

Дубровская Ольга Анатольевна

**Численное моделирование влияния дымовых аэрозолей
от лесных пожаров на процессы в атмосфере**

05.13.18 – математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2008

Работа выполнена в Институте вычислительных технологий СО РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Климова Екатерина Георгиевна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Ривин Гдалиий Симонович,
доктор физико-математических наук, профессор
Черных Геннадий Георгиевич

Ведущая организация: Институт мониторинга климатических и экологических
систем СО РАН, г. Томск.

Защита состоится 10 июня 2008 г. в 15-30 на заседании диссертационного совета
ДМ 003.046.01 при Институте вычислительных технологий СО РАН по адресу:
630090, г.Новосибирск, проспект академика М.А.Лаврентьева, 6,
конференц-зал ИВТ.

С диссертацией можно ознакомиться в специализированном читальном зале
вычислительной математики и информатики ГПНТБ СО РАН (проспект академика
М.А.Лаврентьева, 6).

Автореферат разослан 8 мая 2008 г.

И. о. ученого секретаря
диссертационного совета
д.т.н., профессор

Рычков А.Д.

Общая характеристика работы.

Актуальность работы. Актуальность численного моделирования атмосферных процессов для описания переноса и трансформации дымовых аэрозолей вызвана необходимостью решения таких практических задач как изучение чувствительности климата, загрязнение окружающей среды, разработка систем мониторинга, обеспечения экологической безопасности.

При изучении динамики облачного покрова, которая играет важную роль в формировании климата, возникает задача о детальном исследовании влияния дымового аэрозоля от массовых лесных пожаров на процессы облако- и осадкообразования. Связанные с лесными пожарами выбросы аэрозоля в атмосферу могут оказывать существенное влияние на влажностные и оптические характеристики облачного покрова, а, следовательно, на процессы осадкообразования и, в результате, на погоду целого региона.

Поскольку в Сибири сосредоточены большие лесные массивы, то увеличение площадей пожарищ, длительности пожарного сезона и силы пожаров приводит к тому, что высвобождаются значительные объемы углерода. Поэтому одной из важных задач является описание распространения дымового аэрозоля и других продуктов горения во времени и в пространстве с привлечением фактической метеорологической информации и данных о пожарах.

Цель работы:

- адаптация модели конвективного пограничного слоя атмосферы для исследования процессов распространения аэрозоля с учетом конвекции, турбулентного обмена, влажности, силы и направления ветра;
- с помощью модели конвективного пограничного слоя провести анализ влияния крупнодисперсного дымового аэрозоля, выделившегося при лесных пожарах, на процессы облако - и осадкообразования;
- разработка алгоритма восстановления значений концентрации газовых составляющих в заданном регионе по данным о лесных пожарах и метеорологической информации.

Научная новизна работы. Негидростатическая модель атмосферного пограничного слоя, учитывающая фазовые переходы в системе пар-вода-лед, была использована для расчета различных сценариев формирования конвективной облачности в районе пожара и переноса дымового аэрозоля.

Такой подход для моделирования облачности в условиях пожара является новым.

Полученные результаты численного моделирования по распространению дымового аэрозоля учитывают процессы конвекции, турбулентного обмена, влажности, силы и направления ветра. Количество и распределение осадков при наличии в атмосфере различных концентраций примесей позволили сделать предположение, что активный вертикальный теплоперенос, генерируемый в зоне массовых лесных пожаров, может оказаться фактором влияния локальных процессов в зоне пожара на атмосферную циркуляцию регионального масштаба. Полученные результаты моделирования распространения дымового аэрозоля в тропосфере под влиянием различных метеорологических факторов являются новыми.

С помощью методов математического моделирования впервые показано, что частицы крупнодисперсного дымового аэрозоля, выбрасываемого в зоне горения, могут приводить к уменьшению ливневых осадков в условиях Сибирского региона. Это может быть существенным в реализации механизма положительной обратной связи, приводящей к увеличению длительности массовых пожаров на территории азиатской части России.

Разработана методика восстановления значений концентрации газовых составляющих по данным космического зондирования о лесных пожарах и метеорологическим данным для оценки концентрации примеси в заданном регионе с помощью построения обратных траекторий и использованием процедуры усвоения данных. Эта методика была впервые применена для конкретных случаев массовых лесных пожаров 2002 и 2006 гг. Результаты численных экспериментов, полученные при использовании данной методики, согласуются с фактическим распределением дымовых шлейфов, полученным по данным спутников серии NOAA.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается применением современных математических моделей динамики атмосферы, сравнением полученных результатов модельных исследований со спутниковыми данными и с результатами других авторов.

Практическая значимость. Разработаны модели локального и дальнего переноса дымового аэрозоля, выделившегося при лесных пожарах. Выявлен механизм влияния лесных пожаров на циркуляцию воздушных масс. Разработанные методики могут быть включены в локальные и региональные

модели атмосферных циркуляций для прогнозирования условий работы авиационного и других видов транспорта, а также безопасности жизнедеятельности населения при крупных массовых лесных пожарах и задымлении местности.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Проведена адаптация модели динамики конвективного пограничного слоя атмосферы при постановке начально-краевой задачи, отражающей наличие пожара, как теплового источника и источника эмиссии дымового аэрозоля для уравнений термогидродинамики.
2. С помощью модели динамики конвективного пограничного слоя атмосферы проведена численная оценка характеристик ансамбля конвективной облачности над зоной горения. Сделан расчет области распространения дымового аэрозоля для различных сценариев, выявлены закономерности турбулентного, конвективного переноса тепла, влаги и дымовых аэрозолей, а также оценено их влияние на процессы облако- и осадкообразования. На основе анализа результатов численных экспериментов и спутниковых данных показано, что возможна реализация прямых и обратных связей между процессами синоптического и локального масштабов в зоне горения и задымления.
3. Разработан вычислительный алгоритм восстановления значений концентрации газовых составляющих по данным о лесных пожарах и метеорологическим данным в заданном регионе на регулярной сетке. Алгоритм реализован в виде комплекса прикладных программ.

Представление работы. Основные результаты диссертации докладывались на Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды: ENVIROMIS-2004, 2006 гг. (г. Томск), Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (г. Горно-Алтайск, 2004 г.), XI, XII, XIII, Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2004, 2005, 2006 гг.), VIII, IX Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» (г. Кемерово, 2005 г., г. Барнаул, 2007 г.), X, XI Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск, 2006, 2007 гг.), Международном симпозиуме «Физика атмосферы: наука и образование» (г. С.-Петербург - Петродворец, 2007 г.), XI Всероссийской школе-

конференции молодых ученых «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты» (г. Нижний Новгород, 2007 г.), Международном конгрессе «ГЕО-Сибирь-2006, 2007» (г. Новосибирск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ, куда входят (в скобках в числителе указан общий объем этого типа публикаций, в знаменателе – объем, принадлежащий автору): 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК (1.9/0.5 печ. л.), 4 в изданиях трудов конференций (1.2/0.42 печ. л.).

Личный вклад автора. В работе [1] автор участвовала в постановке задач по моделированию конвективной облачности в районе пожара, в проведении качественных оценок воздействия частиц крупнодисперсного аэрозоля на процессы осадкообразования с использованием теоретического подхода и с учетом имеющихся экспериментальных данных. В работе [2] автору принадлежит проведение сопоставительного анализа результатов численных экспериментов, изучение физических механизмов, обуславливающих прямое и обратное влияние пожаров на синоптические процессы в средней тропосфере. В публикации [3] автор участвовала в разработке численных алгоритмов, выполнении их программной реализации, проведении численных экспериментов по восстановлению значений концентрации двуокиси углерода (CO_2). Предложенная методика была реализована с привлечением фактической метеорологической информации и данных о пожарах на примере массовых лесных пожаров 2002 и 2006 гг. В работах [4-7] автор принимала участие в постановке задач и проведении численных экспериментов по моделированию конвективной облачности в районе пожара для различных метеорологических сценариев, по оценке влияния стратификации атмосферы на высоту подъема аэрозольного облака, по восстановлению полей концентрации дымового аэрозоля при массовых лесных пожарах.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 100 наименований. Полный объем диссертации составляет 108 страниц, включая 44 рисунка и 4 таблиц. Каждая глава разбита на параграфы.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель, и ставятся основные задачи работы. Приведен обзор

работ, посвященных исследованиям влияния лесных пожаров на процессы облако- и осадкообразования, моделированию многофазных процессов в атмосфере. Раскрывается научная новизна и практическая значимость работы. Формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 содержится описание мезомасштабной математической модели для воспроизведения локальных атмосферных процессов на ограниченной территории с прямым моделированием когерентных структур в стратифицированном атмосферном пограничном слое (АПС). Эта модель разработана д.ф.- м.н. В.А. Шлычковым и была использована в решении задачи о влиянии пожара и дымового аэрозоля на процессы облако- и осадкообразования и постановке численных экспериментов.

В параграфе 1.1 представлено краткое введение. В параграфе 1.2 приводится постановка задачи о термодинамическом взаимодействии атмосферы, полей влажности и аэрозоля, при использовании модели АПС.

Базовая система уравнений мезомасштабной модели АПС имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial z} &= -c_p \bar{\Pi} \frac{\partial \pi}{\partial x} + l v - \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial z} &= -c_p \bar{\Pi} \frac{\partial \pi}{\partial y} - l u - \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} &= -c_p \bar{\Pi} \frac{\partial \pi}{\partial z} + \lambda \vartheta - \frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right), \\ \frac{\partial \vartheta}{\partial t} + u \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + v \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \frac{1}{\bar{\rho}} w \frac{\partial \bar{\rho} \vartheta}{\partial z} + S w &= -\frac{1}{\bar{\rho}} \left(\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} \right) + \Phi_T, \\ \frac{\partial \bar{\rho} u}{\partial x} + \frac{\partial \bar{\rho} v}{\partial y} + \frac{\partial \bar{\rho} w}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где u, v, w - компоненты вектора скорости вдоль осей декартовой системы координат; ϑ - возмущение потенциальной температуры от основного «фонового» значения, l - параметр Кориолиса, λ - параметр плавучести, c_p - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $S_\Theta = \frac{\partial \bar{\Theta}}{\partial z}$ - температурная стратификация, Φ_T - фазовые притоки тепла, τ_{ij} - компоненты тензора турбулентных напряжений, Θ, T, P, Π - потенциальная температура, абсолютная температура, давление, функция Экснера (аналог

давления), соответственно, переменные с чертой – фоновые поля, удовлетворяющие уравнениям состояния и статики

$$\bar{P} = R_a \bar{\rho} \bar{T}, \quad \frac{d\bar{P}}{dz} = -\bar{\rho} g, \quad \bar{\Pi} = \frac{\bar{\Theta}}{\bar{T}}, \quad (2)$$

где $\bar{\rho}(z)$ - статическое падение плотности с высотой, g - ускорение силы тяжести, R_a - газовая постоянная.

В **параграфе 1.3** рассмотрены начальные и граничные условия для негидростатической модели АПС. В **параграфе 1.4** приведено турбулентное замыкание для расчета коэффициентов турбулентного обмена подсеточных масштабов. В **параграфе 1.5** представлена модель переноса влаги и параметризация микрофизических процессов. Система уравнений переноса влажности и осадков рассматривается совместно с уравнениями гидротермодинамики АПС (1)-(2) и содержит уравнения для концентрации водяного пара q , взвешенной капельной q_c и кристаллической q_i влаги, жидких осадков q_r и снега q_s . В **параграфе 1.6** описана конечно-разностная аппроксимация и метод решения системы уравнений.

Таким образом, в Главе 1 сформулирована математическая задача о термодинамическом взаимодействии полей влажности и аэрозоля с использованием модели динамики конвективного пограничного слоя и учетом параметризации микрофизических процессов.

Глава 2 посвящена исследованиям воздействия дымового аэрозоля на процессы облако- и осадкообразования и анализу результатов численных экспериментов. В **параграфе 2.1** для воспроизведения конвективного облака над зоной пожара использовалась численная модель АПС совместно с моделью переноса влаги и параметризации микрофизических процессов.

Процессы горения и эмиссии аэрозолей учитываются через краевые условия: $S = S_0, \mathcal{G} = T_H$ при $x, y \in R, z = h$; $S = 0, \mathcal{G} = 0$; при $x, y \notin R, z = h$, где h – нижняя граница области, H – верхняя граница, T_H - превышение температуры за счет горения, $R(x, y)$ - область на подстилающей поверхности, ограниченная кромкой пожара, где происходит эмиссия тепла, пара и аэрозоля, S_0 - концентрация примеси. T_H и S_0 считаются заданными величинами. Остальные краевые условия имеют следующий вид:

$$K_H \frac{\partial q}{\partial z} = C_\ominus |\bar{U}| (q - q_0), \quad K_H \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} = C_\ominus |\bar{U}| (\mathcal{G} - \Theta_0), \quad K \frac{\partial u}{\partial z} = C_u |\bar{U}| u, \quad K \frac{\partial v}{\partial z} = C_u |\bar{U}| v,$$

$$w=0, \quad \frac{\partial q_c}{\partial z}=0, \quad \frac{\partial q_i}{\partial z}=0, \quad \frac{\partial q_r}{\partial z}=0, \quad \frac{\partial q_s}{\partial z}=0, \quad \frac{\partial S}{\partial z}=0 \quad \text{при } z=h,$$

$$q=q_H, \quad q_c=0, \quad q_i=0, \quad q_r=0, \quad q_s=0, \quad S=0, \quad u=u_g, v=v_g, w=0, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial z}=\gamma \quad \text{при } z=H,$$

где q_H - заданное распределение удельной влажности на верхней границе АПС, u_g, v_g - вектор внешней (крупномасштабной) скорости ветра, γ - задает устойчивую стратификацию в тропосфере. На боковых границах расчетной области принято условие равенства нулю нормальных производных от искомым функций. Начальные поля при $t=0$ задаются следующие:

$$\vartheta=0, \quad q=Q(z), \quad q_c=0, \quad q_i=0, \quad q_r=0, \quad q_s=0, \quad u=0, v=0, w=0.$$

В параграфе 2.2 представлены результаты численного моделирования различных сценариев формирования конвективной облачности над зоной горения и распространения дымового аэрозоля. При моделировании атмосферной циркуляции зона перегрева расширялась во времени, имитируя продвижение фронта пожара. Процессы горения развивались в пределах приземного подслоя, над зоной пожара задавался турбулентный поток примеси с характерными значениями, взятыми из наблюдений. Результаты эксперимента показали, что в штилевых условиях по мере нарастания температуры над очагом формируется вертикальная струя, которая переносит тепло и продукты горения вверх. Максимум вертикальной скорости в струе равен $w=3$ м/сек. Из результатов численных экспериментов следует, что форма аэрозольного облака сильно зависит от соотношения факторов адвекции и конвекции, которые на разных стадиях развития обуславливали различные эффекты. Например, даже умеренный ветер в начальной фазе пожара приводил к подавлению конвективных движений, и облако дыма стелилось по поверхности земли.

В следующей серии экспериментов изучалось влияние начального поля влажности на высоту подъема аэрозольного облака. В первом эксперименте моделировалось формирование конвективной ячейки над зоной пожара при относительной влажности невозмущенной атмосферы $f=30\%$. Во втором эксперименте относительная влажность задавалась равной 90% . Прочие условия были одинаковыми в обоих экспериментах, в частности полагалось $u_g = v_g = 0$. Область горения R представлялась в виде круга радиусом 1 км,

в котором задавалось $S_0 = 1$, $T_H = 70^\circ C$. Расчетная сетка бралась равномерной по горизонтали и имела 128×128 узлов с $\Delta x = \Delta y = 77 \text{ м}$. По вертикали сетка содержала 100 уровней, а верхняя граница области задавалась на высоте 5 км. Результаты расчетов представлены на рис. 1 а, 1 б. В случае «сухой» атмосферы аэрозольное облако достигает высоты 1700м и не выходит за пределы экмановского пограничного слоя (рис. 1 а). В атмосфере с высокой влажностью $f = 90\%$ образуется конвективное облако, а конвективная колонка вместе с аэрозольным облаком увеличивается до 3000м (рис. 1 б).

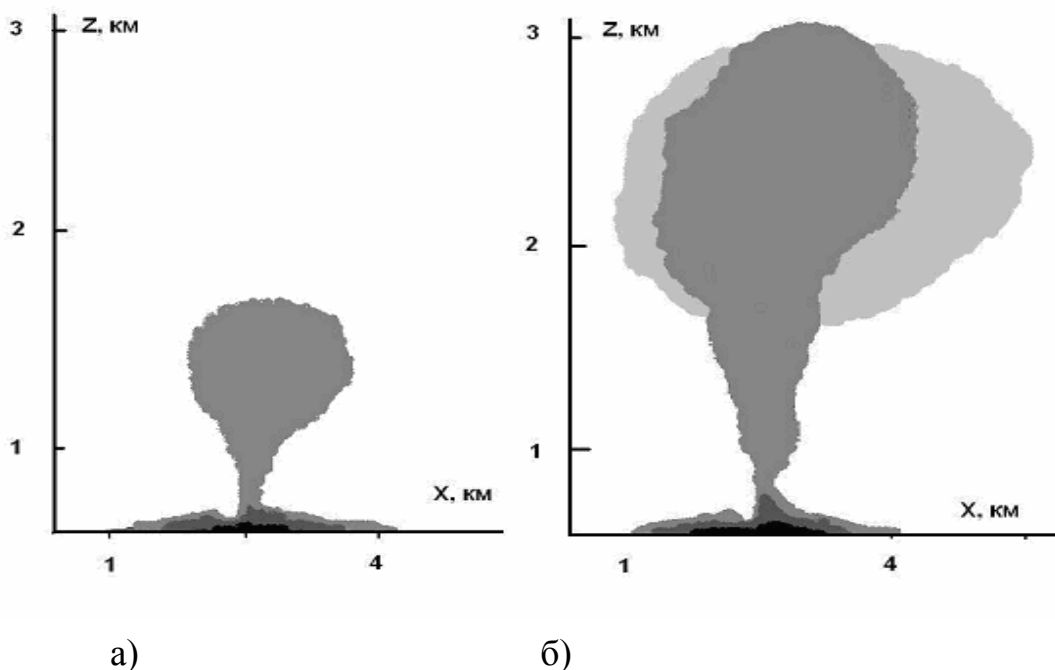


Рис. 1. Область распространения дымового аэрозоля при образовании облаков в условиях устойчивой стратификации а) – при $f = 30\%$, б) – при $f = 90\%$

Результаты численных экспериментов сравниваются с результатами исследований низовых и верховых лесных пожаров, проведенных в полевых условиях.

Параграф 2.3 посвящен воздействию крупнодисперсного дымового аэрозоля на процессы осадкообразования. Влияние лесных пожаров на процессы облако – и осадкообразования в средних и высоких широтах заметно отличаются от влияния пожаров в тропиках. Так, если в амазонских лесах пожары инициируют ливневые осадки, то в условиях Сибири они приводят, наоборот, к уменьшению осадкообразования. Вершины облаков, дающие ливневые осадки, расположены выше уровня изотермы $-12^\circ C$ и состоят из водяного пара, водяных капель, ледяных кристаллов, снега и ледяной крупы. Попадание туда достаточного количества аэрозоля, выделившегося при пожаре, а именно 100 частиц на 1 м^3 стимулирует быструю кристаллизацию водяных капель. Облака с ледяной вершиной не дают ливневых осадков.

Исследовалось влияние крупных частиц дымового аэрозоля с размерами $1,0 < r < 1,5$ мкм на ливневые облака. Именно крупнодисперсная фракция дает наибольший вклад в дымы, которые образуются при верховых и низовых пожарах. Распределение концентрации частиц крупнодисперсного дымового аэрозоля по вертикали рассчитывалось с помощью модели оценки эмиссии по данным о сгоревшей биомассе для Якутских пожаров 2002 г. Качественные оценки показали, что на высоту изотермы -12°C попадало $N_{обл} = 0,01 \times N_{пер} = 4,3 \times 10^3 \text{ м}^{-3}$. Это достаточное количество аэрозоля, чтобы вызвать процессы кристаллизации и уменьшение осадков.

Для сопоставительного анализа количества и распределения осадков при наличии в атмосфере различных концентраций примесей использовалась модель конвективного пограничного слоя атмосферы (1)-(3).

Проведена серия экспериментов, в которых температура зоны горения задавалась различными значениями T_{II} от 70°C до 100°C . Перепад температур на уровне слоя постоянных потоков h составлял $\Delta T_{II} = 5^{\circ}\text{C}$ и $\Delta T_{II} = 7^{\circ}\text{C}$. Сеточная детализация 512×32 узлов по горизонтали и 100 уровней по вертикали в области $80 \times 10 \times 10 \text{ км}^3$ позволяет явным образом разрешать когерентные структуры (термики и конвективные облака) в стохастическом конвективно-облачном ансамбле. В ходе модельного эксперимента наблюдалось формирование конвективного ансамбля, состоящего из нескольких термик. Затем, когда наиболее «мощные» термики достигают уровня конденсации, начинают образовываться конвективные облака. Вертикальные размеры облаков увеличиваются и через 20-30 мин. из них начинают выпадать осадки. Расчеты проводились для различных концентраций примеси, вносимой в верхнюю часть облаков. Количество осадков в миллиметрах в различные моменты времени для этих значений перегрева приведены на рис. 2 а, 2 б.

На основании полученных оценок и результатов численных экспериментов можно сделать следующий вывод: если облако имеет переохлажденную вершину (именно эти облака дают интенсивные осадки) выше изотермы -12°C , то попадание туда в результате лесных пожаров аэрозольных частиц с размерами более 1 мкм приводит к ослаблению осадков.

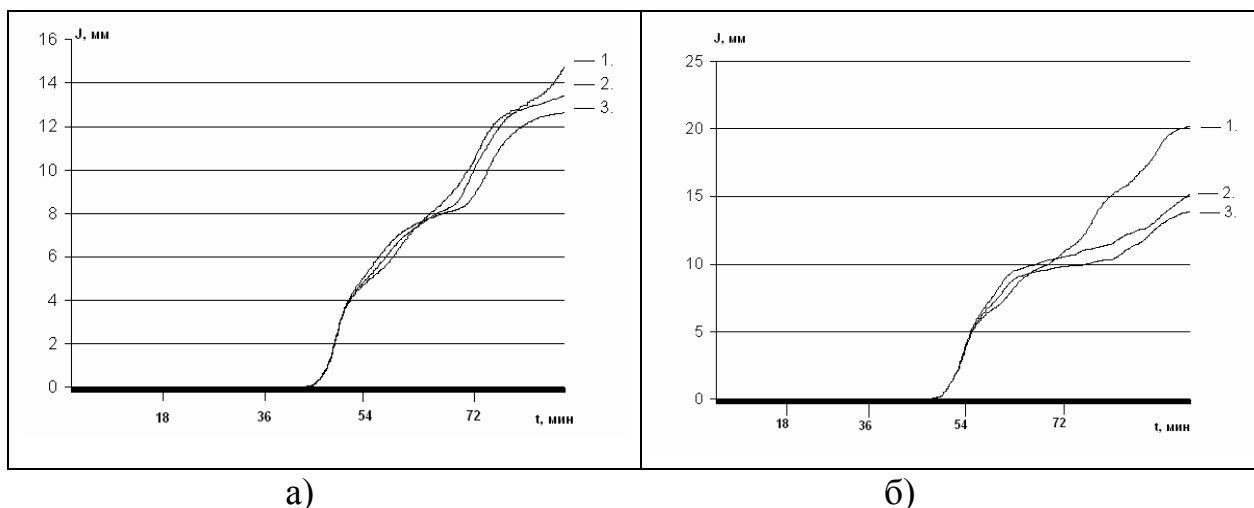


Рис. 2. Влияние аэрозоля на изменение выпавших осадков в различные моменты времени а) при $\Delta T_n = 5^\circ C$: J – количество выпавших осадков в мм на уровне $z = h$, t - время в минутах; 1 – аэрозоль отсутствует; 2 – концентрация аэрозоля составляет 100 частиц/ m^3 ; 3 – концентрация аэрозоля составляет 800 частиц / m^3 ; б) То же, что в а) при $\Delta T_n = 7^\circ C$

В параграфе 2.4 проведен сопоставительный анализ данных космического зондирования массовых лесных пожаров, относящихся к катастрофическим, на территории Азиатской части России в период с 2002 по 2006 гг. При анализе космической информации, были выявлены следующие закономерности:

- при массовых лесных пожарах над зонами пожаров и задымления устанавливается аномально сухая погода на протяжении длительного времени;
- ожидаемая резервная облачность, которая могла бы частично потушить очаги возгорания, не проходит над такими районами.

Численные расчеты показали, что увеличение концентрации дымового аэрозоля в вершине облака приводит к уменьшению общего количества выпавших осадков. Попадание достаточного количества дымового аэрозоля в верхние слои атмосферы стимулирует быструю кристаллизацию водяных капель. Облака с «ледяной вершиной» дают более слабые осадки, чем те облака, вершины которых состоят из смеси ледяных кристаллов, снега и дождевых капель. Это находится в соответствии с теоретическими представлениями и натурными наблюдениями микрофизических процессов облаков.

Использование данных дистанционного зондирования спутника NOAA дало возможность проанализировать распределение облачности и прохождение циклонов над зонами массовых лесных пожаров с 2002 по 2006 гг. На снимках видно, что непосредственно над зоной пожаров облачность отсутствует (рис.3). Анализ космического мониторинга метеорологической

ситуации, прохождения циклонов и наличие облачности указывает на то, что происходит перестройка циркуляций воздушных масс над зоной пожара и в его окрестностях. В результате возникает механизм положительной обратной связи, приводящей к увеличению длительности массовых пожаров в условиях Сибирских регионов. В **параграфе 2.5** представлены основные результаты главы 2.

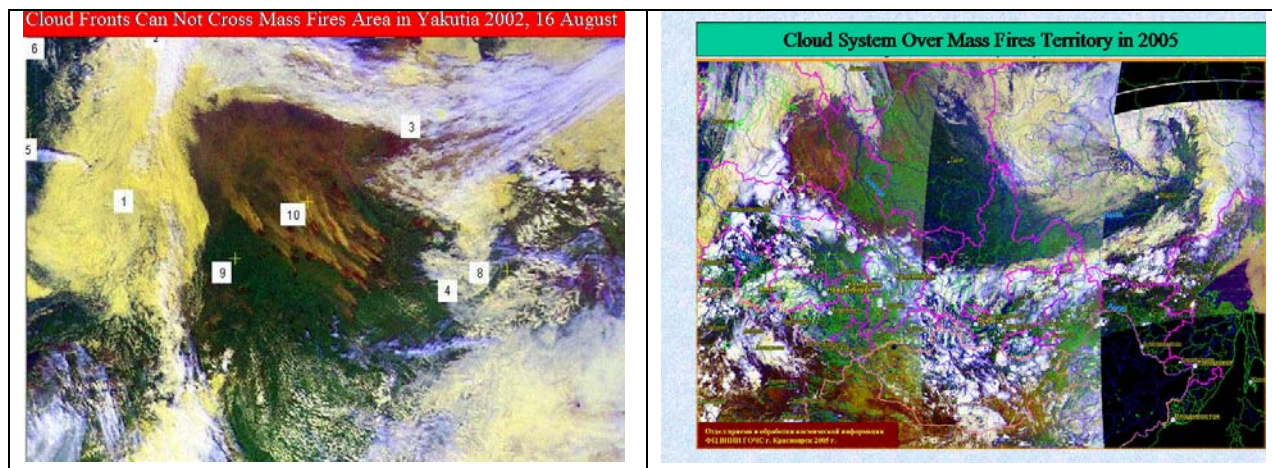


Рис. 3. Расположение циклонов и облачности в зоне массовых лесных пожаров а) на территории Республики Саха (Якутия) 16.08.2002 г., б) на территории Ханты-Мансийского АО 01.08.2005 г.

В **главе 3** представлен алгоритм восстановления значений концентрации газовых составляющих по данным о лесных пожарах и метеорологическим данным. В **параграфе 3.1** рассмотрен алгоритм для оценки эмиссии CO_2 по данным о сгоревшей биомассе на примере Якутских пожаров 2002 г. и пожаров в районе р. Ангары в 2006 г. при использовании данных о выгоревшей площади, с соответствующим выбором эмпирических коэффициентов. В **параграфе 3.2** изложена методика, основанная на вычислении обратных траекторий, для оценки территории, охваченной дымовым аэрозолем. Уравнения траекторий записываются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Вертикальная скорость ω в P - системе координат рассчитывается из уравнения притока тепла. Система уравнений решается на временном интервале $[t^N, t^0]$. В качестве начальных данных задаются координаты частицы $(\lambda^N, \varphi^N, p^N)$ в момент времени t^N . На каждом временном шаге находится значение координаты P с использованием простейшей схемы односторонних разностей. Для интегрирования по пространственным координатам применяется метод Рунге-Кутты четвертого порядка точности.

В **параграфе 3.3** изложена процедура усвоения данных, используемая для восстановления концентрации дымовых аэрозолей. Усвоение данных

проводится на основе цикла прогноз-анализ, при этом под анализом данных понимается интерполяция наблюдений в заданную точку. Анализ осуществляется с помощью метода экспоненциальной интерполяции. Шаг «прогноза» вдоль траектории для одного временного шага Δt можно формально записать следующим образом: $q_f^n = q_f^{n+1}$.

Данные о сгоревшей биомассе рассматриваются в K точках Земной поверхности с координатами $\{(\lambda_k(t^j), \varphi_k(t^j)), k=1, \dots, K\}$ в моменты времени t^1, \dots, t^j , в которых имеется спутниковая информация. В момент t^j , производится «анализ», т.е. оценка значений концентрации в i -ом сеточном узле по вычисленному на этот момент значению концентрации и данным наблюдений. Полученное значение «анализа» является начальным для вычисления следующего шага «прогноза». Значение «анализа», т.е. значение концентрации q_a^j , соответствующей точке траектории $(\lambda^j, \varphi^j, p^j)$ определяется по значениям данных наблюдений, известным в окрестности этой точки радиусом R . В момент времени t^j , производится анализ (уточнение) значения концентрации CO_2 с помощью метода

экспоненциальной интерполяции $q_a^j = q_f^j + \frac{\sum_{k=1}^{K_1} \alpha_{jk} \Delta q_d^j}{\sum_{k=1}^{K_1} \alpha_{jk}}$, где K_1 - количество

точек наблюдений, попавших в окрестность точки $(\lambda^j, \varphi^j, p^j)$ радиуса R ,

$\alpha_{jk} = e^{-0.5 \frac{r_{jk}^2}{(B^m)^2}}$, r_{jk} - расстояние между точкой траектории $(\lambda(t^j), \varphi(t^j), p(t^j))$ и k -ой точкой наблюдений, B^m - радиус корреляции, $\Delta q_d^j = \Delta t \cdot \eta_k$. Величина η_k определяется по данным наблюдений о выделении газовых составляющих в единицу времени.

В параграфе 3.4 представлены результаты численных экспериментов для массовых лесных пожаров 2002 г. на территории Республики Саха (Якутия) и 2006 г. в районе р. Ангары (Приангарья), сделанных по предложенной методике. При расчете обратных траекторий были использованы метеорологические данные о ветре, температуре и высоте в узлах сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. Фоновая концентрация CO_2 задавалась равной 340 ppm. В качестве источника данных дистанционного зондирования использованы материалы спутниковых съемок низкого и среднего пространственного разрешения NOAA/AVRR/TOVS и Terra/MODIS территории Сибири.

Восстановление концентрации проводилось для различных регионов в узлах широтно-долготной сетки $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ или $2,5^\circ \times 2,5^\circ$. На рис. 4 а, 4 б приведены результаты численных экспериментов по восстановлению концентрации CO_2 для Якутских пожаров 2002 г. Пожары отмечены в виде черных точек. Сравнивая модельные результаты и натурные данные, можно отметить совпадение областей максимальной концентрации примеси, получаемой при переносе продуктов горения от лесных пожаров.

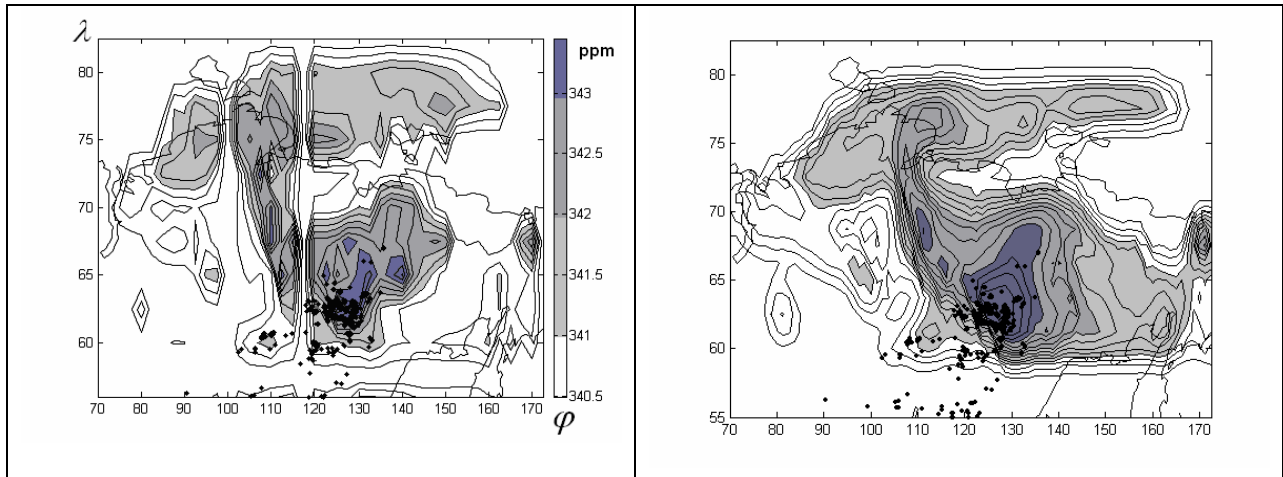


Рис. 4. Результаты расчетов распространения примеси и распределения в заданном регионе $70^\circ - 172,5^\circ$ в.д. и $63,5^\circ - 80^\circ$ с.ш. в узлах широтно-долготной сетки $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ (а); $1,25^\circ \times 1,25^\circ$ (б).

В параграфе 3.5. предложен комплекс прикладных программ, для проведения численных экспериментов. В параграфе 3.6 представлены основные результаты главы 2.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Проведена адаптация модели динамики конвективного пограничного слоя атмосферы при постановке начально-краевой задачи, отражающей наличие пожара, как теплового источника и источника эмиссии дымового аэрозоля для уравнений термогидродинамики.
2. С помощью модели динамики конвективного пограничного слоя атмосферы проведена численная оценка характеристик ансамбля конвективной облачности над зоной горения. Сделан расчет области распространения дымового аэрозоля для различных сценариев, выявлены закономерности турбулентного, конвективного переноса тепла, влаги и дымовых аэрозолей, а также оценено их влияние на процессы облако- и осадкообразования. На основе анализа результатов численных экспериментов и спутниковых данных показано, что возможна реализация

прямых и обратных связей между процессами синоптического и локального масштабов в зоне горения и задымления.

3. Разработан вычислительный алгоритм восстановления значений концентрации газовых составляющих по данным о лесных пожарах и метеорологическим данным в заданном регионе на регулярной сетке. Алгоритм реализован в виде комплекса прикладных программ.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Дубровская О.А. Оценка влияния крупных дымовых частиц на процессы осадкообразования [Текст] / В.С. Козлов, В.М. Мальбахов // Оптика атмосферы и океана – 2005. – том. 18, № 5-6. -С. 430-435
2. Дубровская О.А. Влияние массовых лесных пожаров на циклонические процессы в Сибири [Текст] / В.М. Мальбахов , В.А. Шлычков // Вычислительные технологии. – 2007. - том 12, №2. - С. 58-66
3. Дубровская О.А. Прогнозирование распространения дымовых аэрозолей на территории Сибири [Текст] / Е.Г. Климова // Вычислительные технологии. - 2007, том 12, №5. - С. 68-77

Публикации по материалам конференций

4. Дубровская О.А., О влиянии пожаров на процессы облако- и осадкообразования [Текст] / А.А. Леженин, В.М. Мальбахов, А.И. Сухинин, В.А. Шлычков // География и природные ресурсы. – 2004. - специальный выпуск. - С. 158-161
5. Мальбахов В.М. Численная модель распространения дымового шлейфа при лесных пожарах с параметрическим учетом процессов горения [Текст] / В.А. Шлычков, А.А. Леженин, О.А. Дубровская // География и природные ресурсы. – 2004. - специальный выпуск. - С. 170-175
6. Мальбахов В.М. Численное моделирование некоторых экстремальных атмосферных явлений [Текст] / В.А. Шлычков, О.А. Дубровская // Труды VIII Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф». - Кемерово, 2005. С. 228-237
7. Мальбахов В.М. Оценка влияния лесных пожаров на облако- и осадкообразование [Текст] / А.А. Леженин, О.А. Дубровская, Е.Г. Климова, В.А. Шлычков // Вычислительные технологии. – 2006. - том 11, часть 3, специальный выпуск. - С. 135-142

Тираж 100 экз.
Формат 60x84 1/16
Отпечатано в ЗАО РИЦ «Прайс-курьер»
630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 4 а

Заказ № 191
30.04.2008