

А.А. Леженин¹, В.М. Мальбахов², В.А. Шлычков³

Численная модель миграции аэрозоля, образовавшегося в зоне лесных пожаров

¹ Красноярский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями, г. Красноярск,

² Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,

³ Институт водных и экологических проблем СО РАН (Новосибирский филиал), г. Новосибирск

Поступила в редакцию 4.01.2003 г.

Рассмотрены результаты численного моделирования локальной атмосферной циркуляции над зоной лесного пожара. В качестве базовых используются две численные модели пограничного слоя атмосферы: с детальным разрешением по горизонтали с возможностью явного воспроизведения ансамбля конвективных крупных вихрей и гидростатическая модель для изучения крупномасштабного переноса дымового факела. Представлены результаты численных экспериментов для типичного пожара средних широт.

Введение

Лесные пожары наносят ощутимый вред деятельности человека. В первую очередь это материальные потери из-за нарушения структуры или гибели используемой человеком лесной флоры и фауны. На втором месте стоит вред, наносимый здоровью человека из-за изменения состава атмосферы. Этот фактор редко представляет непосредственную опасность для жизни человека, но, безусловно, вреден для здоровья. Кроме того, пожары часто создают дискомфортную обстановку в регионах, отстоящих на многие десятки километров от очага, что в 2002 г. почувствовали жители Москвы. Дым от подмосковных пожаров достиг г. Томска [1], удаленного на 3000 км от источника возгорания. И наконец, лесные пожары вносят заметный вклад в аэрозольный состав атмосферы, поставляя в атмосферу ядра конденсации водяного пара и ядра коагуляции облачных частиц, влияя тем самым на процессы облако- и осадкообразования [2].

Согласно [2] лесным пожаром называется явление неуправляемого многостадийного горения в открытом пространстве на покрытой лесом площади, в рамках которого имеют место взаимосвязанные процессы конвективного и радиационного переноса энергии, нагревания, сушки и пиролиза лесных горючих материалов (ЛГМ), а также горение газообразных и догорание конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ. Лесные пожары разделяются на низовые, повальные верховые, вершинные верховые и подземные (пожары на торфяниках). При низовых пожарах сгорают опад (опавшие веточки, хвощики и листья), надпочвенный покров (травы, мхи, лишайники), а также кустарники. При повальном верховом пожаре одновременно сгорают ЛГМ в нижнем лесном слое и ЛГМ в пологе леса (совокуп-

ность крон деревьев). При вершинном лесном пожаре сгорают ЛГМ только в пологе леса. Подземными лесными пожарами называют пожары на торфяниках, когда очаг пожара находится в толще торфяного пласта.

Территория, охваченная пожаром, имеет обычно овальную форму, причем зона открытого пламени (фронт пожара) образует внешний контур этого овала, а внутренняя часть состоит из тлеющих ЛГМ. Температура поверхности во внутренней зоне составляет 50–250 °С, скорость продвижения фронта зависит от типа пожара (низовой, верховой) и меняется от миллиметров до метров в секунду.

С точки зрения моделирования можно выделить следующие задачи по изучению лесных пожаров [2, 3]: расчет скорости распространения огня; прогноз конфигурации зоны пожара; изучение тепломассопереноса на фронте и во внутренней зоне; общая математическая модель для описания пожара в целом. Для решения первых трех задач обычно применяются сильно упрощенные математические постановки, учитывающие главные физико-химические факторы, при трансформации многофазной среды (воздух, твердые ЛГМ, жидкие и газообразные продукты пиролиза). В общей модели используют уравнения термогидродинамики, описывающие движение воздуха и продуктов горения с учетом процессов химической кинетики. Решение таких уравнений связано с серьезными математическими и техническими трудностями, поэтому и в общем случае идут на серьезные упрощения как в описании процессов пиролиза, так и в гидродинамическом аспекте, ограничиваясь рассмотрением двумерных или осесимметрических течений. Подробный обзор моделей лесных пожаров с детальным анализом полученных решений дан в [2, 3].

Цель данной работы заключается в описании локальной атмосферной циркуляции в районе лесного пожара на основе вихреразрешающей модели атмосферного пограничного слоя (АПС). Расчетные характеристики течения используются для решения задачи распространения твердых продуктов горения (частиц дыма), образовавшихся в результате лесного пожара. Изучается влияние внешних метеорологических факторов на параметры дымового шлейфа и приземную концентрацию продуктов горения.

Постановка задачи

Основные уравнения и способ турбулентного замыкания численной вихреразрешающей модели для описания конвективных процессов в АПС представлены в [4]. Отметим, что в качестве исходных приняты уравнения гидротермодинамики турбулентной жидкости, записанные в приближении Буссинеска в декартовой системе координат (x, y, z) , где ось z направлена вертикально вверх. Обсудим здесь только краевые условия, отражающие особенности рассматриваемых физических процессов.

В области интегрирования площадью 20×10 км выделяется расширяющаяся со временем зона пожара Ω_R в виде круга радиусом $R_{\text{эф}} = R_0 + \omega_n t$, где ω — скорость распространения пожара по нормали к контуру, t — время. Температура зоны горения Θ_R считается постоянной величиной. Зададим верхнюю границу АПС на уровне $z = H = 2$ км, а область по вертикали разделим на два слоя: $0 \leq z \leq h$ и $h \leq z \leq H$, где h — первый снизу расчетный уровень модели. Высокотемпературные процессы в нижнем слое будем описывать параметрически, причем величину h также будем определять. Над очагом лесного пожара всегда образуется конвективная колонка [2] — струя нагретых продуктов полного и неполного сгорания ЛГМ (частицы сажи и золы в виде дыма). Высота конвективной колонки тем больше, чем больше тепла выделяется при горении.

Для задания температуры и скорости движения воздуха в конвективной колонке воспользуемся упрощенной одномерной теорией атмосферных конвективных термиков над локальным источником тепла, который расположен на или вблизи подстилающей поверхности. Согласно [2, 5] движение воздуха в конвективной колонке можно представить схематически следующим образом. Нагретый под влиянием локального источника тепла воздух поднимается под действием сил Архимеда и охлаждается под действием адиабатического расширения и турбулентного перемешивания с холодным воздухом, который поступает в колонку через ее боковые границы из внешнего пространства. Одномерная теория конвективных термиков [5] дает следующие выражения для параметров пожара:

$$\delta T = T_i - T_e = \delta_0 T_e^{-\alpha z} - \frac{\gamma_a - \gamma}{\alpha} (1 - e^{-\alpha z}); \quad (1)$$

$$W^2 = \frac{g}{\alpha^2 T_e} [2(\alpha \delta_0 T + \gamma_a - \gamma) e^{-\alpha z} - (2\alpha \delta_0 T + \gamma_a - \gamma) e^{-2\alpha z} - \gamma_a + \gamma]; \quad (2)$$

$$\varphi = \varphi_0 e^{-\alpha z}, \quad (3)$$

где δT — среднее значение отклонения температуры в термике T_i от значения температуры в невозмущенной атмосфере T_e ; $\delta T_0 = \delta T$ при $z = 0$; W — среднее значение скорости подъема термика; φ — концентрация частиц дыма; z — вертикальная координата; $\alpha = \frac{1}{M} \frac{dM}{dz}$ — скорость вовлечения холодного окружающего воздуха в термик; M — масса термика; $\gamma = \text{const}$ — температурный градиент политропной атмосферы; γ_a — температурный градиент адиабатической атмосферы.

Соотношения (1), (2) получены при $\alpha = \text{const}$. Этот случай соответствует подъему термика в неподвижной атмосфере, когда масса продуктов, образовавшихся при горении, пренебрежимо мала по сравнению с массой нагретого воздуха. Кроме того, в (1), (2) не учитываются влияние сопротивления среды и подъемная сила, возникающие при движении термика, g — ускорение силы тяжести.

При расчетах принималось, что зона пожара Ω_R вместе с выгоревшей территорией представляет собой внутреннюю часть круга с переменным радиусом $R_{\text{эф}}$. Температура в зоне пожара задавалась постоянной: при $x, y \in \Omega_R$, $z = 0$ $T_i = T_0 = \text{const}$. Скорость вовлечения рассчитывается по соотношению $\alpha = k/R_{\text{эф}}$, где k — безразмерный коэффициент, учитывающий тип пожара. Радиус термика растет с высотой по формуле $R = R_{\text{эф}} + z \text{tg} \theta$, где $\text{tg} \theta \approx 0,2$ [2].

При численном решении задачи атмосферу разделим на два слоя: $z_1 \leq z \leq h$ и $z > h$. Величину h определим из (1) при условии $\delta T(h) = 30$ °С:

$$h = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\delta T_0 \alpha + \gamma_a - \gamma}{\delta T(h) \alpha + \gamma_a - \gamma} \approx \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\delta T_0}{\delta T(h)} = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\delta T_0}{30}. \quad (4)$$

Таким образом, учет пожара в модели сводится к заданию следующих условий на нижнем расчетном уровне:

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = c_u |u| u, \quad K_z \frac{\partial v}{\partial z} = c_u |u| v, \quad w = W(h), \\ \Theta = \Theta_e + 30 \text{ °С}, \quad s = 1 \text{ при } x, y \in \Omega_R, \quad z = h; \quad (5)$$

$$K_z \frac{\partial u}{\partial z} = c_u |u| u, \quad K_z \frac{\partial v}{\partial z} = c_u |u| v, \quad w = 0, \quad \Theta = \Theta_e,$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \text{ при } x, y \notin \Omega_R, \quad z = h,$$

где Θ — значение температуры при $z \geq h$; K_z — коэффициент турбулентного обмена по вертикали; c_u — коэффициент сопротивления, рассчитываемый с помощью модели приземного слоя. На верхней границе поставим условия вида

$$u = u_G, \quad v = v_G, \quad \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \gamma_a - \gamma,$$

$$\frac{\partial s}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = H, \quad (6)$$

где u, v, w — компоненты скорости ветра вдоль осей x, y, z ; $s = \varphi/\varphi(h)$. На боковых границах потребуем обращения в нуль производных от скоростей, температуры и концентрации по направлению нормали к границе. В качестве начальных условий принималось горизонтально однородное стационарное решение задачи без пожара, т.е. при $R = 0$ $\Theta = \Theta_e + (\gamma_a - \gamma) z$.

В области интегрирования введена конечно-разностная сетка, содержащая $256 \times 128 \times 100$ узлов, временной шаг составлял 10 с. Значение τ_n взято равным 0,2 м/с.

Основная цель расчетов заключалась в изучении гидродинамической структуры течения над пожаром и анализе характеристик дымового шлейфа вблизи подстилающей поверхности при различной силе ветра. Картину трансформации облака примеси во времени в штилевых условиях демонстрирует рис. 1.

Из рис. 1 видно, что над геометрическим центром зоны пожара формируется конвективная колонка, представляющая мощную вертикальную струю, визуально заметную из-за большой концентрации дыма. Характерная скорость восходящих токов составляет 5–7 м/с. Температура струи, кроме самой нижней ее части, слабо отличается от температуры окружающего воздуха. Практически уже через 60 мин вершина струи достигает почти 2-км высоты при практически неизменном горизонтальном размере (около 600 м в диаметре). По мере развития вертикальных движений в верхней части струи формируется слой вовлечения, где вертикальные движения затухают и генерируется горизонтальная дивергенция потока за счет эффектов растекания. Выбрасываемые продукты горения выносятся вверх, причем распыление струи приводит к образованию дымового облака в средней части АПС, горизонтальные размеры которого со временем увеличиваются. Образуется грибовидная структура поля концентрации.

Компенсационные нисходящие токи в периферийных областях обуславливают медленное оседание облака, отчетливо выраженное на рис. 1 при $t = 2$ ч. Скорость седиментации частиц примеси мала по сравнению со скоростями движения воздушных

масс и на рассматриваемых интервалах времени не играет роли. Отметим, что приведенная картина конвекции хорошо подтверждается данными наблюдений о характере течений и распространения примеси над мощными тепловыми источниками при очень слабом ветре, в частности она дает картину поздней стадии эволюции «ядерного гриба».

Результаты расчетов, приведенные на рис. 1, соответствуют верховому пожару средней интенсивности. При более мощном повальном пожаре, когда площадь зоны, затронутой огнем, превышает 10 км^2 , в штилевых условиях над относительно обширными нагретыми территориями возникают одна мощная конвективная струя и несколько более слабых всплывающих термиков, расположенных на периферии области горения. На высотах порядка 100–300 м эти термики либо затухают, либо сливаются со струей. При низовых пожарах с небольшой скоростью распространения огня качественная картина циркуляции над зоной пожара не меняется, однако существенно снижается ее интенсивность. Так, максимальные скорости подъема воздуха в конвективной струе не превышают 2–3 м/с в зависимости от интенсивности пожара.

Характер распространения примеси существенно меняется для случая подземного (торфяного) лесного пожара. Поскольку горение происходит под землей при ограниченном доступе кислорода, температура на поверхности относительно невелика. Площадь, охваченная подземным пожаром, как правило, гораздо больше площади открытых лесных пожаров и имеет гораздо более сложную конфигурацию, которую трудно идентифицировать с помощью наземных измерений. Таким образом, подземные пожары характеризуются выделением в атмосферу огромных количеств дыма (из-за неполного сгорания торфа) при относительно незначительных количествах тепла, большая часть которого идет на разогрев почвы.

Расчеты показывают, что при подземных пожарах вместо одной конвективной струи при различных площадях горения образуется до нескольких десятков наполненных дымом и теплым воздухом термиков, которые поднимаются на высоты до нескольких сотен метров, что хорошо согласуется с данными наблюдений [2].

В экспериментах с ненулевым геострофическим ветром компоненты u_G, v_G подбирались с учетом экмановского поворота так, чтобы приземный ветер был направлен вдоль оси x . Наличие горизонтального переноса качественно меняет картину конвекции

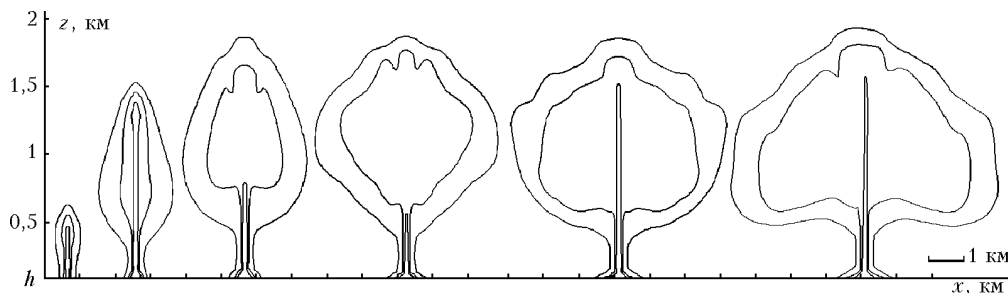


Рис. 1. Изолинии нормированного поля концентрации s в плоскости (x, z) в последовательные моменты времени, кратные 20 мин. Внешний контур соответствует значению s , равному 0,01, средний и внутренний — 0,1 и 0,2

и влияет на характер распространения примеси, что демонстрирует рис. 2.

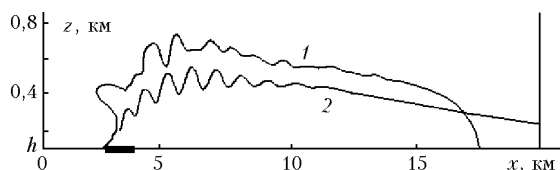


Рис. 2. Изолинии поля s в плоскости (x, z) , ограничивающие 1%-й уровень задымления воздуха при скорости ветра 5 и 10 м/с (кривые 1, 2). На оси x выделена зона пожара

Вместо сравнительно узкой, вытянутой по вертикали конвективной струи возникает система всплывающих термиков, которые движутся по ветру и постепенно затухают с удалением от очага пожара. Пример такого течения представлен на рис. 3.

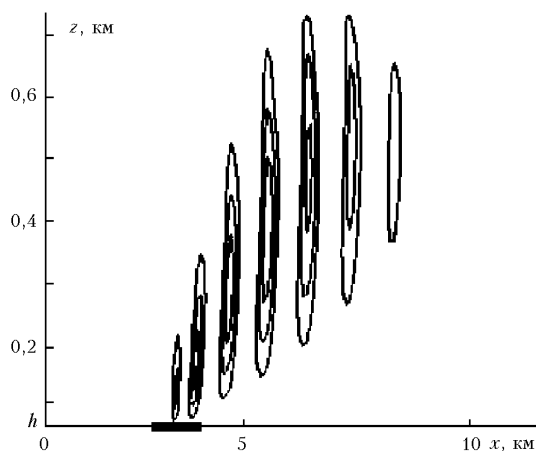


Рис. 3. Конфигурация областей с $w > 0,5$ м/с в плоскости (x, z) при скорости ветра 10 м/с, $t = 2$ ч. Внутренние изолинии построены с шагом $\Delta w = 0,5$ м/с

Облако примеси не распространяется выше 500–600 м и вытянуто вдоль ветра на расстояние 10–20 км от источника пожара. Верхняя кромка дымового облака имеет характерную волнообразную структуру, отражающую крупновихревую структуру течения. Зона выпадения примеси имеет форму вытянутого вдоль скорости ветра факела. Согласно наблюдениям такая картина конвекции и распространения примеси при пожарах более типична, чем при штиле: как правило, именно внешний ветер является причиной эволюции случайного возгорания в интенсивный пожар.

При скорости ветра больше 10 м/с облако примеси распространялось на расстояние в сотни километров от источника эмиссии. В этом случае предложенная модель использовалась лишь для задания локальных параметров поля концентрации, а крупномасштабный перенос изучался с помощью гидростатической модели [6] с горизонтальным ша-

гом сетки, равным 10 км. При подземных пожарах с большим количеством выделяемого дыма и большой длительностью даже при умеренном ветре ощутимые концентрации дыма через несколько десятков часов распространяются на расстояния порядка 1000 км от места горения.

Из рассмотренной теории выпадает относительно редкий, но самый опасный случай повального пожара, сопровождаемый вихревой атмосферной циркуляцией, типа огненного смерча [2]. По-видимому, для возникновения таких вихрей требуется задание специальных внешних условий, например в виде течения с большим сдвигом.

Заключение

Проведенные расчеты демонстрируют применимость вихреразрешающего моделирования для решения прикладных задач, возникающих при интенсивных природных и техногенных пожарах. Существенное уточнение теории может быть достигнуто за счет учета взаимовлияния процессов в зоне горения и в расположенной над ней конвективной колонке, где трансформация твердых, жидких и газообразных продуктов пиролиза носит принципиально разный характер. Учет этих трансформаций представляется важным для уточнения теории. Кроме того, перспективным, на наш взгляд, является изучение эволюции продуктов пиролиза и ее связи с процессами облако-и осадкообразования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 03-05-65279, 03-05-96825.

1. Панченко М.В., Тертугова С.А., Козлов В.С., Ужegov В.И., 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.Б. Эхо пожаров Подмосковья в атмосфере Западной Сибири // Тезисы докл. IX Рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2002. С. 1.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
3. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложение для охраны и защиты лесов // Сопряженные задачи механики и экологии. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. С. 88–137.
4. Шлычков В.А., Пушистов П.Ю., Мальбахов В.М. Влияние атмосферной конвекции на вертикальный перенос аридных аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 2001. Т. 14. N 6–7. С. 578–582.
5. Андреев В., Панчев С. Динамика атмосферных термиков. Л.: Гидрометеоздат, 1975. 152 с.
6. Kazakov A.L., Lezhenin A.A., Speransky L.S. Resultados Preliminares del Estudio de la Capa Limite Mesometeorologica de la Atmosfera en la Costa Norte Colombiana aplicando un Modelo Numerico. BOLETIN CIENTIFICO CION. 1996. N 17. P. 17–26.

A.A. Lezhenin, V.M. Malbakhov, V.A. Shlychkov. A numerical model of migration of aerosol formed in a forest fire zone.

The results of numerical modeling of local atmospheric circulation over a forest fire zone are considered. Two numerical models of the atmospheric boundary layer are used as basic ones. One model has a detailed resolution along the horizontal plane and allows explicit representation of the ensemble of large convective vortices. The other model is hydrostatic. It is used to study large-scale transfer of the smoke jet. The results of numerical experiments for a typical fire in middle latitudes are presented.