

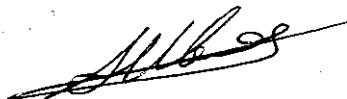
Иванов Андрей Валерьевич

**ГАЗО-АЭРОЗОЛЬНЫЕ ЭМИССИИ
ПРИ ЛЕСНЫХ НИЗОВЫХ ПОЖАРАХ
(на примере сосняков лишайниково-зеленомошных
Сымской равнины)**

Специальность 03.00.16 Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук



Работа выполнена в лаборатории лесоведения
Института леса им. В.Н. Сукачева

Научные руководители: доктор биологических наук, профессор

А.П. Абаимов

доктор физико-математических наук, профессор

К.П. Куценогий

Официальные оппоненты: доктор сельскохозяйственных наук, профессор

Э.Н. Валендик

кандидат биологических наук, доцент

П.А. Тарасов

Ведущее учреждение: Институт оптики атмосферы СО РАН

Защита состоится 28 мая 2003 г.

в 14:00 часов на заседании диссертационного совета

Д 003.056.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук
в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

Ваши отзывы просим направлять по адресу:

660036, Красноярск, Академгородок, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН,

Fax: (3912) 43-36-86, E-mail: institute@forest.akadem.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института

Автореферат разослан "25" апреля 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.В. Шашкин

БИБЛИОТЕКА
Карельского научного
центра РАН

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Состояние окружающей среды во многих регионах нашей планеты свидетельствует о все более возрастающем влиянии человека. Хозяйственная деятельность является главной причиной таких изменений, как уничтожение лесов вследствие пожаров и вырубки, вымирание некоторых видов животных и растений, выпадение кислотных осадков, истощение стратосферного озона и угроза глобального потепления.

Около 2/3 бореальных лесов находится в России; это примерно 774 млн. га, из которых спелые и перестойные насаждения составляют около 330 млн. га (Лесной фонд России, 1999). В связи с огромной площадью, большим запасом углерода и благодаря своей чувствительности к изменениям климата, бореальные леса давно признаются важнейшим фактором в мировом балансе углерода (Crutzen et. al., 1979). Пожары ежегодно охватывают 12-15 млн. га сомкнутых бореальных лесов, большая часть которых находится в Евразии (Conard, Ivanova, 1997). Они влияют на баланс углерода через эмиссии (газов и аэрозолей) и воздействие на компоненты экосистем. Степень воздействия лесных пожаров зависит от их вида и интенсивности, от состава и количества лесных горючих материалов, поглощенных во время горения. Достаточно хорошо изучены эмиссии при лесных пожарах и их вклад в баланс углерода в Африке, Южной и Центральной Америке. Исследования, направленные на оценку количественного и качественного состава эмиссий при лесных пожарах и их влияния на баланс углерода в бореальных лесах, не многочисленны, что определяет необходимость изучения как элементного состава аэрозолей, так и оценку объема эмиссий в атмосферу в процессе горения.

Цель и задачи исследования:

Целью настоящей работы является количественная и качественная оценка состава эмиссий при лесных низовых пожарах различной интенсивности в среднетаежных сосняках Средней Сибири.

В соответствии с этим в задачи исследования входило:

1. Изучение состава и концентрации эмиссии аэрозолей при горении различных видов лесных горючих материалов (ЛГМ);
2. Определение состава и концентрации эмиссий аэрозолей при пожарах разной интенсивности на примере сосняков лишайниково-зеленомошных;
3. Оценка количественного выхода углерода при пожарах разной интенсивности;
4. Расчет объема эмиссий при лесных пожарах.

Научная новизна и практическая значимость:

Впервые показаны элементный состав и концентрация аэрозолей при низовых пожарах разной интенсивности на примере среднетаежных сосняков лишайниково-зеленомошных. Определена концентрация химических элементов в некоторых видах ЛГМ и аэрозолях, образующихся при их сгорании. Установлена концентрация органического и неорганического углерода в аэрозолях при лесных пожарах разной интенсивности, а так же при сгорании отдельных видов ЛГМ. Проведена оценка объема газовой и аэрозольной компоненты эмиссий при лесных пожарах разной интенсивности. Установлено, что доля аэрозолей в общей газо-аэрозольной эмиссии не превышает, как правило, 1-3% (по массе). Наибольшая доля в углеродосодержащих газо-аэрозольных эмиссиях приходится на СО и СО₂, а остальные газы составляют менее 5%. Максимальные объемы эмиссии СО и СО₂ в атмосферу наблюдаются при высокоинтенсивных лесных пожарах.

Полученные данные расширяют представление об элементном составе аэрозолей и газовом составе эмиссий, образующихся при пожарах в бореальных лесах. Результаты исследований могут быть использованы для понимания природы и механизма парникового эффекта, оценки эмиссии CO₂ в атмосферу при лесных пожарах в бореальных лесах, а так же при разработке индивидуальных средств защиты органов дыхания для людей, работающих на тушении лесных пожаров.

Защищаемые положения:

1. Состав и концентрация эмиссий аэрозолей при лесных пожарах определяется комплексом горючих материалов и интенсивностью горения. Доля аэрозолей в общей газо-аэрозольной эмиссии не превышает 1-3%.

2. Количество освобожденного углерода при лесных пожарах тесно связано с интенсивностью горения на кромке пожара.

3. При лесных пожарах органического углерода выделяется в среднем в 3 раза больше, чем неорганического и это соотношение не зависит от интенсивности пожара.

Апробация работы

Основные результаты исследований доложены на научно-практических конференциях "Аэрозоли Сибири" (Томск, 2000-2002), научно-практической конференции СибГТУ (Красноярск, 2001), на международных научно-практических конференциях (Иркутск, 2001; Хабаровск, 2002; Красноярск, 2002).

Публикации

По результатам исследований опубликовано 15 печатных работ, в т.ч. 2 - в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора

Диссертационная работа выполнена в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН и является частью исследований, проводимых в рамках интеграционного проекта СО РАН "Аэрозоли Сибири" и российско-американского проекта 076 "Оценка и мониторинг воздействия гарей и интенсивности пожаров на эмиссии, баланс углерода, состояние и устойчивость лесов Средней Сибири" (Estimating and Monitoring Effects of Area Burned and Fire Severity on Carbon Cycling, Emissions, and Forest Health and Sustainability in Central Siberia). Все исследования по теме диссертации выполнены непосредственно автором, либо при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 154 страницах, включает 21 рисунок, 35 таблиц и список использованной литературы, содержащий 143 источника, в т.ч. 77 опубликованных в зарубежных изданиях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современное состояние вопроса

Лесные пожары - достаточно мощный источник загрязнения окружающей среды (Grutzen et al., 1985; Grutzen, 1990). Они оказывают сильное воздействие на лесные экосистемы, их биологическое разнообразие (Иванова, 1996; Прокушкин, Сорокин, Цветков, 2000; Абаимов, Прокушкин, Зырянова и др., 2001; Abaimov, Prokushkin, Matsuura et al., 2000), влияют на лесовосстановительные процессы и динамику лесов (Фурьев, Киреев, 1979; Попов, 1982; Санников, Санникова, 1985; Матвеев, 1992; Фурьев, 1996; и др.).

Возникновение и распространение лесных пожаров определяется структурой и запасом ЛГМ, на формирование которых и их соотношение оказывает влияние целый ряд природных и антропогенных факторов, таких, как тип растительности, характер

экологических условий, пожары и т.д. (Курбатский, 1964, 1970; Курбатский, Иванова, 1987; Волокитина, Софронов, 2003 и др). Тенденции возникновения и распространения пожаров могут претерпевать значительные изменения в связи с прогнозируемым потеплением климата. Любые изменения пожарного режима влияют на накопление углерода, эмиссии тепличных газов и на лесные экосистемы (Conard, Ivanova, 1997).

Увеличение активности пожаров, вызванное климатическими трендами, может привести в бореальных лесах Сибири как к увеличению выгоревшей площади, так и к обострению экологических последствий (Abaimov Prokushkin, Matsuura, et al., 2000; Abaimov, Zyryanova, Prokushkin, 2002; Furgyev, Vaganov, Tchekakova, Valendik, 2001). Более того, увеличение горимости бореальных лесов, вызовет значительное возрастание чистого CO₂, которое приведет к положительной обратной связи с глобальными температурами (Kurz et al., 1994) и к значительным последствиям для экосистем.

Лесные пожары влияют на баланс углерода через эмиссии (газов и аэрозолей) и путем воздействия на компоненты экосистем. Степень воздействия лесных пожаров зависит от их вида и интенсивности, состава и количества лесных горючих материалов. Объем и состав эмиссий зависит от вида растительности, метеорологических условий и режимов горения (Riebau, Fox, 2001). В последние годы наиболее полные данные получены по характеристикам аэрозолей, выделяющихся при горении лесов и саванн тропической зоны, а также по эмиссиям, образующимся при лесных пожарах, и их вкладу в баланс углерода в Африке, Южной и Центральной Америке (Artaxo et al., 1993; Andrea et al., 1998; Ferek et al., 1998; Gleason et al., 1998; Greenberg et al., 1999; Guenther et al., 1999; Guild et al., 1998; Hoffa et al., 1999; Lin et al., 2000; Martins et al., 1998; Martins et al., 1998; Reid, Hobbs, 1998; Reid et al., 1998; Ross et al., 1998; Ruellan et al., 1999; Кондратьев, Исидоров, 2001). Что касается характеристик аэрозолей, образующихся при горении бореальных лесов Северного полушария, то они отрывочны и весьма немногочисленны (Bufetov, Baryshev, Valendik, 1994; Куценюгий, Валендик, Буфетов и др., 1996; Smolyakov, Koutsenogii, Makarov, 1999; Koutsenogii, Makarov, Kovalskaya, 2000; Chankina, Churkina, Ivanov et al., 2001).

В настоящее время проявляется большой интерес к количественным оценкам углеродных эмиссий при лесных пожарах, особенно в бореальных и тропических лесах. Содержание органического и неорганического углерода в атмосферных аэрозолях играет важную роль в радиационном балансе атмосферы, и это может оказывать существенное влияние на климат (Kasischke, Christensen, Stocks, 1995).

Глава 2. Программа и методика исследований. Объекты исследований

В соответствии с целью диссертационной работы, направленной на количественную и качественную оценку состава эмиссий при лесных пожарах различной интенсивности на примере сосняков лишайниково-зеленомошных Сымской равнины, программа исследований включает решение следующих вопросов:

- 1) исследование состава и концентрации эмиссии при сгорании различных видов лесных горючих материалов;
- 2) выявление состава и концентрации эмиссий при пожарах разной интенсивности;
- 3) определение количественного выхода углерода при лесных пожарах.

Методика исследований:

Для проведения исследований по оценке состава эмиссий при низовых пожарах разной интенсивности был подобран модельный полигон в сосняке лишайниково-зеленомошном в подзоне средней тайги Средней Сибири (пос. Ярцево, Нижне-Енисейский лесхоз). Полигон был разбит на экспериментальные участки 200×200 м (4га), на которых в течение трех лет проводили моделирование пожаров разной интенсивности и отбор проб аэрозолей.

Все экспериментальные участки описаны на основе перечислительной таксации с использованием традиционных методических подходов (Сукачев, Зонн, Мотовилов, 1957; Побединский, 1962).

Для оценки структуры и запасов напочвенных ЛГМ на экспериментальных участках до и после пожара применяли методики Н.П. Курбатского (1954, 1962, 1970), С. Ван Вагнера (Wagner, 1968), Дж. Брауна (Braun, 1971) и Д. Мак-Рэя (McRae et al., 1979). Всего было заложено на экспериментальных участках 250 учетных площадок и взято более 1700 образцов ЛГМ. При учете упавших древесных ЛГМ методом пересеченных трансектов, было заложено 400 трансектов общей протяженностью 2000 м.

Для проведения метеорологических наблюдений использовалась автоматическая метеостанция, позволяющая получать данные о температуре и влажности воздуха каждую минуту.

Исследования аэрозолей проводились весовым методом. Он основан на фильтрации запыленного воздуха через фильтр с последующим определением уловленной массы. При проведении исследований использовались фильтры из волокнистого полимерного материала АФА-ХА-20 и из стекловолокнистого материала типа Glass Fibre Pre-filters.

Для отбора проб аэрозолей в лабораторных условиях была разработана методика и специальная установка, состоящая из штатива и конусообразного горна, под которым сжигались образцы ЛГМ. Отбор проб аэрозолей на фильтры производили с помощью аспиратора (с производительностью 20 л/мин) в течение пламенного и беспламенного горения. Для исследований взяты образцы лишайника, мха Шребера, хвои и веточек сосны, травы, лесной подстилки.

Также были проведены эксперименты на стенде в полевых условиях. Во время эксперимента сжигался слой напочвенных ЛГМ, который для сохранения структуры вырезался в виде монолита и помещался на металлический поддон.

В полевых условиях отбор проб аэрозолей на фильтры осуществляли с помощью двух заборных устройств, смонтированных на металлической штанге и соединенных с аспиратором. В качестве источника электроэнергии для приборов служил автономный генератор мощностью 1,5 кВт. Заборные устройства помещали в шлейф дыма лесного пожара. Отбор проб аэрозолей на фильтры при экспериментах проводили вдоль фланга пожара, параллельно движению кромки огня. Всего при проведении 9 экспериментальных пожаров было сделано 79 заборов проб аэрозолей на фильтры.

Анализ проб аэрозолей и образцов ЛГМ проведен совместно с сотрудниками Института химической кинетики и горения СО РАН. Многоэлементный анализ аэрозольных частиц проводился рентгенофлуоресцентным методом с возбуждением характеристического спектра с помощью синхронного излучения (РФА СИ). Содержание органического и неорганического углерода на фильтрах из стекловолокнистого материала определялось методом каталитической газовой хроматографии с использованием пламенно-ионизационного детектора. Обработка экспериментальных данных выполнена с использованием программ Microsoft Excel 2000 и Statistica 5.0.

Характеристика объектов исследования

Территория района исследований расположена на Сымской равнине, которая является дренированным участком восточной окраины Западно-Сибирской равнины, связанным с отрогами Енисейского кряжа, переходящими на левый берег Енисея (Средняя Сибирь, 1964). Сымская равнина сложена зандровыми песками и песчаными аллювиальными отложениями. Обширные пространства плакоров низменности заняты болотами, а леса приурочены к дренированным склонам междуречий и к долинам рек. Среди почвообразующих пород преобладают различные суглинки водного генезиса. В

речных долинах и древних ложбинах стока широко распространены аллювиальные пески и супеси (Жуков и др., 1969; Горожанкина, Константинов, 1978; Пармузин, 1985).

Район исследований относится к подзоне средней тайги. Климат региона - прохладный и влажный. Среднегодовая температура колеблется от - 3,2 до - 5,7°C. Годовая сумма осадков составляет 450-500 мм, но значительно варьирует по годам. Весной, усиливающаяся инсоляция способствует понижению общей влажности воздуха, что нередко вызывает засухи. Летом развивается циклоническая деятельность, благоприятствующая проникновению нагретого воздуха с юга. В целом горимость лесов территории высокая (Валендик, 1990).

Экспериментальный полигон (60°38' с.ш. и 89°44' в.д.) расположен в бассейне рек Дубчес и Сым, в среднем течении реки Тугулан. Его территория представляет собой плоскую песчаную гряду, окруженную травяно-сфагновыми и крупноосоковыми болотами. Почвы подзолистые, песчаные, сухие. Характеризуются высокой кислотностью (рН от 5 до 2,4), низким содержанием гумуса и пониженной трофностью.

Насаждения представлены сосняками лишайниково-зеленомошными пирогенного происхождения. Состав древостоев - 10С. Состоит из нескольких возрастных поколений деревьев: 450, 275, 185, 130 лет, формирование которых обусловлено воздействием низовых пожаров. Захламленность участка неравномерная.

Подлесок редкий, по площади размещен равномерно и представлен двумя видами (*Rosa acicularis* Lindl., *Salix caprea* L.). По краю болота в западинах встречается *Spiraea salicifolia* L. Подрост представлен сосной, высотой до 0,5 м. Характер пространственного размещения по площади равномерный.

Напочвенный покров дифференцирован по условиям микросреды. Синузиальная структура хорошо выражена. Микропонижения заняты багульниково-бруснично-сфагновыми микрогруппировками. Общее проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса варьирует от 15 до 40%, высота - 20-35 см. Моховой покров имеет проективное покрытие от 60 до 100%, доминирует мох Шребера. Лишайниковый покров развит повсеместно по моховому субстрату. Его проективное покрытие сильно варьирует (от 20 до 100%), с абсолютным доминированием на сильно прогревших участках во время последнего пожара.

Особенностью сосняков лишайниково-зеленомошных является быстрое достижение состояния пожарной зрелости и возможность быть горимыми в течение всего пожароопасного сезона. Кроме того, значительный запас напочвенных ЛГМ способствует развитию в них высокоинтенсивных лесных пожаров.

Остров изолирован и единственной причиной возникновения лесных пожаров здесь являются молнии. Пожары - беглые низовые весенние и летние, возникающие в конце мая - начале июня и июля. Средний межпожарный интервал составляет 35 лет. За этот период происходит накопление горючих материалов до их критического запаса, предопределяющего возможность возникновения и распространения очередного лесного пожара.

Глава 3. Элементный состав различных видов лесных горючих материалов и концентрация аэрозолей, образующихся при их сгорании

Как известно, лесные пожары - один из источников загрязнения окружающей среды. В настоящее время проявляется большой интерес к количественным оценкам углеродных эмиссий от пожаров в бореальных лесах. Аэрозоли при лесных пожарах играют важную роль в радиационном балансе атмосферы и оказывают существенное влияние на климат (Kasischke, Christensen, Stocks, 1995).

Для определения состава аэрозолей при горении разных видов ЛГМ, взятых на экспериментальных участках, была проведена серия экспериментов по их сжиганию в

лабораторных условиях (14 экспериментов) и на стенде в полевых условиях (4 эксперимента).

В элементном составе ЛГМ достоверно определено 30 химических элементов (табл. 1). Установлено, что для каждого вида горючих материалов характерна своя концентрация того или иного химического элемента. Наиболее обогащенными К, Са, Мп являются мох Шребера, багульник, черника, листья и веточки брусники. Наибольшее содержание Ti, V, Cr, Fe, Co, Ni, Ga, Cu, Br, Sr, Zr и Pb наблюдается в подстилке. Полученные результаты по основным химическим элементам в составе ЛГМ согласуются с ранее опубликованными данными для мхов и некоторых растений из других экосистем (Куценогий, Валендик, Буфетов и др., 1996).

Таблица 1. Элементный состав лесных горючих материалов, ppm (мкг/г)

Элемент*	Лесные горючие материалы												Коэффициент вариации%
	лишайник	мох Шребера	подстилка	багульник	черника	брусника листья	брусника веточки	шишки сосны	кора сосны	веточки до 0,5 см	веточки 0,5-2,0 см	хвоя сосны	
K	1260	2160	1130	3140	2140	2590	2400	625	175	179	287	386	1-4
Ca	2900	4470	3560	11300	11000	8560	9700	2360	4620	1040	3450	8210	1-4
Cr	4,2	3,3	13	8,2	6,9	11	3,4	0,9	0	3,2	0	1	1-4
Mn	261	919	479	2660	3930	2880	1940	278	337	141	222	1450	1-4
Fe	373	508	1820	172	92	96	105	265	94	197	355	109	1-4
Zn	25	39	54	34	33	21	40	21	37	15	27	80	1-4
Se	0	0,45	0,5	0	0,24	0,34	0,18	0,3	0,31	0,28	0,35	0,4	40-60
Br	2,0	2,9	10	1,5	1,1	0,5	0,6	2,1	1,4	1,7	5,2	8,4	10-15
Rb	4,9	13,7	8,6	18,3	7,3	6,0	6,1	1,8	1,0	1,0	1,9	1,2	1-4
Sr	7,5	12,1	22,3	12,3	8,6	7,8	11,4	8,9	20,1	5,2	13,9	19,6	1-4
Pb	1,8	4,9	16,6	1,9	1,2	0,4	1,8	2,8	1,5	3,8	7,6	2,0	10-15

* элементы Sc, Ti, V, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Mo, La, Ce, Sm, Gd, W, Hg, Bi, Th, U представлены в незначительных концентрациях.

Степень взаимного влияния различных элементов в ЛГМ определена при помощи факторного анализа, который позволил выделить некоторые группы элементов, наиболее значимо описывающих вариабельность многоэлементного состава ЛГМ сосняка лишайниково-зеленомошного (табл.2). Выделено четыре группы элементов, которые в сумме позволяют описать до 92% вариабельности всех элементов, определенных методом рентгено-флуоресцентного анализа с применением синхротронного излучения (РФА СИ).

Таблица 2. Результаты факторного анализа элементного состава ЛГМ

Факторы	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4
Элементы	Cr, Fe, Cu, Ga, Zr, Pb	Zn, Br, Sr	Ca, Mn, -Hg, -Bi	K, Rb
Нагрузка	0,36	0,26	0,22	0,11

Данные свидетельствуют, что суммарная доля зарегистрированных элементов в среднем составляет 0,3-1,0% от полного веса пробы. Это объясняется тем, что эти элементы (металлы) обычно существуют в виде солей или окислов (CaCO_3 , FeSO_4 , Fe_2O_3 и другие). Однако эти химические соединения и элементы (C, O, S, N и т.п.) не проявляются (невидимы) в методе РФА СИ и, следовательно, их вклад экспериментально

не определяется.

В продуктах горения (золе, углях и несгоревшей подстилке) происходит значительное увеличение концентраций определяемых элементов. Это связано с концентрированием элементов минеральной части ЛГМ в золе. Содержание Са при сгорании ЛГМ составляет в золе 10-30%, в то время как доля К составляет лишь 1-2%.

Доля несгоревшего ЛГМ зависит от его вида и влагосодержания. При увеличении влаги в образце доля несгоревшего вещества возрастает, но у различных видов ЛГМ по-разному. Например, при увеличении в подстилке влагосодержания от 6,2 до 58% величина недожога увеличилась в 1,5 раза, а у веточек сосны при изменении влагосодержания от 8,6 до 16% этот показатель также увеличился в 1,2 раза. Полученные результаты согласуются с данными Г.А. Амосова (1958) и М.А. Шешукова (1970).

Элементный состав аэрозолей, образующихся при сгорании отдельных видов ЛГМ, сохраняет те же элементы, но в значительно меньшей концентрации. В элементном составе аэрозолей, образующихся при горении различных видов ЛГМ, достоверно определено 22 химических элемента (табл. 3). В аэрозолях отсутствуют (или находятся в очень незначительной концентрации) тяжелые химические элементы, такие как: Bi, U, Hg, Th, Ce, W, Zr, Nb, Mo, которые идентифицированы в составе некоторых видов ЛГМ.

Выявлена тесная связь между элементным составом ЛГМ и составом аэрозолей, образующихся при их сгорании. Коэффициент корреляция составил: для хвои сосны – 0,77; веточек сосны – 0,69.

Таблица 3. Элементный состав аэрозолей, образующихся при сгорании некоторых видов ЛГМ ($\text{мкг} \times 10^{-3} / \text{см}^2$)

Элемент*	Подстилка	Мох	Лишайник	Хвоя	Веточки до 0,5 см.
K	217	6046	1230	1308	445
Ca	0	652	437	740	364
Cr	35	65	14	69	49
Mn	0	29	1	18	12
Fe	0	374	63	84	0
Zn	7	56	17	87	56
Se	1	2	0	3	1
Br	12	10	7	23	12
Rb	2	4	5	3	0
Sr	2	5	0	3	1
Pb	4	8	8	8	5

* элементы Sc, Ti, V, Co, Ni, Cu, Ga, Ge, As, Y, Zr, Nb, Mo, La, Ce, Sm, Gd, W, Hg, Bi, Th, U представлены в незначительных концентрациях.

Мы предположили, что примеси пыли, содержащиеся на поверхности ЛГМ, оказывают существенное влияние на состав аэрозолей, образующихся при их горении. Для проверки этой гипотезы были проведены эксперименты в полевых условиях по оценке элементного состава аэрозолей, образующихся при горении лишайника в естественном состоянии и чистого (промытого). Так, в элементном составе аэрозолей, образовавшихся при сгорании лишайника в естественном состоянии, было определено на 2 химических элемента больше, чем в промытом лишайнике. Концентрация элементов в промытом лишайнике была также ниже, чем в лишайнике в естественном состоянии. Следовательно, пыль, осаждающаяся на поверхности ЛГМ, оказывает определенное влияние на химический состав аэрозолей, образующихся при их сгорании.

Глава 4. Элементный состав аэрозолей при пожарах разной интенсивности

Вопрос о химическом составе аэрозольных частиц, образующихся при лесных пожарах, изучен недостаточно хорошо. Наибольшее количество данных относится к химическому составу (многоэлементный и ионный состав, содержание элементного углерода) аэрозолей при горении лесов и саванн в тропической зоне (Piketh, Appengam, Kneen, 1996). В большинстве публикаций приведены данные о составе аэрозолей и газов в дымовых шлейфах, образующихся при горении биомассы. Но, как правило, определялась только углеводородная компонента, ионный состав и содержание элементного углерода. Не вызывает сомнения, что химический состав аэрозолей зависит от многих параметров: химического состава горючих материалов, режимов горения, метеорологических факторов. Однако эти сведения в большинстве публикаций отсутствуют. Поэтому одной из основных задач наших исследований являлась качественная и количественная оценка выхода аэрозолей при лесных пожарах в типичных для средней тайги сосняках лишайниково-зеленомошных.

Для исследования воздействия лесных пожаров разной интенсивности на выход и состав эмиссий в 2000-2002 гг. проведено 9 экспериментов по моделированию поведения пожаров разной интенсивности. Эксперименты представляли собой контролируемые выжигания. Зажигание проводили по направлению ветра от одной из сторон экспериментального участка. При этом моделировалось распространение фронтальной кромки пожара.

Общие запасы напочвенных ЛГМ на экспериментальных участках варьировали от 4,1 до 6,2 кг/м². Эти различия определяются как давностью последнего пожара, так и особенностями синузильной структуры живого напочвенного покрова. Запасы опада составляли 0,1-0,3 кг/м². На упавшие древесные ЛГМ приходится от 0,4 до 1,7 кг/м². Условия проведения экспериментов и характеристики поведения пожаров приведены в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики поведения пожаров на экспериментальных участках

№ участка	Дата эксперимента	Показатель Нестерова	ПВ-1	*Скорость распространения (м/мин)	*Интенсивность кромки (кВт/м)	Глубина прогорания (см)	Количество сгоревших ЛГМ (кг/м ²)
2	19/06/2001	2045	1583	4,9	2140	4,4	1,4
3	26/07/2001	207	297	2,5	1156	3,3	1,0
4	30/07/2002	661	1340	1,4	587	3,9	1,4
6	30/07/2001	561	651	5,9	2473	4,0	1,3
13	26/07/2000	1170	1273	2,0	1067	4,7	2,1
14	18/07/2000	2093	2421	9,0	9018	6,4	3,1
19	28/07/2001	1034	1124	2,9	1016	3,5	1,1
20	25/07/2002	797	1576	5,0	2200	4,1	1,4
21	26/07/2002	1041	1820	5,2	3987	6,1	2,4

*Расчет скорости распространения и интенсивности кромки горения выполнен Д.МакРеєм и любезно предоставлен участникам эксперимента.

Во всех случаях во время экспериментов моделировалось поведение лесных низовых пожаров, которые характерны для сосняков подзоны средней тайги Сибири. Пожар высокой интенсивности развился на участке 14, средней интенсивности - на

участках 21, 6, 20 и 2, на остальных участках - слабой интенсивности. Количество сгоревших горючих материалов варьировало от 1,0 до 3,1 кг/м². Полностью сгорели упавшие древесные материалы диаметром до 0,5 см, опад, мхи и лишайники.

Для каждого экспериментального пожара нами рассчитаны средние значения по каждому химическому элементу в аэрозолях (табл. 5). Анализ данных по концентрациям элементов в аэрозолях при пожарах различной интенсивности, показал, что качественный состав аэрозолей в основном идентичен. Коэффициенты корреляции между концентрациями химических элементов в аэрозолях, образовавшихся при низовых пожарах разной интенсивности, составляют 0,8 - 0,9. И хотя концентрации элементов различаются и в значительной степени определяются параметрами лесного пожара, тем не менее элементный состав во всех случаях сохраняется. Это свидетельствует о том, что он определяется комплексом горючих материалов. Ранее при анализе данных об элементном составе ЛГМ и аэрозолей, образующихся в процессе их горения, нами установлено, что аэрозоли содержат в своем составе те же элементы что и в ЛГМ, но в меньшей концентрации. Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что состав аэрозолей при лесных пожарах определяется комплексом горючих материалов, довольно стабилен и не зависит от интенсивности пожара.

В составе аэрозолей по концентрации преобладают калий, кальций, марганец, железо, цинк. На их долю приходится до 90% от общего количества определяемых элементов. Выявлено, что концентрация многих элементов в аэрозолях выше при слабоинтенсивных пожарах по сравнению с высокоинтенсивным горением на участке 14.

Таблица 5. Среднее содержание элементов в аэрозолях при пожарах разной интенсивности, мкг×10⁻³/см²
а) на высоте 1 м

№ участка	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	As	Se	Sr	Zr	Pb
2	751,7	341,1	1,8	11,8	19,3	114,2	1,0	11,3	1,0	0,1	0,6	0,4	3,6
3	854,7	624,0	19,6	9,0	36,8	68,8	0,1	16,5	0,8	0,3	0,8	0,2	3,5
6	2823,5	508,0	14,3	6,1	51,4	58,1	0,7	23,8	0,3	0,4	0,8	0,1	3,2
13	634,0	423,0	13,0	36,0	49,0	188,0	8,0	94,0	1,0	0,3	15,0	1,3	14,0
14	420,0	670,0	40,0	4,0	84,0	62,5	2,5	2,5	0,8	0,1	1,1	0,2	2,5
19	2037,6	319,6	13,6	2,5	22,2	61,7	1,3	27,5	1,5	0,7	0,5	0,2	9,1
Среднее	1253,6	481,0	17,1	11,6	43,8	92,2	2,3	29,3	0,9	0,3	3,1	0,4	6,0
Стандартное отклонение	955,9	145,5	12,7	12,4	23,7	51,4	2,9	32,9	0,4	0,2	5,8	0,5	4,6

б) на высоте 100-200 м

№ участка	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Zn	As	Se	Sr	Zr	Pb
3	35,0	47,5	0,0	8,1	5,5	0,0	3,4	2,4	0,1	0,5	1,3	0,2	0,1
6	394,0	546,0	6,0	17,2	28,2	7,3	3,2	5,4	0,4	0,0	2,0	0,2	0,5
19	132,5	82,5	7,5	8,1	11,3	12,2	0,5	3,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,9
Среднее	187,2	225,3	4,5	11,2	15,0	6,5	2,4	3,7	0,2	0,2	1,1	0,2	0,5
Стандартное отклонение	185,6	278,3	4,0	5,3	11,8	6,1	1,6	1,5	0,1	0,3	0,9	0,0	0,4

При сопоставлении данных было установлено, что количество аэрозолей, отобранных на фильтры на высоте 100-200 м, в 30-40 раз ниже, чем в приземном слое (на высоте 1 м) (табл. 5 а, б). Полученные данные иллюстрируют изменение концентраций аэрозолей в зависимости от удаленности их от источника и позволяют судить о скорости их рассеяния в атмосфере.

Суммарная массовая доля, которую составляют элементы, определяемые в аэрозолях методом РФА СИ, не превышает 1%. Это означает, что заметную долю массы аэрозолей должны составлять более легкие элементы, которые имеют меньшие, чем калий, значения атомных весов. Среди них такие элементы, как Cl, S, N, Na. Они могут входить в водорастворимую компоненту аэрозольных частиц. Это объясняется тем, что такого рода элементы (металлы) обычно существуют в виде солей или окислов. Тем не менее, имеется возможность оценки их вклада в общий вес, исходя из среднего соотношения молекулярных весов регистрируемых элементов (K, Ca, и другие) и дополнительных солевых или окисных групп атомов (CO_2 , SO_4 и т.п.). Рассчитано, что в среднем это соотношение составляет ~ 1:1 и, следовательно, суммарный вклад от регистрируемых методом РФА СИ веществ может достигать 0,6 – 2,0 % от веса пробы. Можно предположить, что указанные элементы в аэрозолях связаны с минеральными компонентами почвы, попадающими в атмосферу вместе с восходящими потоками горячего воздуха при лесном пожаре. Известно, что основная часть таких минеральных компонентов почвы состоит из окисных веществ и элементов, которые не могут быть обнаружены методом РФА СИ (алюминий, магний, кремний, натрий, кислород). По литературным данным, доля таких элементов в минеральной компоненте почвы может достигать 80-90%, т.е. в 5-10 раз больше, чем доля элементов, зарегистрированных РФА СИ. Таким образом, правомерно предположить, что общая доля минеральной компоненты в аэрозольных пробах при низовых пожарах может достигать 3 - 10%.

Значения полных массовых концентраций аэрозольной эмиссии при экспериментальных пожарах 2000 года варьируют в диапазоне от 8 до 80 мг/м^3 , при среднем значении около 30 мг/м^3 . В опытах 2001 года вариация концентраций наблюдалась в диапазоне от 15 до 240 мг/м^3 при средней величине 50 мг/м^3 . Таким образом, правомерно заключить, что типичные средние концентрации аэрозольной эмиссии над горящей лесной территорией в бореальных лесах Средней Сибири варьируют от 30 до 100 мг/м^3 .

Принимая в качестве средней концентрации аэрозольной эмиссии значение равное 50 мг/м^3 , а средней скорости вертикальных конвективных струй за период интенсивного дымообразования на горящем участке (в течение 5-15 мин) - 0,5-1,0 м/сек, можно рассчитать, что с одного квадратного метра кромки пожара происходит эмиссия в атмосферу от 10 до 30 г аэрозольного вещества. Учитывая, что при этом происходит сгорание горючих материалов в количестве 0,5-1,5 кг/м^2 , то доля аэрозолей в общей газо-аэрозольной эмиссии составляет 1-3%.

Глава 5. Содержание органического и неорганического углерода в аэрозолях при лесных пожарах разной интенсивности

Известно, что содержание органического и неорганического углерода в атмосферных аэрозолях играет важную роль в радиационном балансе атмосферы, и может оказывать влияние на климат. При горении биомассы происходит заметный выброс углерода в виде эмиссий в атмосферу. Обычно основное внимание уделяется газообразным углеродсодержащим эмиссиям при лесных пожарах. Лишь в последнее десятилетие начаты исследования по оценке содержания органического и неорганического углерода в аэрозолях, образующихся при лесных пожарах (Исидоров, 2001).

На основе лабораторных экспериментов нами установлено, что наибольшее количество суммарного углерода образуется при горении мха Шребера (118000 мкг/м^3) и подстилки (108600 мкг/м^3), наименьшее – при горении сосновой хвои (99900 мкг/м^3) и листьев березы (84700 мкг/м^3). Наиболее высокое содержание органического углерода наблюдается при горении подстилки (103000 мкг/м^3) и мха Шребера (97300 мкг/м^3).

Следовательно, правомерно предположить, что максимальный выброс углеродсодержащих соединений может быть при лесных пожарах в зеленомошных типах леса.

При стендовых экспериментах было подтверждено высокое суммарное содержание углерода в аэрозолях при горении мха Шребера (рис.1). При сгорании лишайника зафиксирована самая высокая концентрация органического углерода. В процентном выражении наибольшее содержание органического углерода в аэрозолях наблюдается при горении лишайника -93% и хвои сосны - 90%.



Рис. 1. Содержание органического и неорганического углерода в аэрозолях при сгорании различных видов ЛГМ.

Количество выделившегося углерода во время экспериментальных низовых пожаров в сосняке лишайниково-зеленомошном составило от 4,8 т/га при пожаре слабой интенсивности (участок 3) до 15,4 т/га при пожаре сильной интенсивности (участок 14). Мы сопоставили количество всего выделившегося углерода с интенсивностью горения на кромке пожара. Связь между этими величинами тесная и характеризуется коэффициентом корреляции 0,83. Следовательно, чем выше интенсивность лесного пожара, тем больше количество выделяющегося углерода (рис.2).

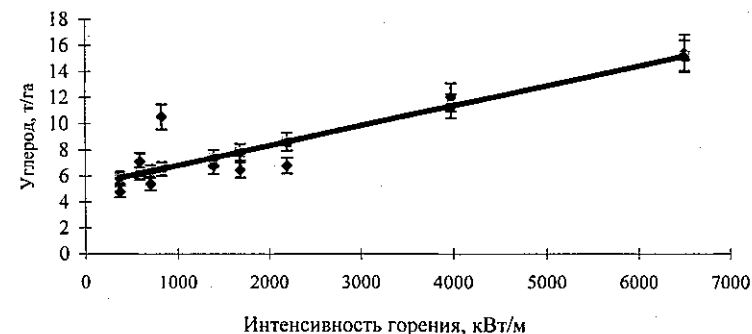


Рис.2. Зависимость выхода углерода от интенсивности горения на кромке лесного пожара.

Средние значения содержания органического и неорганического углерода в аэрозолях при пожарах разной интенсивности приведены в табл. 6. Их соотношение

варьирует от 2,1 до 4,3, в среднем около 3. Таким образом, при лесных пожарах органического углерода выделяется в среднем 3 раза больше чем неорганического и это соотношение существенно не зависит от интенсивности пожара. Коэффициент вариации соотношения органического и неорганического углерода составил 22,9%. Коэффициент корреляции между содержанием органического и неорганического углерода при пожарах составляет 0,94. В среднем концентрация углерода в аэрозолях составила: суммарного - 17532; органического - 12812; неорганического - 4720 мкг/м³.

Таблица 6. Средние значения концентрации органического и неорганического углерода в аэрозолях при лесных пожарах на экспериментальных участках

№ участка	Суммарная концентрация C _{орг} и C _{неорг} мкг/м ³	Концентрация C _{орг} мкг/м ³	Концентрация C _{неорг} мкг/м ³	Соотношение $\frac{C_{орг}}{C_{неорг}}$
2	28537	21426	7111	3,0
3	18077	12405	5673	2,2
4	10580	7940	2640	3,0
6	19609	13232	6377	2,1
13	15397	11746	3651	3,2
14	23036	17054	5982	2,9
19	26926	19077	7850	2,4
20	4600	3500	1100	3,2
21	11025	8925	2100	4,3

Анализ содержания различных форм углерода в аэрозолях позволяет заключить, что даже в пределах одного типа леса мозаичная структура пространственного распределения ЛГМ определяет значительное варьирование, как суммарной концентрации, так и концентрации органического и неорганического углерода.

Рост концентрации суммарного углерода с увеличением интенсивности пожара незначителен (рис. 3). Это связано с тем что, увеличение интенсивности горения на кромке пожара ведет к усилению подтока воздуха, что, в свою очередь, приводит к разбавлению на кромке горения концентрации аэрозолей в воздухе.

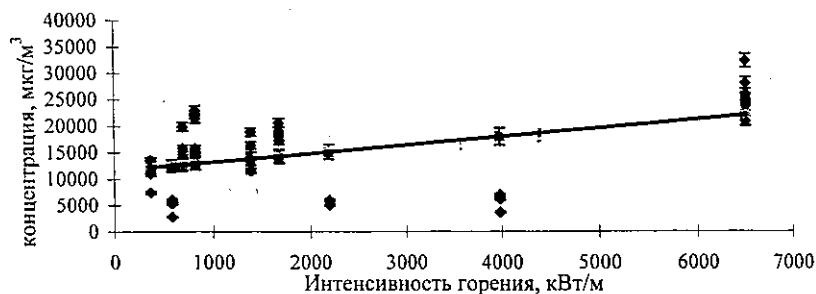


Рис 3. Суммарная концентрация углерода в аэрозолях в зависимости от интенсивности горения кромки пожара

Установлена зависимость содержания углерода в аэрозолях от погодных условий. Между концентрацией органического углерода в виде аэрозоля и показателем Нестерова выявлена тесная связь (коэффициент корреляции - 0,67), а между концентрацией

неорганического углерода и показателем Нестерова связь более слабая (коэффициент корреляции - 0,44).

Таким образом, концентрация содержания как органического, так и неорганического углерода определяется такими факторами погоды, как осадки, температура и влажность воздуха, то есть условиями высыхания ЛГМ или их влагосодержанием в момент пожара, которое определяет глубину прогорания слоя ЛГМ во время пожара.

В аэрозолях при лесных пожарах в сосняке лишайниково-зеленомошном по массе преобладают соединения углерода - около 50-85%, из них на органические соединения приходится 45-70% и на неорганический углерод в виде графита и сажи - 15-20%. Минеральная фракция, т.е. микроэлементы в аэрозольных частицах, составляет 5-10%. Доля химических элементов, неопределяемых РФА СИ, - 10-30% (рис.4).



Рис. 4. Соотношение по массе определяемых веществ в аэрозолях

Глава 6. Оценка объема эмиссий при горении некоторых видов ЛГМ и при лесных пожарах разной интенсивности

На основе проведенных экспериментов нами предпринята попытка рассчитать объем эмиссий при горении некоторых видов ЛГМ и при пожарах разной интенсивности.

В последнее время предложен ряд методик для расчета объема эмиссий при лесных пожарах (Белов, 1982; Гришин, Долгов, Цимбалюк, 1997 и др). Мы рассчитали объем эмиссий при лесных пожарах разной интенсивности по методике Белова С.В. (1982). При этом в качестве базовых показателей использовали данные Конева Э.В. (1977) по содержанию таких химических элементов как углерод, кислород, водород и азот в ЛГМ. Полученные нами данные по влагосодержанию ЛГМ, позволили также оценить количество выделившихся паров воды.

Расчеты потребности воздуха при горении и количества образующихся продуктов сгорания произведены для таких ЛГМ, как мох Шребера, лишайник, брусника, багульник, осочка, хвоя сосны, листья березы, лесная подстилка.

Установлено, что, например, при сгорании 1 кг мха Шребера в абсолютно сухом состоянии образуется 7,09 кг продуктов горения (CO₂, N₂, Ar, C_{дисп}) и 0,047 кг в виде золы. Полученные нами результаты согласуются с данными американских исследователей (Ward, Hardy, 1991).

Используя полученные данные о количестве сгоревших лесных горючих материалов и о составе газовых эмиссий при экспериментальных пожарах разной интенсивности, мы рассчитали по приведенной выше методике объемы эмиссий (табл. 7).

При расчетах в сгоревшие запасы лишайника и мха Шребера также были включены опад и верхние слои сгоревшей подстилки. Обычно, при расчетах эмиссий углерода при лесных пожарах используют весь запас напочвенных ЛГМ. Между тем, оценивая эмиссии при лесном пожаре необходимо учитывать, что имеющийся запас ЛГМ

сгорает не полностью, а величина химического недожога зависит от интенсивности горения.

Таблица 7. Эмиссии при пожарах разной интенсивности, кг/га

Участок	Мох Шребера			Лишайник			Брусника			Всего
	H ₂ O	C _{дисп}	CO ₂ *	H ₂ O	C _{дисп}	CO ₂	H ₂ O	C _{дисп}	CO ₂	
2	2883	193	5684	2352	143	4213	87	2	67	15625
3	6298	131	1932	2335	278	4083	62	4	60	15183
6	4016	474	6961	904	107	1576	70	4	62	14173
13	4432	480	9405	1311	109	2130	79	3	64	18013
14	4275	332	9768	7263	452	13273	79	2	68	35513
19	2626	215	4210	1454	130	2543	69	3	63	11314

*Расчетное количество выделившегося CO₂ включает CO и другие углеродосодержащие газы.

Используя соотношение концентрации различных углеродосодержащих газов в газовых эмиссиях при экспериментальных лесных пожарах и полученные расчетные данные по количеству выделившегося углекислого газа (табл. 7), мы предприняли попытку оценить эмиссии углеродосодержащих газов при пожарах разной интенсивности в сосняке лишайниково-зеленомошном (табл. 8).

Таблица 8. Эмиссии углеродосодержащих газов при пожарах разной интенсивности, кг/га

Участок	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₃ H ₆	C ₃ H ₈
3	774	5239	46	8	2	3	2	1
6	1232	7267	83	9	1	3	2	1
13	3136	7787	475	83	26	50	28	15
14	5506	16464	807	155	48	65	48	17
19	759	6000	45	7	1	2	1	1

Приведенные данные свидетельствуют, что в наибольших количествах выделяется CO и CO₂. Во всех экспериментах на их долю приходится около 95-98% газовой эмиссии. Остальные газы составляют в составе эмиссий менее 2-5%. При этом прослеживается тенденция увеличения объемов выделения CO и CO₂ при высокоинтенсивных лесных пожарах. Аналогичные результаты получены и для других углеродосодержащих компонентов газовых эмиссий. В целом количество выделившихся газо-аэрозольных эмиссий при низовых пожарах разной интенсивности составляет, по нашим расчетам, от 11,3 до 35,5 т/га.

Выводы

1. Лесные пожары в бореальных сосновых лесах влияют на баланс углерода посредством эмиссии газов и аэрозолей, а также воздействием на компоненты экосистем. Степень воздействия зависит от интенсивности горения, состава и запаса лесных горючих материалов.
2. Элементный состав аэрозолей при лесных пожарах определяется комплексом горючих материалов, стабилен и качественно не зависит от интенсивности пожара.
3. Концентрация элементов в аэрозолях определяется интенсивностью пожара. В элементном составе аэрозолей преобладают K, Ca, Mn, Fe, Zn. Суммарная массовая доля содержания химических элементов, определяемых в аэрозолях методом РФА СИ, не превышает 1-3%.

4. На высоте 100-200 м концентрация элементов в аэрозолях убывает на порядок. При этом, чем выше интенсивность пожара, тем меньше вертикальный градиент концентрации аэрозоля.
5. Эмиссия аэрозоля составляет при экспериментальных пожарах 10 – 30 г/м² горящей площади. Доля аэрозолей в общей газо-аэрозольной эмиссии не превышает, как правило, 1 – 3%.
6. Содержание в аэрозолях органического и неорганического углерода, образующегося при горении различных ЛГМ, обусловлено их размером и влагосодержанием. При лесных пожарах органического углерода выделяется в среднем в 3 раза больше, чем неорганического. Это соотношение не зависит от интенсивности пожара.
7. Концентрация суммарного углерода связана с интенсивностью пожара. Концентрация как органического, так и неорганического углерода определяется такими метеофакторами, как осадки, температура и влажность воздуха.
8. При лесных пожарах разной интенсивности в сосняке лишайниково-зеленомошном высвобождается от 4,8 т/га до 15,4 т/га углерода. Количество освобожденного углерода тесно связано с интенсивностью горения на кромке пожара (коэффициент корреляции 0,83). Расчетное количество выделившихся газо-аэрозольных эмиссий в зависимости от интенсивности пожара, составляет от 11,3 т/га до 35,5 т/га.
9. Наибольшая доля в углеродосодержащих газовых эмиссиях приходится на CO и CO₂ (до 98%) а остальные газы составляют менее 2-5%. Максимальные объемы выделения CO и CO₂ наблюдаются при высокоинтенсивных лесных пожарах.

Список работ, опубликованных по теме диссертации:

1. Куценогий К.П., Иванов А.В., Чанкина О.В. Многоэлементный состав аэрозолей лесных пожаров бореальных лесов и при горении лесных горючих материалов // 13 Международная Конференция по Синхротронному Излучению, Новосибирск, 1999. Тезисы докладов. с.249-250.
2. Иванов А.В. Состав эмиссии при горении некоторых видов лесных горючих материалов // Молодежь и наука – третье тысячелетие. Сборник материалов Межрегионального фестиваля студентов, аспирантов и молодых ученых. Красноярск, 2000. с.214.
3. Иванов А.В., Куценогий К.П., Макаров В.И., Ковальская Г.А., Чуркина Т.В., Чанкина О.В. Методика определения эмиссии аэрозолей при горении лесных горючих материалов// VII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», Томск, 2000. Тезисы докладов. с.78.
4. Иванов А.В. Состав аэрозолей при горении напочвенных лесных горючих материалов // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия. Материалы 4-й международной конференции, Иркутск, 2001. с.92.
5. Иванов А.В. Расчет объема эмиссий при сгорании некоторых видов лесных горючих материалов // VIII Рабочая группа «Аэрозоли Сибири», Томск, 2001. Тезисы докладов. с.83.
6. Chankina O.V., Churkina T.V., Ivanov A.V., Ivanov V.A., Ivanova G.A., Koutsenogii K.P., Kovalskaya G.A. Multielement composition of the aerosols of the forest fires of boreal forests upon burning of forest combustibles// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 470 (2001) 444-447.
7. Иванов А.В., Чуркина Т.В. Аэрозоли при горении лесных горючих материалов в сосняке разнотравно-зеленомошном // Ботанические исследования в Сибири, вып. 101 Красноярск, 2002, 109-116.

8. Иванов А.В., Макаров В.И. Оценка объема эмиссий при сгорании некоторых видов лесных горючих материалов // Оптика атмосферы и океана. Томск 2002, том 15, №5-6, с.488-490.
9. Макаров В.И., Куценогий К.П., Самсонов Ю.Н., Иванов А.В., Иванов В.А. Эмиссия органического и элементного углерода в виде аэрозолей при лесных пожарах. Аэрозоли Сибири. IX Рабочая группа (26-29 ноября 2002 г.). Тезисы докладов. Томск, 2002. с.66.
10. Иванов А.В. Эмиссии при пожаре в сосняке лишайниково-зеленомошном в зависимости от погодных условий. Аэрозоли Сибири. IX Рабочая группа (26-29 ноября 2002 г.). Тезисы докладов. Томск, 2002. с.65.
11. Самсонов Ю.Н., Куценогий К.П., Чуркина Т.В., Иванов А.В., Иванов В.А. Содержание микроэлементов в аэрозольной эмиссии при пожарах в бореальных лесах Центральной Сибири. Аэрозоли Сибири. IX Рабочая группа (26-29 ноября 2002 г.). Тезисы докладов. Томск, 2002. с.18.
12. Koutsenogii K.P., Samsonov Y.N., Ivanov A. V., Makarov V.I., Churkina T., Ivanov V.A., Conard S.G., McRae D.J., Hao W.M., Emission of Particulate Matter and Gases from Forest Fires. Boreal Forests and Environment: local, regional and global scales. XI International Conference IBFRA (August 5-9, 2002, Krasnoyarsk, Russia). pp.46.
13. Ivanov A.V. Calculation of Emissions Volume at Surface Forest Fires of Different Intensity. Boreal Forests and Environment: local, regional and global scales. XI International Conference IBFRA (August 5-9, 2002, Krasnoyarsk, Russia). pp.34.
14. Иванов А.В. Состав аэрозолей при лесных пожарах в сосняке лишайниково-зеленомошном // Материалы международной научно-практической конференции. Хабаровск, 2002, с. 215-218.
15. Koutsenogii K., Samsonov Y., Makarov V., Churkina T., Ivanova G., Ivanov A., Conard S., Baker S., Hao W., McRae D., Smirnova A., Kovalskaya G., Smolyakov B., Chankina O., Savchenko T. Ecological consequence wildland fire in Siberian boreal forest. Macro and Trace Elements. Mengen- und Spurenelemente Agricultural, Biological, Environmental, Nutritional and Medical Importance of Macro, Trace and Ultra Trace Elements. Workshop. October, 18th and 19th, 2002. Main Building of the Friedrich Schiller University. Jena. 2002, pp. 364-370.

153349K