфологические характеристики дымовой аэрозольной эмиссии от пожаров в бореальных лесах Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 6. С. 423–431.
9. Аэрозоли Сибири /Под ред. К.П. Куценого. Новосибирск: СО РАН, 2006. С. 548.
10. Mazzoleni L.R., Zielinska B., Moosmüller H. Emissions of levoglucosan, methoxy phenols, and organic acids from prescribed burns, laboratory combustion of wildland fuels, and residential wood combustion // Environ. Sci. and Technol. 2007. V. 41, N 7. P. 2115–2122.
11. Wang G., Kawamura K., Xie M., Hu S., Cao J., An Z., Watson J.G., Chow J.C. Organic molecular compositions and size distributions of Chinese summer and autumn aerosols from Nanjing: characteristic haze event caused by wheat straw burning // Environ. Sci. and Technol. 2009. V. 43, N 17. P. 6493–6499.
12. Schauer J.J., Kleeman M.J., Cass G.R., Simoneit B.R.T. Measurement of emissions from air pollution sources. 3. C_1 – C_{29} organic compounds from fireplace combustion of wood // Environ. Sci. and Technol. 2001. V. 35, N 9. P. 1716–1728.
13. Edye L.A., Richards G.N. Analysis of condensates from wood smoke: components derived from polysaccharides and lignins // Environ. Sci. and Technol. 1991. V. 25, N 6. P. 1133–1137.
14. Никитин Н.И. Химия древесины и целлюлозы. М.: Л., 1962. 711 с.