

К.П. Куценогий, Ю.Н. Самсонов, Т.В. Чуркина¹, А.В. Иванов¹, В.А. Иванов

Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах Центральной Сибири

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

Поступила в редакцию 4.01.2003 г.

Методом рентгеновского флуоресцентного анализа с использованием синхротронного излучения (метод РФА СИ) исследован микроэлементный (минеральный) состав аэрозольной эмиссии в атмосферу вследствие пожаров в бореальных лесах Сибири. Обнаружены и количественно измерены аэрозольные концентрации около 20 химических элементов с атомными номерами от калия и выше. Оценена суммарная доля минеральных компонентов (5–10%) в полной аэрозольной эмиссии. Оценены величины как полной, так и минеральной аэрозольной эмиссии при горении бореальных лесов в Сибири.

Введение

Химические элементы, такие как железо, кальций, калий, молибден и многие другие, являются составной частью атмосферных аэрозолей. Большинство из них входит в общий состав аэрозолей в виде весьма малой примеси, так что к ним применимо условное название «микроэлементы». Их основным источником, применительно к континентальным территориям Западной и Центральной Сибири, является почвенно-эрозионная эмиссия, возникающая вследствие выветривания поверхностных почвенных слоев. Химический состав аэрозольных частиц, таким способом попавших в атмосферу, отражал бы как минеральные, так и дисперсные характеристики вышеуказанных почв. Эти частицы могли бы почти полностью состоять из минеральных элементов (в отличие от частиц, названных выше «микроэлементы»).

Такие минеральные частицы действительно существуют в атмосфере, и они являются объектами для исследования их микроструктурных (морфологических) и химических характеристик, например с помощью рентгеновского или протонного микроанализаторов [1, 2]. Однако следует учитывать, что атмосферные аэрозоли — это смесь частиц различного химического и дисперсного происхождения, попавших в атмосферу и взаимно трансформирующихся в ходе разного рода метеофизических и химических процессов. В результате частицы почвенно-минерального происхождения могут составлять относительно небольшую долю от общей массы атмосферных аэрозолей.

Другим источником поступления микроэлементных веществ в атмосферу является аэрозольная эмиссия, возникающая при обширных лесных пожарах, регулярно происходящих в летний период на территории Сибири (около 10 млн га ежегодно). Микроэлементы выносятся в атмосферу восходя-

щими конвективными потоками горячего воздуха (дыма) в виде тонкодисперсных частичек лесной почвы, подвергнутой интенсивному прогреву как во время прохождения пламенного фронта, так и при последующем тлеющем горении горючих материалов (трава, лишайник, мох, кустарник, деревья). Помимо частиц, переходящих в атмосферу во время лесного пожара непосредственно с поверхности почвы, часть аэрозольной эмиссии минерального происхождения связана с запыленностью поверхности лесных растений. Пыль на растениях может накапливаться в течение длительного времени до возникновения лесного пожара, причем особенно интенсивно в засушливый период. В принципе, процесс длительной аккумуляции пылинок на поверхности растений мог бы привести к некоторой селекции пылинок по их дисперсному и химическому составу по сравнению с составом исходной почвы. При горении растений эти минеральные пылинки попадают в атмосферу.

Некоторые из химических элементов могут в заметных количествах входить в природный химический состав самого растительного материала. Например, калий является жизненно важным элементом для функционирования растительных клеток. При сгорании растительной массы эти элементы частично остаются в зольном остатке, но частично проявляются в виде аэрозольной эмиссии.

Высокотемпературный прогрев лесной почвы во время лесных пожаров существенно изменяет исходный химический состав почвенных частичек, приводя к «выгоранию» (термодеструкции) содержащихся в них органических (гумусных) веществ. Такие аэрозольные частицы будут в большей степени минерализованными, чем исходная лесная почва [3]. С другой стороны, при собственном горении горючих материалов происходит интенсивная эмиссия частиц, состоящих из исходного растительного (древесного) органического материала (целлюлоза,

гемицеллюлоза, лигнин и т.п.), но подвергнутого высокотемпературному пиролизу, окислению, термической возгонке и конденсации. Очевидно, что такие частицы будут в основном являться углеродсодержащими аэрозолями. Таким образом, суммарная «пожарная» аэрозольная эмиссия является смесью частиц как минерального, так и органического происхождения. Эта смесь могла быть весьма специфичной для лесных пожаров, существенно отличающейся по концентрации, дисперсному и химическому составу от обычных атмосферных аэрозолей. Конечно, эти различия могут быть наиболее заметными в непосредственной близости от лесного пожара до тех пор, пока «пожарные» аэрозоли не перемешаются с другими атмосферными частицами или не претерпят физические и химические трансформации, изменяющие их первичный химический состав.

В данной статье приведены сведения о содержании микроэлементных (минеральных) веществ, измеренных в аэрозольных пробах, отобранных летом 2000–2002 гг. во время лесных пожаров в Красноярском крае.

Методы отбора аэрозольных проб и определения микроэлементов

Исследования проводились на лесном полигоне Института леса СО РАН (г. Красноярск), расположенном в 700 км к северу от Красноярска. Полигон представлял собой изолированный лесной участок размером примерно 3×2 км, который со всех сторон окружен болотами. Этот «остров» был разбит на отдельные площадки размером 200×200 м, причем по границам между ними были устроены защитные противопожарные препятствия (канавы, песчаные полосы, вырубка кустарника и молодой поросли). Несколько таких площадок предназначалось для их контролируемого выжигания, т.е. для натурной имитации лесных пожаров (суммарно были выжжены 11 площадок за период 2000–2002 гг.).

Выжигание проводилось после выполнения подготовительных мероприятий, включая количественную оценку исходного запаса горючих материалов и установку измерительной аппаратуры в 49 позициях по территории площадки (в виде сетки 25×25 м). В состав измерительной аппаратуры входили устройства для регистрации скоростей и направления движения фронта огня по площадке, а также термопарные измерители температуры пламени на пяти высотных уровнях, от наземного и до высоты 10 м от поверхности земли. Текущая информация с этих датчиков во время пожара передавалась в численном виде на запоминающие электронные устройства (даталоггеры), укрытые от перегрева слоем земли, с последующей перезаписью для постоянного хранения и обработки полученных данных.

Для визуализации процесса продвижения огня использовалась видеокамера, помещенная в теплозащитный кожух и установленная непосредственно

в зоне лесного горения. С вертолета, «зависающего» на высоте 1000 м над горящим участком, проводилась инфракрасная регистрация пожара, позволяющая следить, несмотря на сильную задымленность, за продвижением фронта огня и за последующим догоранием в тыловой части пожара.

Отбор аэрозольных проб в наземных условиях проводился у боковой кромки горящего участка прокачиванием задымленного воздуха через аэрозольные фильтры типа АФАХА (скорость прокачки 20 л/мин, время прокачки 2–10 мин, высота отбора проб 0,5–1 м от земли). Для прокачки дыма через фильтры использовалась пневмопомпа, работающая от портативного электрогенератора 220 В. Помимо этого производился забор аэрозольных проб на фильтры во время пролета вертолета на высоте 100–200 м через дымовой шлейф с подветренной стороны горящего лесного участка. Электропитание помпы с объемной скоростью прокачки 100 л/мин (время прокачки ~ 1–2 мин) осуществлялось от бортовой сети вертолета (постоянный ток 24 В).

Аэрозольные фильтры АФАХА представляют собой кружки диаметром 70 мм (рабочий диаметр около 50 мм, рабочая площадь фильтра 20 см²), выполненные из тонковолокнистого полимерного материала. Перед проведением экспериментов все фильтры (включая фильтры, используемые для контрольного сравнения) в течение 5–7 дней высушивались в герметичном стеклянном эксикаторе над слоем гранул свежeproкаленного цеолита типа NaX до достижения фильтрами постоянной массы. Взвешивание фильтров производилось в закрытой пластиковой чашке Петри для предотвращения обратного увлажнения фильтров на открытом воздухе. После завершения отборов аэрозольных проб и возвращения фильтров в лабораторию вышеуказанные процедуры «просушивания и взвешивания» фильтров (включая контрольные экземпляры) повторялись вновь. Таким образом определялись привесы фильтров, связанные с осаждением аэрозолей из прокачиваемого задымленного воздуха. Эти привесы составляли ~ 1–10 мг в зависимости от интенсивности задымления и времени прокачки дыма. Измерения столь малых величин привесов, во-первых, требовали тщательного выполнения вышеуказанных процедур «просушивания и взвешивания» и, во-вторых, содержали в себе источник значительных экспериментальных погрешностей при определении относительного содержания (концентрации) микроэлементных и других веществ в аэрозольной эмиссии.

Количественное содержание химических элементов в аэрозолях, осевших на фильтрах, определялось методом рентгеновской флуоресценции с использованием синхротронного излучения в качестве рентгеновского источника (метод РФА СИ [4, 5]). Этим методом регистрировались химические элементы с атомными номерами, начиная с калия и выше. Чувствительность метода РФА СИ к разным элементам исследовалась в разных вариантах и варьировалась от ~ 0,05–0,1 мкг/см² для кальция

или калия до ~0,0004–0,001 мкг/см² для стронция, циркония или молибдена (здесь чувствительность выражена как минимально регистрируемое количество элемента, нормированное на единичную площадь фильтра, т.е. в виде поверхностной концентрации исследуемого элемента). В тех случаях когда экспериментальное измерение номинально давало величину поверхностной концентрации, существенно меньшую вышеуказанного предела, то этому измерению принудительно приписывалось нулевое значение. Такая процедура позволяла исключать из рассмотрения измерения с недостаточной надежностью полученных данных, что было крайне важно в случае их среднегеометрического усреднения.

Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены данные о содержании ряда химических элементов на фильтрах, отобранных в наземных условиях в натуральных пожарных экспериментах 2001 г. В экспериментах 2000 и 2002 гг.

были получены данные, весьма схожие с результатами 2001 г., и поэтому они не представлены здесь в виде отдельных таблиц. Применительно к целям данной статьи содержания элементов в табл. 1 показаны в виде их объемных концентраций в задымленном воздухе, прокачиваемом через фильтры.

Для вычисления этих объемных концентраций использовались, помимо определяемых методом РФА СИ вышеупомянутых поверхностных концентраций, дополнительные данные о количестве прокачиваемого через фильтры дыма. Эти данные опущены в статье, однако в табл. 1 приведены рассчитанные по ним концентрации аэрозольной эмиссии элементов (в том числе полная массовая концентрация аэрозольного вещества C_0) в каждом отдельном отборе аэрозольной пробы, характеризующейся в таблице номером экспериментального фильтра (при проведении экспериментов составлялся специальный реестр фильтров, содержащий характеристики горящих растительных материалов, условий горения, скорость и время прокачки).

Таблица 1

Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии после лесных пожаров (наземный отбор аэрозолей, опыты 2001 г.)

Полная массовая концентрация аэрозолей C_0 и парциальные концентрации химических элементов, мкг/м ³																	
Номер фильтра	C_0	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	As	Se	Br	Rb	Sr	Zr	Mo	Pb
1	30800	445	72	5,9	0	6,0	27,9	0,52	11,1	0	0,23	4,3	2,2	0,14	0	0	2,5
2	33300	416	37	0	0	2,1	11,6	0	15,1	0,31	0,34	23,7	1,5	0	0	0	0,5
4	14700	141	129	14,7	0	5,0	24,1	0	3,8	0	0	0,5	0,8	0,08	0	0	2,4
5	243900	85	139	0	0	9,5	25,4	0,32	4,9	0	0	0,6	0,2	0,49	0,38	0	0,9
6	35700	439	54	0	5,0	0,4	22,5	1,04	6,1	0	0	2,6	1,8	0,06	0	0,25	3,1
7	38500	233	100	2,1	1,9	11,0	49,2	0,31	3,3	0,94	0	0,8	0,9	0,14	0	0,09	0
9	30000	23	39	0	1,7	0,3	7,5	0,02	0	0,12	0	0,5	0	0,05	0,04	0,05	0,2
10	78100	144	53	0	5,6	3,8	33,1	0	0	0	0	0,4	0	0,13	0	0,38	1,0
12	43500	113	174	10,9	7,4	2,2	28,3	0	0	0	0	5,6	0	0	0	0,45	3,6
15	35700	270	70	29,3	1,4	6,4	18,9	0	1,6	0,16	0	1,3	1,9	0,27	0,06	0	0,8
16	76900	915	46	0	7,7	0	69,2	1,77	2,3	0,85	0	5,8	4,8	0,09	0,17	0,85	3,7
17	37700	455	38	0	0	2,3	10,0	0	14,5	0	0,26	2,3	1,8	0	0	0	1,3
20	22000	88	70	1,8	2,6	19,6	9,5	0,11	0	0	0	0,2	0,3	0,10	0	0	1,0
21	37000	106	25	0	0	1,2	17,5	0	0,7	0	0	0,6	0,4	0	0	0	0
23	63800	25	102	14,5	11,9	8,5	24,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	42100	185	61	3,0	0	4,6	11,4	0	1,7	0,27	0,13	0,9	0,8	0,03	0	0,12	0,7
27	56600	25	34	0	0	0	16,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	29100	206	274	16,5	5,2	10,9	13,4	0	2,7	0,8	0	0,4	0,6	0,20	0	0	0
29	76200	30	53	6,5	0	6,1	12,4	0	0,2	0,7	0,06	0,5	0,1	0,42	0,38	0	0,1
32	50000	205	65	0	8,5	0	5,0	0	1,5	0,35	0,25	1,1	0,8	0	0	0,27	0,9
34	31900	364	311	12,8	5,3	25,7	19,6	0	6,2	0	0	2,3	1,1	0,61	0	0	0,9
45	32800	398	39	0	0	1,5	9,2	0	2,6	0	0	0,4	1,6	0	0	0	0
46	30000	619	49	1,8	0	9,0	4,1	0,24	5,7	0	0,09	1,9	2,8	0,11	0,06	0	0,8
47	20800	54	94	0	1,9	5,6	7,1	0,08	0	0	0,13	0,2	0,2	0,15	0	0	0,6
48	15400	54	77	0	0	8,9	12,0	0	0,6	0	0	0	0,1	0,17	0	0	0
51	48200	22	29	1,7	2,2	0	6,0	0,27	0	0	0	0,1	0,2	0	0,1	0	0,7
52	111100	83	10	2,9	0	1,0	15,6	0	0	0	0	0,3	0,5	0,18	0	0	1,5
56	74400	815	142	8,9	3,5	12,2	13,4	0,13	6,9	0,23	0,10	2,4	3,0	0,20	0	0,15	0,9
57	40000	685	125	0	0	12,0	15,6	0,37	5,3	0	0,05	3,6	3,5	0,20	0,10	0,04	1,4
58	29800	412	17	3,9	0	1,8	8,2	0,33	5,3	0	0,12	4,9	1,7	0	0	0	2,6
Среднее значение	50300	268	86	4,6	2,4	5,9	18,3	0,18	3,3	0,16	0,06	2,3	1,1	0,13	0,04	0,09	1,1
Стандартное отклонение	42500	248	70	7,0	3,2	6,1	13,7	0,37	4,1	0,29	0,10	4,4	1,2	0,15	0,10	0,19	1,1
Ошибка среднего значения	7800	45	13	1,3	0,6	1,1	2,5	0,07	0,8	0,06	0,02	0,8	0,2	0,03	0,02	0,03	0,20

Из данных табл. 1 видно, что методом РФА СИ в составе аэрозольных частиц регистрируются 15–20 химических элементов, от калия до свинца (некоторые элементы опущены в табл. 1, например никель и медь). Однако видно, что концентрации разных элементов в дыме могут различаться на два-три порядка, что отражает разное естественное содержание этих элементов в природных почвах (так называемые «элементные кларки»). С другой стороны, по известным литературным сведениям о величинах кларков тех или иных элементов в типичных почвенных средах (глинистые, горные, осадочные материалы) удастся установить те элементы, источником которых в «пожарной» эмиссии в большей степени является сгоревшая растительная (древесная) масса, чем эмиссия с почвы. Для этого в табл. 1 следует пронормировать измеренные концентрации разных элементов на концентрации железа, главным источником которого в аэрозолях можно считать именно почву. Перенормированные таким способом данные (так называемые «относительные элементные кларки») показаны в табл. 2 (для простоты в табл. 2 представлены лишь перенормированные средние величины относительных кларков). Здесь же приведены справочные относительные кларки этих же элементов для типичных почв, взятые, например, из [6–8]. Сопоставляя экспериментальные и справочные величины, можно сделать вывод о происхождении того или иного элемента в аэрозольной эмиссии при лесном пожаре. Из табл. 2 видно, что появление в аэрозолях таких элементов, как калий, хром, цинк, селен, бром, молибден и, вероятно, марганец, обусловлено сгоранием растительных тканей. В то же время такие элементы, как титан, стронций, цирконий (возможно, кальций) и некоторые другие, имеют, скорее всего, почвенное происхождение.

Вероятностное суждение о происхождении тех или иных элементов в аэрозольной эмиссии связано с тем, что справочные величины естественных кларков (представленные в табл. 2) могут сильно варьироваться в зависимости от геоландшафтных условий. Следовательно, лишь в тех случаях, когда измеренный относительный кларк какого-то элемента многократно превышает естественное (справочное) значение, можно сделать уверенный вывод о преимущественном «растительном» происхождении этого элемента в «пожарных» аэрозолях (например, калий или цинк).

По данным табл. 1 можно оценить, что суммарная доля всех обнаруженных в аэрозолях микроэлементов составляет около 1% от полной массы аэрозолей. Однако необходимо учитывать, что используемый нами метод РФА СИ не регистрирует

такие элементы, как кислород, азот, натрий, алюминий, кремний, хлор, сера. В то же время хорошо известно [6, 7], что именно эти элементы входят в состав многих почвенных материалов, причем в гораздо большем суммарном количестве (в 10–20 раз), чем указанные в табл. 1. Таким образом, есть основания полагать, что суммарная доля аэрозольных компонентов минерального (почвенного) происхождения может достигать 5–10% от полной массы аэрозолей. Остальное вещество «пожарных» аэрозолей (около 90%) состоит из углеродсодержащих веществ, что следует из собственных измерений (методика и результаты «углеродных» измерений будут опубликованы в других статьях), а также соответствует литературным сведениям [9].

Хотя минеральная доля в частицах кажется небольшой (5–10%), тем не менее абсолютные количества минеральных веществ, попадающих в атмосферу при лесных пожарах, весьма значительны. В табл. 1 приведены данные о суммарной дымовой концентрации C_0 при лесных пожарах, варьирующейся от ~ 15 до 240 мг/м³, при средней величине ~ 50 мг/м³. Отметим, что флуктуации концентрации дыма носят случайный характер и связаны с условиями экспериментов. Во-первых, горящие участки леса имели весьма ограниченные размеры (не более 200×200 м), вследствие чего ландшафтные условия горения были весьма неоднородными. Во-вторых, по соображениям безопасности аэрозольные пробы отбирались после прохождения фронта огня у боковой кромки участка, но без глубокого захода на горящую территорию. В силу обеих причин интенсивность задымления в местах отбора проб сильно флуктуировала, что можно было наблюдать визуально. Тем не менее несмотря на вышеотмеченные флуктуации, средняя по всем опытам концентрация аэрозолей должна характеризовать общую дымообразующую способность лесных пожаров. Как видим, средняя концентрация «пожарной» эмиссии (~50 мг/м³) примерно в 1000 раз превышает средние концентрации аэрозолей в свободной атмосфере (10–60 мкг/м³). В силу этого даже при 5–10%-й доле минеральных компонентов полные количества минеральной эмиссии в атмосферу вследствие обширных лесных пожаров являются существенным фактором.

Исходя из полученных данных о средних концентрациях дыма, а также считая, что средняя скорость конвективного подъема горячего воздуха у поверхности земли составляет ~ 0,5–1 м/с и среднее время локального горения растительности (т.е. среднее время интенсивного дымообразования) ~ 5–10 мин,

Таблица 2

Относительные элементные кларки

Относительный кларк (по Fe)	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	As	Se	Br	Rb	Sr	Zr	Mo	Pb
Справочный	0,58	0,55	0,11	0,0023	0,017	1	0,0005	0,002	0,00012	0,00002	0,0007	0,004	0,001	0,0045	0,0001	?
Экспериментальный	14,6	4,6	0,25	0,13	0,32	1	0,01	0,18	0,0087	0,0033	0,13	0,06	0,007	0,0021	0,005	0,058
Экспер./справочн.	25	8	2	56	19	1	20	90	73	165	185	15	7	0,5	50	?

нетрудно оценить полное количество аэрозольной эмиссии с единицы площади горящей лесной территории. Эта величина составляет ~ 10–30 г/м² (100–300 кг/га), при этом доля минеральной эмиссии оценивается в 5–30 кг/га. Оцененная выше полная аэрозольная эмиссия составляет 1–3% от полного количества сгорающего при пожарах лесного горючего материала (~ 1 кг/м², ~ 10 т/га, собственные измерения), что вполне коррелирует с оценками, полученными из измерений количеств углекислого газа, выделяющегося при лесных пожарах [3, 9].

Заключение

Методом РФА СИ определено содержание ряда химических микроэлементов минерально-растительного происхождения в аэрозольной эмиссии при лесных пожарах в Центральной Сибири. Показано, что суммарная доля минерально-растительных элементов составляет 5–10% от полного состава аэрозольной эмиссии. Оценена удельная мощность аэрозольной эмиссии микроэлементов при лесных пожарах.

Авторы благодарят за финансовую и организационную поддержку исследований: Американское агентство по исследованию космического пространства NASA (проект 99-ICA-076); Программу по наблюдению за изменениями в земном покрытии LCLUS; Фонд по поддержке гражданских исследований CRDF (грант RBI-2416-KY-02); Лесную службу Министерства сельского хозяйства США (проект 99-ICA-076); Лесную службу Комитета по природным ресурсам Канады; Российский фонд фундаментальных исследований (грант № 01-04-49340); Сибирское отделение Российской академии наук (грант № 64).

1. *Van Malderen H., Hoornaer S., Injuk J., Przybylowicz W.J., Pineda C.A., Prozesky V.M. and Van Grieken R.* Individual particle characterization of Siberian aerosols by micro-PIXF and backscattering spectrometry // X-Ray Spectrom. 2001. V. 30. P. 320–329.

2. *Van Malderen H., Van Grieken R., Bufetov N., Koutzenogii K.* Chemical characterization of individual aerosol particles in Central Siberia // Environ. Sci. and Technol. 1996. V. 30. P. 312–321.
3. *Koutzenogii K.P., Samsonov Y.N., Makarov V.I., Conard S., Baker S., Hao W.M., McRae D.* Ecological consequence wildland fire in Siberian boreal forest // Macro and Trace Elements: Proc. of XXI Workshop, 2002, Leipzig / Eds. M. Anke, R. Muller, U. Schafer, M. Stoeppler. Leipzig: Schubert-Verlag, 2002. P. 464–370; *Куценюгій К.П., Чанкина О.В., Ковальская Г.А., Савченко Т.И., Иванова Г.А., Иванов А.В., Тарапов П.А.* Постпирогенные изменения элементного состава лесных горючих материалов и почв в бореальных лесах Сибири // Сиб. экол. ж. (в печати).
4. *Baryshev V.B., Kulipanov G.N., Skrinsky A.N.* Review of X-ray fluorescent analysis using synchrotron radiation // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A. 1986. V. 246. P. 739–275.
5. *Baryshev V.B., Bufetov N.S., Koutzenogii K.P., Makarov V.I., Smirnova A.I.* Synchrotron radiation measurements of the elemental composition of Siberian aerosols // Nucl. Instrum. and Meth. Phys. Res. A. 1995. V. 359. P. 297–301.
6. *Kust A.A.* Феноменология биогеохимии и бионеорганической химии. Ташкент: Фан, 1987. 236 с.
7. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высш. шк., 1979. 423 с.
8. *Ковальская Г.А.* Элементный состав атмосферных аэрозолей в массовых единицах как функция типов почвы, подвергшейся ветровой эрозии // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 15. № 5–6. С. 506–510.
9. *Levine J.S., Cofer W.R., Cahoon D.R., Winstead E.L., Stocks B.J., Krasovoc V.A. and Mtetwa L.* Gaseous and particulate emission from burning in the boreal forest // Disturbance in Boreal Forest Ecosystems: Human Impacts and Natural Processes: Proc. of the IBFRA, 1997, Duluth, Minnesota, USA / Ed. S.J. Conard. Washington DC, USDA, 2000. P. 164–174.

K.P. Koutsenogii, Yu.N. Samsonov, T.V. Churkina, A.V. Ivanov, V.A. Ivanov. Contents of microelements in particulate emission from burning in the boreal forests of Central Siberia.

Microelement (mineral) composition of particulate emission from burning in boreal forest was investigated by the X-ray fluorescence analysis using synchrotron radiation (the XRF SR method). About twenty different chemical elements with atomic numbers from potassium K and higher were detected and measured quantitatively in aerosol particles sampled. Total microelement (mineral) share was estimated as about 5–10% of total particulate matter. Both the total particulate emission and the mineral one were evaluated for forest fires in Siberia.