

В.С. Козлов, М.В. Панченко, Е.П. Яшуева

Относительное содержание сажи в субмикронном аэрозоле как индикатор влияния дымов удаленных лесных пожаров

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 9.02.2006 г.

По данным многолетних круглосуточных измерений на аэрозольной станции ИОА СО РАН коэффициента рассеяния сухой основы субмикронного аэрозоля и концентрации сажи в частицах проанализировано влияние дымов лесных пожаров на изменчивость относительного содержания сажи в приземном аэрозоле.

Выявлена устойчивая закономерность более низкого, по сравнению с фоновым аэрозолем, относительного содержания сажи в дымах удаленных лесных пожаров (1–4,5%), приводящая к уменьшению его значений при вторжении дымовой мглы в район измерений (*P*-эффект). По результатам *in situ* измерений и лабораторных экспериментов установлено, что этот эффект в нашем регионе проявляется устойчиво и обусловлен определяющим вкладом процесса пиролиза лесных горючих материалов в формирование свойств частиц дымовой мглы.

Предложено использовать относительное содержание сажи в субмикронном аэрозоле в качестве информационного признака (*P*-критерия) для выделения состояний атмосферы приземного слоя, которые отягощены воздействием удаленных от точки наблюдения лесных пожаров.

Введение

Важной оптической характеристикой аэрозоля, учитывающей соотношение рассеяния и поглощения в переносе радиации, является величина альбедо однократного рассеяния, равная отношению коэффициента рассеяния к коэффициенту ослабления. Наибольшие проблемы при оценке роли аэрозоля в радиационном балансе атмосферы возникают из-за большой неопределенности в знании именно альбедо однократного рассеяния. Радиационные расчеты показывают [1], что если альбедо однократного аэрозольного рассеяния в видимой области спектра превышает значение 0,85, то аэрозольные частицы играют роль выхолаживающего фактора. В случае, когда альбедо меньше этой величины, аэрозоль начинает играть роль разогревающего фактора и действует так же, как и парниковые газы.

Проблема корректного задания альбедо для радиационных расчетов определяется рядом серьезных объективных причин — чрезвычайно сильной пространственно-временной изменчивостью микрочисленных характеристик аэрозоля и его химического состава под воздействием природных и антропогенных факторов, сложностью измерительной техники и в силу этого явной недостаточностью существующих пунктов измерений [2] и регулярности наблюдений даже в приземном слое атмосферы.

Нами с 1996 г. на автоматической аэрозольной станции ИОА СО РАН ведутся комплексные измерения аэрозольных характеристик с целью изучения приоритетных процессов, определяющих формирование аэрозольного состава атмосферы, выявления роли природных и антропогенных составляющих, исследования характерных источников.

В настоящей статье рассматривается один из факторов, который во многом определяет аэрозольную погоду [3], по крайней мере в региональном масштабе.

В регионах, содержащих обширные лесные массивы и торфяные болота, в теплый период года одним из важных источников аэрозоля, который существенно влияет на его состав, являются процессы горения биомассы: лесные пожары, возгорания торфяников и палы растительности [4, 5]. Эти процессы обуславливают эмиссию в атмосферу большого количества аэрозольных частиц и сажи (BC — black carbon, кристаллический углерод).

Известно, что сажа в видимой области спектра является основным поглощающим компонентом в составе аэрозоля [6, 7]. Известно также, что дымы лесных и торфяных пожаров по сравнению с промышленными дымами содержат сажи относительно меньше [8]. Но часто, ориентируясь на факт дополнительного поступления сажи, исследователи полагают, что в атмосфере над обширными территориями, подверженными влиянию природных пожаров, величина альбедо однократного рассеяния должна понижаться. В то же время измерения на аэрозольной станции ИОА показывают, что в нашем регионе в подавляющем большинстве случаев наблюдается *обратная* картина.

Очевидно, что значение альбедо однократного рассеяния частиц в первую очередь зависит от отношения массы поглощающего вещества и общей массы аэрозоля. На основе анализа большого количества зарегистрированных дымовых эпизодов в настоящей статье показано, что в случаях поступления в пункт наблюдений дымов от лесных пожаров это отношение снижается по сравнению с величи-

ной, характерной для природных дымок. Более того, мы предлагаем использовать факт понижения относительного содержания сажи в общей массе частиц субмикронного аэрозоля ниже определенной величины как индикатор того, что в данном случае атмосфера испытывает воздействие удаленных природных пожаров.

Теоретический подход и результаты лабораторных экспериментов

Любой информационный признак обнаружения должен опираться на устойчивые особенности объекта исследования, обеспечивающие его применение с заданной степенью достоверности. В нашем случае была поставлена задача выявить те характеристики аэрозоля в атмосфере, которые позволят выделять воздействие дымов природных пожаров на фоне всего многообразия состояний приземного аэрозоля непосредственно для исследуемого региона.

Для того чтобы в качестве критерия обосновать использование величины относительного содержания ВС в составе субмикронного аэрозоля, были привлечены результаты наших лабораторных экспериментов [9–12] и данные наблюдений в приземном слое атмосферы за период 1997–2005 гг. [13–18].

Возможность применения этой величины априорно обосновать не удастся, поскольку ее значение существенным образом зависит от режима горения.

Кинетическая теория образования сажи при термическом разложении углеводов в газовой фазе в силу своей сложности в настоящее время развита недостаточно полно. Известно, что в этом случае интенсивность образования ВС в значительной степени зависит от химического состава материала (соотношение С/Н), температуры горения, условий смешения продуктов горения с воздухом (избыток кислорода; турбулентность смешения) и других факторов [19].

В целом при термическом разложении углеводородных материалов реализуются цепочки химических реакций окисления дымообразующих газов. Дымовой аэрозоль относится к аэрозолям конденсационной природы и формируется при охлаждении дымообразующих газов [20]. При идеальном процессе горения углеводородных материалов (высокие температуры, кислородный наддув, рециркуляция дымовых газов в зону горения) химические реакции должны приводить к полному окислению газов с выделением в воздух лишь углекислого газа и воды.

Образование частиц является показателем неполного окисления газообразных продуктов горения, что обычно и происходит в реальных природных и антропогенных процессах. На низких стадиях окисления углерод в газообразных продуктах в основном находится в связанном состоянии в легких углеводородных соединениях. Высокотемпературный режим ускоряет протекание окислительных реакций в газовой фазе. Интенсивное образование кристаллического углерода в дымовом аэрозоле

свойственно высоким стадиям окисления при горении топлив.

Далее при обсуждении экспериментальных данных будем исходить из предположения, что динамика образования дыма при горении природных горючих материалов (ПГМ) согласуется с рассмотренными выше принципами теории образования ВС при термическом разложении углеводов в газовой фазе. В этом случае естественно ожидать, что химический состав дымовых частиц (и содержание ВС) даже для одного типа материала будет изменяться в зависимости от достигаемой в реальном процессе степени окисления дымообразующих газов, а степень окисления в значительной мере определяется температурным режимом горения.

В оптических проявлениях увеличение доли ВС в аэрозоле повышает как показатель поглощения, так и показатель преломления вещества дымовых частиц.

Выполненные нами лабораторные исследования в аэрозольных камерах различного объема (1800 и 0,1 м³) позволили установить, что режим горения действительно является определяющим фактором в формировании поглощающих свойств дымовых частиц [9–12].

В экспериментах, в частности, исследовались дымы при сжигании древесины (сосна, береза, хвоя) в двух режимах: 1) *пиролиз* — низкотемпературное разложение при 500 °С без пламени («тление»); 2) *горение с пламенем* — высокотемпературное сжигание при 900 °С при свободном доступе кислорода.

Первая часть экспериментов была проведена в Большой аэрозольной камере ИОА СО РАН (объем 1800 м³). Здесь с помощью нефелометра измерялись коэффициенты аэрозольного рассеяния дымового аэрозоля на длинах волн 0,41, 0,51 и 0,63 мкм и на протяженной трассе (40 м) — коэффициент аэрозольного ослабления на длине волны 0,63 мкм [9, 10]. Результаты синхронных измерений позволили изучить изменчивость альbedo однократного рассеяния дымового аэрозоля в видимой области спектра в зависимости от режима горения. Приближенные оценки величины альbedo ω показали, что его значения составляют ≈ 1 для частиц, образующихся в режиме пиролиза, и $\approx 0,4$ — для частиц при горении с пламенем.

Более детальный этап лабораторных экспериментов был осуществлен в специальной камере небольшого объема — 0,1 м³ [11]. Применение камеры такого объема дало возможность исследовать особенности изменчивости дисперсного состава и оптических постоянных частиц в зависимости от режима горения. С этой целью с помощью поляризационного спектронефелометра на 10 длинах волн в интервале 0,44–0,69 мкм измерялись две ортогонально поляризованные компоненты рассеянного света для углов рассеяния 15, 45, 110, 135, 165° и была решалась обратная оптическая задача. Результаты исследований показали, что при переходе от пиролиза к горению с пламенем оптические постоянные частиц возрастают. Это проявляется в увеличении

значений показателя преломления частиц n от 1,48÷1,55 до 1,65. Также при переходе к пламенному горению существенно увеличиваются значения показателя поглощения частиц χ от 0÷0,004 до ≈0,05.

Таким образом, при пиролизе древесных материалов образуются слабопоглощающие, тогда как при режиме горения с пламенем — сильнопоглощающие частицы. Понятно, что эти различия в оптических характеристиках дымов для разных режимов горения определяются разницей химического состава и отчасти морфологией частиц.

Косвенным доказательством физико-химических различий свойств частиц при разных режимах горения являются результаты наших экспериментов с активными воздействиями [9]. Воздействия осуществляются посредством контролируемого искусственного изменения метеопараметров (влажность, температура) в воздушном потоке, содержащем анализируемый аэрозоль и прокачиваемом через рассеивающий объем нефелометра. Далее при описании этих процессов будем пользоваться понятиями прямого влажностного или температурного воздействия на аэрозоль. Сущность применяемых методов активного воздействия следующая:

1. Один из способов активного воздействия на аэрозоль позволяет измерять параметр конденсационной активности частиц. С этой целью при оптических измерениях осуществляется постепенное увеличение в воздушном потоке относительной влажности воздуха от 20–30 до 95%. Измеряемые оптические характеристики субмикронного аэрозоля, как функция относительной влажности воздуха (измерение *гигрограмм*), в первом приближении достаточно хорошо описываются эмпирической формулой типа Кастена–Хенела [21]:

$$\mu(RH) = \mu(RH = 0)(1 - RH)^{-\gamma},$$

где μ — коэффициент направленного аэрозольного рассеяния под углом 45° на длине волны 0,51 мкм; RH — относительная влажность воздуха; γ — параметр конденсационной активности частиц.

2. Еще одним способом активного воздействия является так называемый «термооптический» метод (измерение *термограмм*). Этот метод позволяет при контролируемом нагреве аэрозольных частиц в диапазоне температур от температуры окружающего воздуха до $T = 350$ °С качественно оценить относительное содержание веществ с разной летучестью в составе аэрозольного вещества [10].

Для реализации режима активных воздействий проточный нефелометр типа ФАН был снабжен устройствами для искусственного увлажнения исследуемого аэрозоля до значений относительной влажности воздуха 95% или нагрева до 350 °С [22]. По данным измерений гигрограмм и термограмм коэффициента направленного аэрозольного рассеяния оценивались параметры конденсационной активности частиц γ и «летучести» частиц $\eta = \mu(25$ °С)/ $\mu(350$ °С). Выбранные параметры косвенно характеризуют химический состав частиц, описывая их активность в конденсационном процессе и долю летучих соединений в аэрозоле.

Анализ показал, что в дымовом аэрозоле изменение этих параметров определяется режимом горения. Так, конденсационная активность для пиролизных частиц сравнительно невысока — $\gamma = 0$ ÷0,1 и возрастает для частиц пламенного горения до 0,2–0,6. Вместе с тем частицам дымов пиролиза при нагреве до 350 °С свойственно сильное «выгорание» — $\eta = 5$ ÷15, тогда как частицы пламенного горения «выгорают» слабо — $\eta < 4$. Из этих оценок следует, что пиролизные дымы содержат большую долю (более 80%) легколетучих соединений, а в частицах дымов горения с пламенем значителен вклад (более 40%) малолетучих соединений.

Представленная на рис. 1 для древесных дымов диаграмма связи параметра конденсационной активности γ и параметра летучести частиц η иллюстрирует отмеченные выше устойчивые тенденции изменчивости этих параметров в зависимости от режима горения. Области значений γ и η , соответствующие различным режимам, на диаграмме отчетливо разделились. Так, пиролизные частицы характеризуются высокими значениями параметра $\eta > 5$, что является показателем высокого содержания легколетучих соединений, и низкой конденсационной активностью $\gamma = 0$ –0,1 (область 2 на рис. 1).

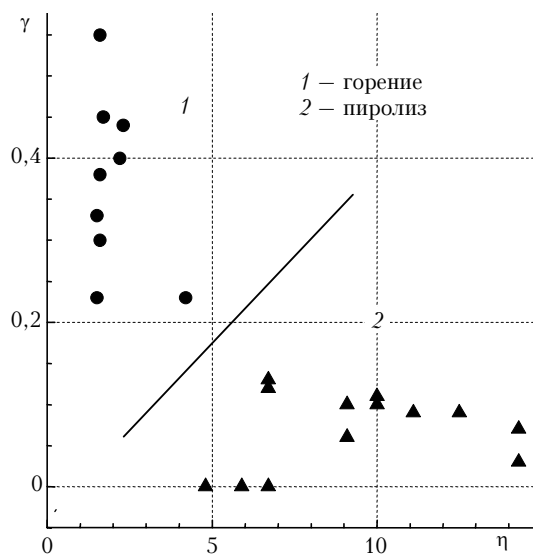


Рис. 1. Диаграмма связи параметра конденсационной активности дымовых частиц γ с параметром летучести η для режимов горения и пиролиза

Качественная схема формирования свойств дымового аэрозоля представлена на рис. 2 в виде диаграммы, описывающей изменчивость показателей преломления и поглощения вещества частиц в зависимости от физических процессов. На диаграмме нами обобщены сведения, следующие из описанных выше данных лабораторных экспериментов и из кинетической теории ВС-образования.

Переменение по оси ординат от низкотемпературных режимов беспламенного пиролиза к высокотемпературному горению с пламенем (возрастание степени окисления) приводит к увеличению содержания ВС в частицах и соответственно к рос-

ту значений показателя поглощения частиц χ . Конденсационное обводнение частиц в поле влажности (движение влево по оси абсцисс) приводит к уменьшению величины показателя преломления n .

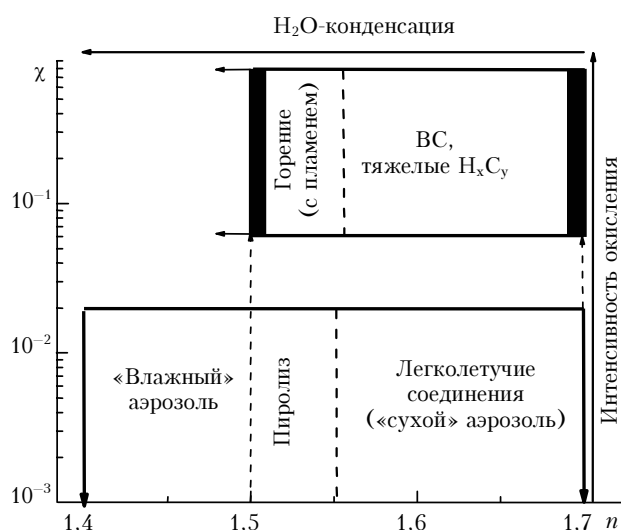


Рис. 2. Диаграмма изменчивости оптических постоянных вещества дымовых частиц и их связь с физическими процессами

Полученные результаты в целом свидетельствуют о том, что разные режимы горения генерируют дымовые частицы качественно различного химического состава. При пиролизе древесных материалов дымовые частицы содержат мало ВС и в основном состоят из легколетучих смолистых соединений, которые активно «выгорают» при искусственном нагреве частиц. В противоположность этому высокая степень окисления в дымах горения с пламенем приводит к образованию частиц с большим содержанием ВС и малым вкладом легколетучих соединений.

Результаты натуральных измерений

Частые лесные и торфяные пожары в Сибири являются важным фактором, определяющим состав атмосферного аэрозоля в теплый период года. По данным наземных наблюдений и спутниковой информации их шлейфы могут покрывать обширные территории. Для анализа влияния природных пожаров нами использованы результаты измерений на аэрозольной станции ИОА, расположенной в окрестности г. Томска [13].

Здесь в приземном слое воздуха проводятся ежечасные круглосуточные измерения коэффициента направленного рассеяния сухой основы субмикронного аэрозоля под углом 45° на длине волны $0,51 \text{ мкм}$ (нефелометр типа ФАН) и с помощью аэлометра [23] — массовой концентрации ВС в частицах. Текущие данные станции доступны по сети Internet (<http://aerosol1.iao.ru>). По данным о коэффициенте направленного аэрозольного рассеяния μ ($\text{км}^{-1} \cdot \text{стер}^{-1}$) оценивается массовая концентрация субмикронного аэрозоля M_a ($\text{мкг}/\text{м}^3$) = $2400 \times \mu$

(с помощью однопараметрической модели атмосферных дымок [24]; для плотности вещества частиц $1,5 \text{ г}/\text{см}^3$). Величина относительного содержания ВС в сухой основе субмикронного аэрозоля P определяется как отношение массовых концентраций ВС и аэрозоля со средней погрешностью около 25%.

Рассмотрение полных массивов данных за 1997–2005 гг. показало, что наблюдаемые единичные значения массовых концентраций аэрозоля, ВС и относительного содержания сажи варьировали в пределах $3\text{--}570 \text{ мкг}/\text{м}^3$, $0,1\text{--}25 \text{ мкг}/\text{м}^3$ и $1\text{--}20\%$ соответственно. Для среднемесячных данных соответствующие диапазоны вариаций сужаются до значений $12\text{--}95 \text{ мкг}/\text{м}^3$, $0,7\text{--}3 \text{ мкг}/\text{м}^3$ и $3\text{--}14\%$.

Для дальнейшего анализа из всего накопленного материала был выбран подмассив данных в периоды, когда атмосфера в точке наблюдения была подвержена воздействию дымов природных пожаров. Данные, которые были получены в ситуациях, когда с большой степенью достоверности можно полагать отсутствующим влияние дымовой составляющей, для удобства изложения далее будем условно называть «фоновыми» или «естественными» [25].

На рис. 3 приведены усредненные за 9 лет годовые ходы рассматриваемых аэрозольных характеристик. В фоновых условиях годовые ходы рассматриваемых аэрозольных параметров характеризуются зимним максимумом и летним минимумом. Среднемесячные значения концентраций аэрозоля и ВС в течение года варьировали в среднем в 2–3 раза.

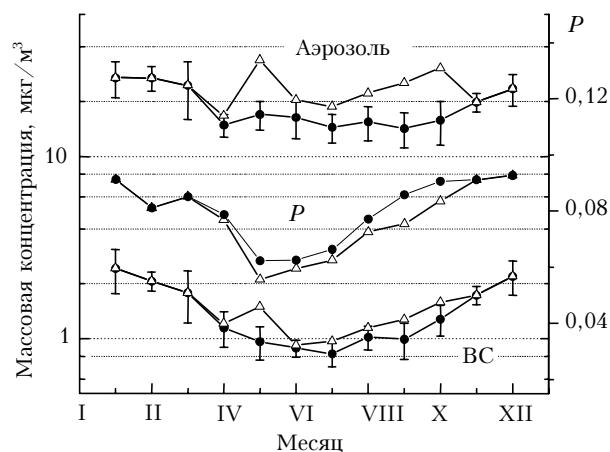


Рис. 3. Средние годовые ходы концентраций аэрозоля, ВС и относительного содержания ВС (1997–2005 гг.; Δ — с учетом пожаров, \bullet — фоновый аэрозоль)

Вторжения задымленных воздушных масс в район измерений происходили при пожарах в лесных массивах Томской, Новосибирской и Омской областей, в Красноярском крае. В сентябре 2002 г. был зарегистрирован дальний перенос дымов от пожаров в Подмоскowie [26–28]. Наибольшее воздействие дымов лесных пожаров и горения торфяников на аэрозольные характеристики наблюдалось в 1997 г. (сентябрь–октябрь), 1999 г. (июль–август) и 2003 г. (май–октябрь). Рост среднегодовых значений массовой концентрации аэрозоля за счет

пожаров относительно «фоновых» условий для этих лет составил 1,6; 1,2 и 1,4 раза соответственно. Отличия для среднесезонных и среднесуточных значений существенно выше. Примером сильного воздействия пожаров на аэрозольный состав воздуха явилась плотная дымовая мгла 1997 г. (со снижением дальности видимости до 1–2 км), в которой среднесезонные концентрации аэрозоля и ВС возросли в 7,5 и 1,7 раза соответственно.

Воздействие дымов обычно проявляется в период с апреля по октябрь и максимально в весенний и осенний сезоны года.

Из анализа среднегодовых и среднесуточных массивов данных следует, что при переходе от «фоновых» условий к задымленной атмосфере устойчиво наблюдается тенденция уменьшения относительного содержания ВС в частицах (рис. 3, 6).

Следовательно, для нашего региона экспериментально установленная закономерность уменьшения относительного содержания поглощающего вещества в субмикронном аэрозоле при появлении дымовой составляющей вполне может быть использована как индикатор. Условно эта величина названа нами *P*-критерием.

P-критерий

На рис. 4 приведен снимок Томской области, сделанный в период сильного задымления атмосферы 16 мая 2004 г. со спутника серии МОДИС.

На снимке видно, что значительная часть территории области при измерениях была закрыта дымовыми шлейфами лесных пожаров.

Анализ показал [16], что приход в район измерений сильно задымленной воздушной массы сопровождается значительным увеличением в приземном слое концентраций субмикронного аэрозоля и ВС (рис. 5).

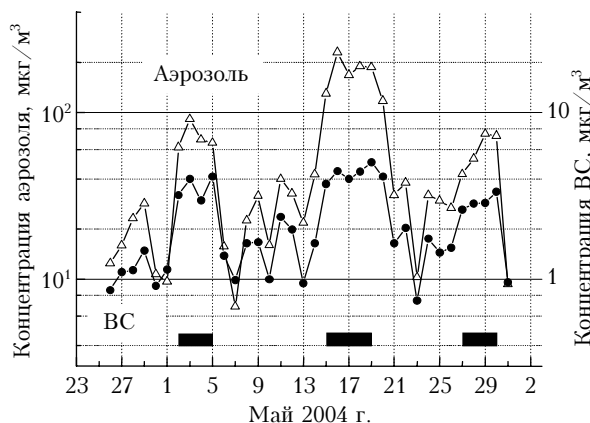


Рис. 5. Временной ход среднесуточных значений концентрации аэрозоля и ВС (эпизоды дымовой мглы помечены на временной шкале отрезками)

В течение этого месяца зафиксированы три сильных вторжения задымленных воздушных масс. В дымовой мгле среднесуточные массовые концентрации аэрозоля (110–230 мг/м³) и ВС (3,7–5 мг/м³) значительно превысили соответствующие

значения концентраций (7–16 и 1–1,4 мг/м³), наблюдавшиеся в условиях слабого воздействия дымов (6–9 мая). Максимальные почасовые значения концентраций в дымах возросли до 460 мг/м³ (аэрозоль) и 9 мг/м³ (ВС). Наиболее мощная дымовая мгла наблюдалась с 13 по 23 мая. На рис. 5 отчетливо прослеживаются временные стадии прихода (2 сут), устойчивого состояния (5 сут) и замены-распада (4 сут) мглы. Наиболее важной особенностью в динамике аэрозольного состава является сильное различие темпов роста концентраций аэрозоля и ВС. Как видно из рис. 5, если содержание аэрозоля возрастает в среднем в 10 раз, то увеличение концентрации ВС в среднем в 3 раза.

Вследствие этой закономерности, которая справедлива для всех зафиксированных случаев дымовой мглы, под воздействием дымов наблюдается эффект уменьшения относительного содержания сажи в частицах [14, 15]. На рис. 6 отчетливо видны все стадии развития дымовой мглы.

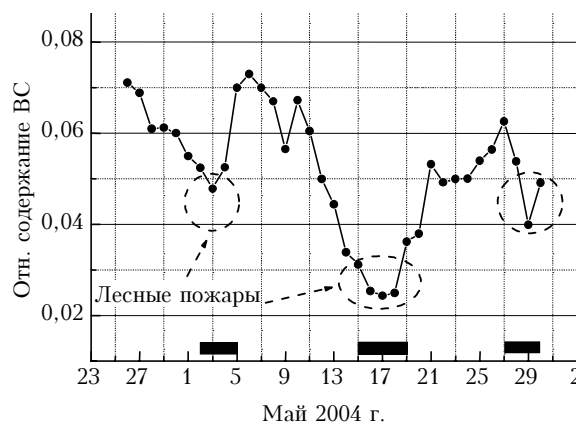


Рис. 6. Временной ход среднесуточных значений относительного содержания ВС (эпизоды дымовой мглы помечены на временной шкале отрезками)

Анализ полного массива 9-летних измерений показал, что в незадымленной (фоновой) атмосфере в теплый период года среднесуточные значения *P* изменяются в пределах 5–10% при концентрациях аэрозоля и сажи в среднем 10–20 и 1–2 мг/м³ соответственно. Рассмотренные выше результаты позволяют сделать вывод о том, что дымы лесных пожаров характеризуются очень низким относительным содержанием ВС в субмикронных частицах, существенно меньшим (более чем в 3 раза) его значений в фоновом аэрозоле нашего региона.

Рис. 7 иллюстрирует связь относительного содержания ВС в субмикронном аэрозоле с коэффициентом аэрозольного рассеяния сухой основы частиц. По результатам измерений *P* для 5 лет наблюдений (май–сентябрь) приведены две выборки данных. Каждая из точек на рис. 7 является результатом усреднения значений *P* по 3–4 сут. Формирование выборок опиралось на данные спутниковой информации и визуальных наблюдений. Первая выборка данных (светлые значки) соответствует фоновому аэрозолю. Вторая выборка (темные знач-

ки) иллюстрирует надежно зафиксированные случаи воздействий дымов лесных пожаров.

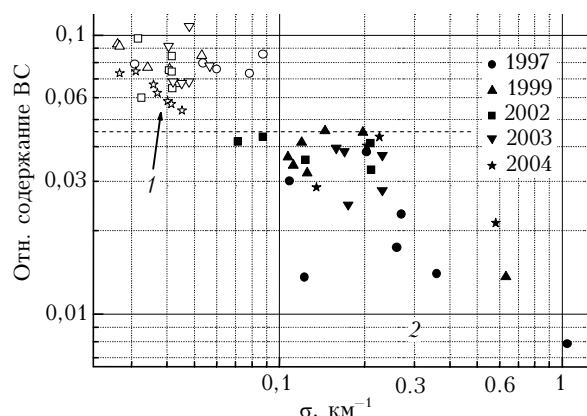


Рис. 7. Диаграмма взаимных вариаций относительного содержания ВС и коэффициента аэрозольного рассеяния сухой основы частиц в условиях фоновой (1) и задымленной (2) атмосферы по выборкам данных в 1997–2004 гг.

Вариации P для фонового аэрозоля происходят в диапазоне $P = 6–10\%$ (область 1). В задымленной атмосфере диапазон вариаций P с вероятностью около 90–95% соответствует значениям $P \leq 4,5–5\%$ (область 2). Эти значения P могут приближенно рассматриваться как уровень раздела наиболее вероятных значений P для фонового и дымового аэрозолей.

Естественно считать, что достигаемая нижняя оценка $P = 0,5 \div 1,5\%$ соответствует «истинному» значению P в плотной дымовой мгле лесных пожаров.

Рассмотренные данные натурных и лабораторных исследований свидетельствуют о том, что частицы в дымовых шлейфах удаленных лесных пожаров характеризуются очень низкими значениями относительного содержания сажи и, следовательно, низким показателем поглощения вещества частиц, т.е. являются слабопоглощающими и проявляют тем самым явные признаки частиц режима пиролиза. Соответствующие оценки показали, что в дымах лесных пожаров достигаются высокие значения альбедо однократного рассеяния в видимой области спектра $\omega > 0,95$ [17, 29], из чего следует, что в радиационно-климатическом воздействии дымы лесных пожаров проявляют себя как выхолаживающий фактор.

По-видимому, преобладающая роль пиролиза в формировании свойств дымового аэрозоля объясняется, в первую очередь, более высокими значениями коэффициента эмиссии аэрозольной массы при пиролизе по сравнению с режимом пламенного горения, что было установлено ранее при лабораторных исследованиях (см., например, [9, 30]). Вероятно, в зонах фронта лесного пожара при горении с пламенем значительная доля биомассы окисляется и «выгорает» в газовой фазе.

Дополнительным подтверждением в основном пиролизной природы частиц в дымовых шлейфах лесных пожаров служат представленные на рис. 8 результаты измерений гигрограмм и термограмм

субмикронного аэрозоля в дымовой мгле в мае 2004 г. [16].

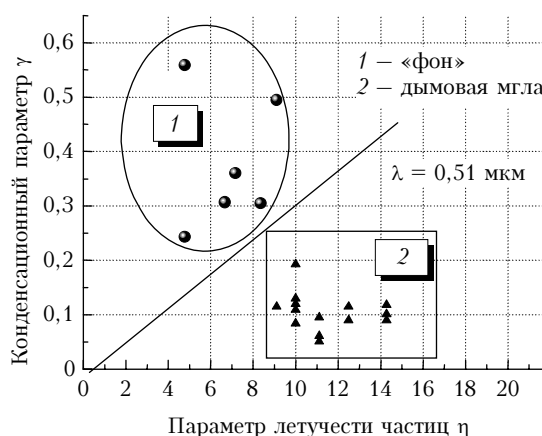


Рис. 8. Диаграмма связи параметра конденсационной активности частиц γ и параметра летучести частиц η в дымовой мгле лесных пожаров (май 2004 г.)

Как видно из диаграммы, суточные реализации для дымов компактно сгруппировались (область 2) отдельно от реализаций для фоновых условий (область 1). Частицам дымов свойственны низкие значения параметра конденсационной активности 0,05–0,2 и высокое содержание легколетучих соединений (параметр летучести при нагреве до 250 °С превышает 9). В фоновых условиях эти параметры соответственно варьировали в пределах 0,24–0,55 и менее 9.

Сопоставление полученных *in situ* данных (см. рис. 8) с результатами лабораторных экспериментов (см. рис. 1) показывает, что по своим свойствам частицы в реальной дымовой мгле соответствуют области режима пиролиза.

Таким образом, полученные результаты подтверждают, что P -критерий действительно может использоваться, по крайней мере в нашем регионе, для выделения состояний атмосферы приземного слоя, которыеотягощены воздействием дымов лесных пожаров.

Заключение

Установлена устойчивая закономерность более низкого относительного содержания ВС в дымах лесных пожаров (от 1 до 4,5%) по сравнению с фоновым аэрозолем.

Многолетние измерения подтвердили, что этот эффект в нашем регионе проявляется устойчиво и обусловлен определяющим вкладом процесса пиролиза лесных горючих материалов в формирование свойств частиц дымовой мглы.

Предложено использовать относительное содержание ВС в субмикронном аэрозоле в качестве критерия (по уровню $P \leq 4,5–5\%$) для выделения состояний атмосферы приземного слоя, которыеотягощены воздействием удаленных от точки наблюдения лесных пожаров.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ARM-контракта N 5012 и РФФИ (гранты № 06-05-64393, 06-05-64842).

1. Зуев В.Е., Тутов Г.А. Оптика атмосферы и климат. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 9. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 1996. 271 с.
2. Delene D.J., Ogren J.A. Variability of aerosol optical properties at four North American surface monitoring sites // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 4. P. 1135–1150.
3. Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М., Белан Б.Д. Геофизические факторы формирования аэрозольной погоды Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 10. С. 922–934.
4. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
5. Сухинин А.И. Якутские пожары 2002 г. как прообразы глобальных экологических катастроф: Материалы докл. // V Междунар. конф. «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия». Красноярск, июль, 2003. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. С. 181–182.
6. Розенберг Г.В. Тонкодисперсный аэрозоль и климат // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1982. Т. 18. С. 1192–1198.
7. Jacobson M.Z. Strong radiative heating due to the mixing slate of black carbon in atmospheric aerosols // Nature (Gr. Brit.). 2001. N 409. P. 695–697.
8. Гинзбург А.С. Планета Земля в «последядерную» эпоху. Серия публикаций «Международный мир и разрушение» (выпуск 48). М.: Наука, 1987. 101 с.
9. Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г. Влияние режимов горения углеводородных топлив на оптические свойства дымовых аэрозолей // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 10. С. 1278–1288.
10. Kozlov V.S., Panchenko M.V. Investigation of optical characteristics and particle-size distribution of wood-smoke aerosols // Combust. Expl. Shock Waves. 1996. V. 32. N 5. P. 577–588.
11. Рахимов Р.Ф., Макиенко Э.В., Панченко М.В., Козлов В.С., Шмаргунов В.П. Изменение микроstructures древесных дымов в малогабаритной аэрозольной камере под воздействием различных факторов // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 4. С. 337–346.
12. Веретенников В.В., Козлов В.С., Наац И.Э., Фадеев В.Я. К определению оптических постоянных и микроstructures дымовых аэрозолей из поляризационных оптических измерений // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1980. Т. 16. № 3. С. 270–276.
13. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Tumafov A.G., Shmargunov V.P., Yausheva E.P. Some peculiarities of the mutual variability of the content of soot and submicron aerosol in the near-ground air layer // J. Aerosol Sci. 1997. V. 28. Suppl. 1. P. 231–232.
14. Козлов В.С., Панченко М.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н., Яушева Е.П. Исследование особенностей динамики оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в дымовой мгле // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 406–410.
15. Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П. Об изменчивости относительного содержания сажи в субмикронном аэрозоле в приземном слое воздуха: Тезисы докл. // IX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, ноябрь, 2002. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 53.
16. Козлов В.С., Панченко М.В., Терпугова С.А., Яушева Е.П. О вариациях оптико-микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля в дымах лесных пожаров: Материалы докл. // Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии». Горно-Алтайск, июль, 2004. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. С. 301–302.
17. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. About the effect of forest fire smokes on the dynamics of the single scattering albedo of near-ground submicron aerosol: Abstracts // XXII Intern. symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk, June, 2005. Tomsk: IAO SB RAS, 2005. P. 159–160.
18. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Relative content of black carbon in submicron aerosol as a sign of the effect of forest fire smokes // Proc. Fifteenth ARM Science Team Meeting, March 14–18, 2005. Daytona Beach, Florida, USA, 5 p. http://www.arm.gov/publications/proceedings/conf15/extended_abs/kozlov_vs.pdf
19. Теснер Р.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы. М.: Химия, 1972. 340 с.
20. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли – пыли, дымы и туманы. Л.: Химия, 1969. 428 с.
21. Hanel G. The properties of atmospheric aerosol particles as function of relative humidity at the thermodynamic equilibrium with surrounding moist air // Adv. Geophys. 1976. V. 19. P. 73–188.
22. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория АН-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 10. С. 1012–1021.
23. Козлов В.С., Бурков В.В., Панченко М.В., Шмаргунов В.П. Оптический измеритель массовой концентрации поглощающего вещества аэрозоля (сажи) в воздухе // Наука – производству. 2003. № 9. С. 15–19.
24. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 39–49.
25. Панченко М.В., Тумаков А.Г., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Шмаргунов В.П., Яушева Е.П. К вопросу о формировании среднерегionalного аэрозольного фона // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8. № 7. С. 1112–1114.
26. Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Ужegov В.Н., Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Белан Б.Д., Аршинов М.Ю., Рассказчикова Т.М., Аникин П.П., Горчаков Г.И., Исаков А.А., Копейкин В.М., Свириденков М.А., Семутникова Е.Г., Холбен Б., Смирнов А.В. Эхо пожаров Подмосковья в атмосфере Западной Сибири: Тезисы докл. // IX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, ноябрь, 2002. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 3.
27. Исаков А.А. Спектрополяриметрические и нефелометрические исследования приземного аэрозоля в период лесных и торфяных пожаров в Подмосковье в 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2003. Т. 39. № 6. С. 1321–1324.
28. Горчаков Г.И., Аникин П.П., Волох А.А., Емиленко А.С., Исаков А.А., Копейкин В.М., Пономарева Т.Я., Семутникова Е.Г., Свириденков М.А., Шукуров К.А. Исследование состава задымленной атмосферы Москвы во время пожаров торфяников ле-

- том — осенью 2002 г. // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2004. Т. 40. № 3. С. 366–380.
29. Свириденков М.А. Оценка поглощающих свойств дымовых аэрозолей по измерениям отношения потоков рассеянного и прямого солнечного излучения: Тезисы докл. // IX Рабочая группа «Аэрозоли Сибири». Томск, ноябрь, 2002. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2002. С. 12.
30. Cashier H. Carbonaceous combustion aerosols // Atmospheric particles / Ed. by R.M. Harrison and R. Van Grieken. J. Wiley & Sons Ltd., 1998. P. 295–348.

V.S. Kozlov, M.V. Panchenko, E.P. Yausheva. Mass fraction of soot in submicron aerosol as an indicator of influence of remote forest fire smokes.

Based on many-year diurnal measurements at the Aerosol station of the IAO SB RAS of the scattering coefficient of the submicron aerosol dry base and soot concentration in particles, the influence of forest fire smokes on variability of the soot concentration in the near-ground aerosol have been analyzed. A stable regularity of a lower soot concentration in remote forest fire smokes (1–4.5%) comparative to the background aerosol resulting in the decrease of its values, when smog intrusion into the measurement region (*P*-effect), is revealed. It was found from the *in situ* measurements and laboratory experiments that this effect is stable in our region and stipulated by the determining contribution of the process of forest combustible materials pyrolysis into formation of smog particles.

It is proposed to take the relative contribution of soot in the submicron aerosol as an information sign (*P*-criterion) for distinguishing states of the ground atmospheric layer affected by influence of forest fires far removed from the observation site.



Рис. 4. Спутниковый снимок дымовых шлейфов лесных пожаров (16.05.2004, Томская область, МОДИС)