

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЫМОВЫХ АЭРОЗОЛЕЙ НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ

О. А. ДУБРОВСКАЯ, Е. Г. КЛИМОВА

Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: olga@ict.nsc.ru, klimova@ict.nsc.ru

Gas components emitted at fires may propagate far away from the source of fire due to the atmospheric circulation. Therefore one of the important problems is a description of the spatial and temporal distribution of the smoke aerosol using actual meteorological information and the data on fires. For an estimation of the territory covered by the fire smoke, a technique for restoration of the values of concentration of the gas components is proposed which utilizes both meteorological and fire data. Pollutant concentrations in the given region were estimated using the reconstruction of the backward trajectories. Data assimilation technique was used in the restoration process. Numerical experiments on estimation of the gas component concentrations were compared to the actual trajectories of smoke plumes obtained by NOAA satellites.

Введение

Газовые составляющие атмосферы, такие как CO, CO₂, CH₄, называемые парниковыми газами, существенно влияют на характер атмосферных процессов и экологическую обстановку в исследуемом регионе [1]. Одним из источников этих газов являются лесные пожары в бореальных лесах на территории Западной и Восточной Сибири, Якутии, Дальнего Востока.

Так как в Сибири сосредоточены большие запасы наземного углерода, то увеличение площадей пожарниц, длительности пожарного сезона и силы пожаров приводит к тому, что освобождаются значительные объемы углерода [2, 3]. В годы с экстремальной пожарной активностью общая эмиссия углерода может быть на 37–41 % больше, чем в годы с нормальной пожарной активностью, — по причине увеличения сгорания органических веществ в почве. Средние оценки для стандартного сценария динамики выбросов рассматриваемых парниковых газов составляют: CO₂ (555–1031 тераграмм (Тг)), CO (43–80), CH₄ (2.4–4.5 Тг). Эти оценки представляют 10, 15, 19 % соответственно от глобальных оценок, сделанных по всему Земному шару для пожаров растительности [2].

Газовые составляющие, выделяющиеся при пожарах, распространяются далеко за их пределы благодаря атмосферной циркуляции. Поэтому одна из важных задач — описать распространение дымового аэрозоля в пространстве и во времени, привлекая для этого фактическую метеорологическую информацию и данные о пожарах.

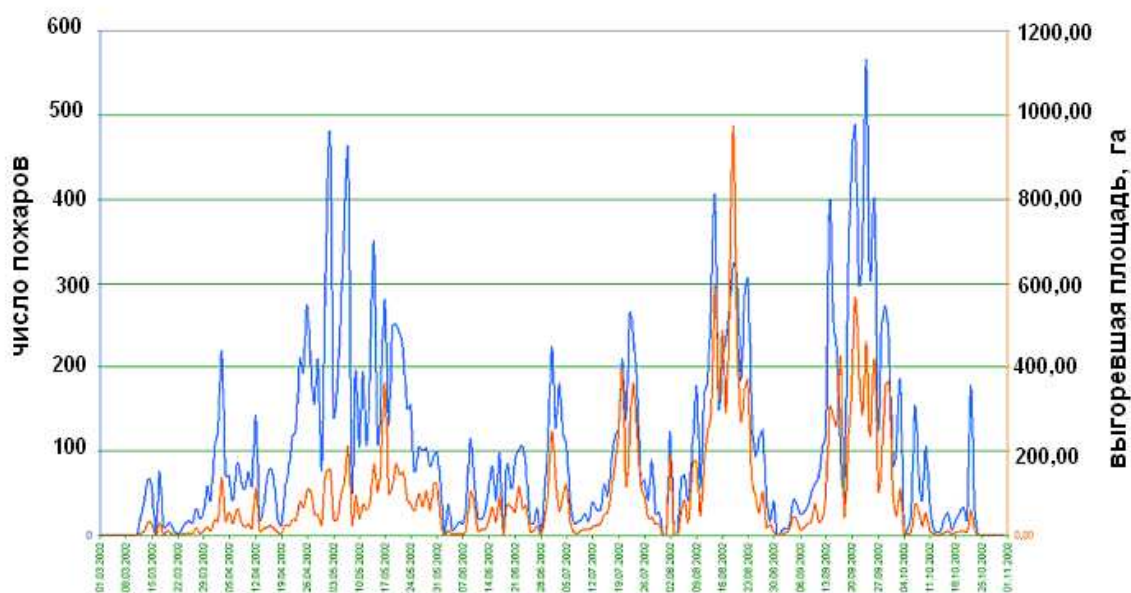


Рис. 2. Динамика пожарной активности 2002 года (с 1 марта по 1 ноября) на азиатской части России; шкала слева показывает число пожаров, шкала справа — выгоревшую площадь

1. Оценка концентрации CO_2 по данным о сгоревшей биомассе

Использование спутниковых данных о выгоревшей территории позволяет сделать более точные оценки эмиссий углерода от лесных пожаров. Количество горючего материала, в действительности сгоревшего в пожаре, будет зависеть от запаса и состояния топлива, его типа, климатических и метеорологических факторов, а также интенсивности пожара. Модели расхода горючих материалов в общем случае включают эмпирические коэффициенты для прогнозирования относительных объемов тления и горения при различных условиях горения.

Подходы к оценке общих эмиссий углерода (C_t) и эмиссий конкретных шлейфовых газов (E_s) основаны на известных моделях, предложенных в работе [7]:

$$C_t = A \cdot B \cdot f_C \cdot \beta, \quad (1)$$

$$E_s = C_t \cdot e f_s, \quad (2)$$

где A — площадь пожарищ, га; B — средний запас биомассы, т/га; f_C — доля углерода в биомассе; β — масштабирующий коэффициент для доли биомассы, которая сгорела (связан с типом и интенсивностью пожара, а также с видом лесного горючего материала); $e f_s$ — коэффициент эмиссии для данного вида шлейфового газа s (обычно выражается как доля данного вещества, сгоревшего во время пожара, по отношению к сухому топливу).

В настоящей работе расчеты оценки эмиссии CO_2 по формулам (1) и (2) были сделаны на примере якутских пожаров 2002 года с использованием данных о площади, пройденной огнем, со следующими эмпирическими коэффициентами: средний запас горючего материала рассматриваемого региона — 8.0 т углерода на 1 га, доля углерода $f_s = 1$, масштабирующий коэффициент $\beta = 1$, коэффициент эмиссии для CO_2 — 0.45 [8].

2. Вычисление распространения аэрозоля с помощью обратных траекторий

Для оценки территории, охваченной дымовым аэрозолем, разработана методика, основанная на вычислении обратных траекторий [4]. В расчетах используются данные архива “Реанализ” Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

Для расчета траекторий привлекаются данные о ветре, температуре и высоте на 23 изобарических поверхностях с шагом по времени 6 ч.

Уравнения траекторий записываются в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{1}{a \cos \varphi} u(t, \lambda, \varphi, p), \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{a} v(t, \lambda, \varphi, p), \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dt} = w(t, \lambda, \varphi, p), \quad (5)$$

где $\lambda(t), \varphi(t), p(t)$ — текущие координаты перемещающейся частицы (широта, долгота, давление); u, v — горизонтальные составляющие скорости ветра в сферической системе координат; w — вертикальная скорость в p -системе координат; a — радиус Земли; w рассчитывается из уравнения притока тепла [9]:

$$w(t, \lambda, \varphi, p) = \frac{gp}{RT(\gamma_a - \gamma)} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right].$$

Система уравнений (3)–(5) решается на временном интервале $[t^N, t^0]$, т.е. в обратном времени, поэтому в качестве начальных данных задаются координаты частицы $(\lambda^N, \varphi^N, p^N)$ в момент времени t^N .

Для нахождения решения системы (3)–(5) используется вычислительная схема, предложенная в работе [9]. На каждом временном шаге находится значение координаты p из уравнения (5) с использованием простейшей схемы односторонних разностей:

$$p^{n+1} = p^n + w(\lambda, \varphi, p, t)^n \Delta t, \quad (6)$$

где Δt — шаг по времени.

Затем для нахождения горизонтальных координат решается система уравнений (3)–(4) методом Рунге–Кутты четвертого порядка точности [10]. Так как достоверность данных о поле w относительно мала по сравнению с полями u и v , использование схемы, более точной по сравнению со схемой односторонних разностей, для нахождения p^{n+1} не представляется оправданным.

3. Фоновое значение CO_2

Естественные источники образования углекислого газа — растения, океан, вулканические выбросы, лесные пожары. В первом приближении можно считать CO_2 в атмосфере равномерно перемешанным, однако для умеренных широт был выявлен максимум

содержания CO_2 (340–350 млн⁻¹) на высотах 25–30 км. В начале эпохи бурного индустриального развития фоновое содержание у поверхности земли составляло всего лишь 280 млн⁻¹. В настоящее время оно равно 334–356 млн⁻¹ [3]. Скорость роста концентрации CO_2 в год достигает 0.5%, или 0.7 млн⁻¹. Данный газ имеет самый большой относительный вклад в антропогенный парниковый эффект (60%). Мы рассматриваем поступление этой примеси в атмосферу в результате пиролиза древесины и подстилающей поверхности при горении бореальных лесов.

4. Усвоение данных при восстановлении концентрации дымовых аэрозолей

В работе рассматривается задача о восстановлении значений объемной концентрации примеси в дискретных пространственных узлах $(\lambda_i, \varphi_i, p)$, расположенных на выбранной изобарической поверхности $p = \text{const}$, где (λ_i, φ_i) — узлы пространственной прямоугольной широтно-долготной сетки.

Под усвоением данных принято понимать совместный учет математической модели и данных наблюдений для описания пространственно-временной картины распределения исследуемых полей. Системы усвоения данных разрабатываются в настоящее время в различных областях: метеорологии, океанологии, охране окружающей среды [11, 12]. В настоящей работе в качестве данных наблюдений берутся значения эмиссии CO_2 в зонах пожара, вычисленные по изложенной выше, в п. 1, методике. Методика усвоения данных частично заимствована из работы [5].

Усвоение данных проводится на основе цикла прогноз—анализ, при этом под анализом данных понимается интерполяция наблюдений в заданную точку. Наиболее популярным методом анализа является в настоящее время метод оптимальной интерполяции [13], однако для его реализации требуется точное знание среднеквадратических ошибок прогноза и наблюдений. Такой информацией о данных, получаемых при наблюдениях за лесными пожарами, мы не располагаем. По этой причине анализ осуществляется с помощью метода последовательных коррекций [14].

Предполагается, что значение этой концентрации в случае отсутствия данных наблюдений остается неизменным вдоль траектории частицы [4]. Для i -го сеточного узла широтно-долготной сетки производится вычисление координат траектории частицы $(\lambda(t), \varphi(t), p(t))$ в обратном времени. Процедура предназначена для определения значения концентрации q_i в i -м сеточном узле в момент времени t^N . Обозначим через q_f^n ($n = 0, \dots, N$) значение объемной концентрации углекислого газа в i -м сеточном узле в момент времени t^n . В начальный момент времени t^N зададим значение концентрации $q_f^N = g$. Шаг “прогноза” вдоль траектории для одного временного шага Δt можно формально записать следующим образом:

$$q_f^n = q_f^{n+1}. \quad (7)$$

В настоящей работе мы используем следующие индексные обозначения: f — шаг прогноза, a — шаг анализа.

Пусть данные о сгоревшей биомассе имеются 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 . Процедура усвоения данных производится следующим образом: от момента времени t^{j+1} до t^j

считается “прогноз” по формуле (7). В момент t^j , в котором присутствуют данные наблюдений, производится “анализ”, т. е. оценка значений концентрации в i -м сеточном узле по вычисленному на этот момент значению концентрации и данным наблюдений. Полученное значение “анализа” является начальным для вычисления следующего шага “прогноза” (7).

Значение концентрации q_a^j , соответствующей точке траектории $(\lambda^j, \varphi^j, p^j)$ в момент времени t^j , в котором есть информация о пожарах, определяется по значениям данных наблюдений, известным в окрестности этой точки радиусом R . В момент времени t^j производится уточнение значения концентрации с помощью метода последовательных коррекций [14]:

$$q_a^j = q_f^j + \frac{\sum_{k=1}^{K_1} \alpha_{jk} \Delta q_d^j}{\sum_{k=1}^{K_1} \alpha_{jk}}, \quad (8)$$

где K_1 — количество точек наблюдений, попавших в окрестность точки $(\lambda^j, \varphi^j, p^j)$ радиусом 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 -й 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. Для каждой точки наблюдений величина η_k сохраняет свое постоянное значение в течение 7–10 сут. Значение Δq_d^j считается постоянным до высоты 1.5 км. Для высот, больших 1.5 км, изменение Δq_d^j по вертикали вычисляется по формуле

$$\Delta q_d^j(p_1) = \Delta q_d^j(p_2) e^{-\frac{(h_1 - h_2)^2}{2L^2}},$$

где p_1, p_2 — давление; h_1, h_2 — высоты на уровнях p_1, p_2 ; L — характерный масштаб по вертикали [15]. В проведенных экспериментах бралось $B^m = 100$ км, $m = 0$, $R = 1000$ км, $L = 1.5$ км.

5. Численные эксперименты

Цель численных экспериментов состояла в том, чтобы получить пространственное распределение концентрации CO_2 и сравнить со спутниковыми изображениями, на которых можно проследить динамику переноса дымовых шлейфов. При сравнении результатов расчетов с реальными данными была использована программа приема изображений облачности с космических аппаратов NOAA в формате Analog Picture Transmission (APT) с последующей тематической обработкой.

Восстановление концентрации проводилось для региона $63.5^\circ - 80^\circ$ с.ш. и $70^\circ - 172.5^\circ$ в.д. в узлах сетки $2.5^\circ \times 2.5^\circ$. Расчеты соответствуют интервалу времени с 10 по 20 августа 2002 года. В численных экспериментах данные о ветре и температуре линейно интерполировались по времени на шести уровнях. Эти уровни соответствуют высотам с давлением 1000, 925, 850, 775, 700, 600 мбар. Фоновая концентрация CO_2 задавалась равной 340 млн^{-1} на этих уровнях. Информация о пожарах включает в себя дату (число, месяц, год), время (час, минута, секунда), пространственные координаты пожара, площадь горения. При расчете эмиссии использовались данные о сгоревшей биомассе при массовых лесных пожарах на территории Республики Саха (Якутия) [6].

Длительность пожарного сезона в численных экспериментах бралась 90 дней с шагом по времени 1 ч. Выгоревшая площадь, зафиксированная по данным спутника NOAA в 2002 году при пожарах в Якутии, составила около 5 млн га, а восстановленные значения газовых примесей по данным о сгоревшей биомассе — $\text{CO}_2 = 28.6 \cdot 10^9$ кг, $\text{CO} = 2.89 \cdot 10^9$, $\text{CH}_4 = 0.286 \cdot 10^9$ кг.

На рис. 3 представлен спутниковый снимок в АРТ-формате, на котором замкнутой линией очерчена зона задымления и пожаров. На ней отмечены контрольные точки, координаты которых приведены в таблице. На рис. 4 представлены результаты одного из численных экспериментов. Результаты расчетов (рис. 4) и космический снимок (см. рис. 3) соответствуют дате 14 августа 2002 года. Все пожары на рис. 4 отмечены

Координаты контрольных точек на рис. 3

N	С.ш.	В.д.
1	60	127
2	63	120
3	68	121
4	69	129
5	63	132
6	61	129

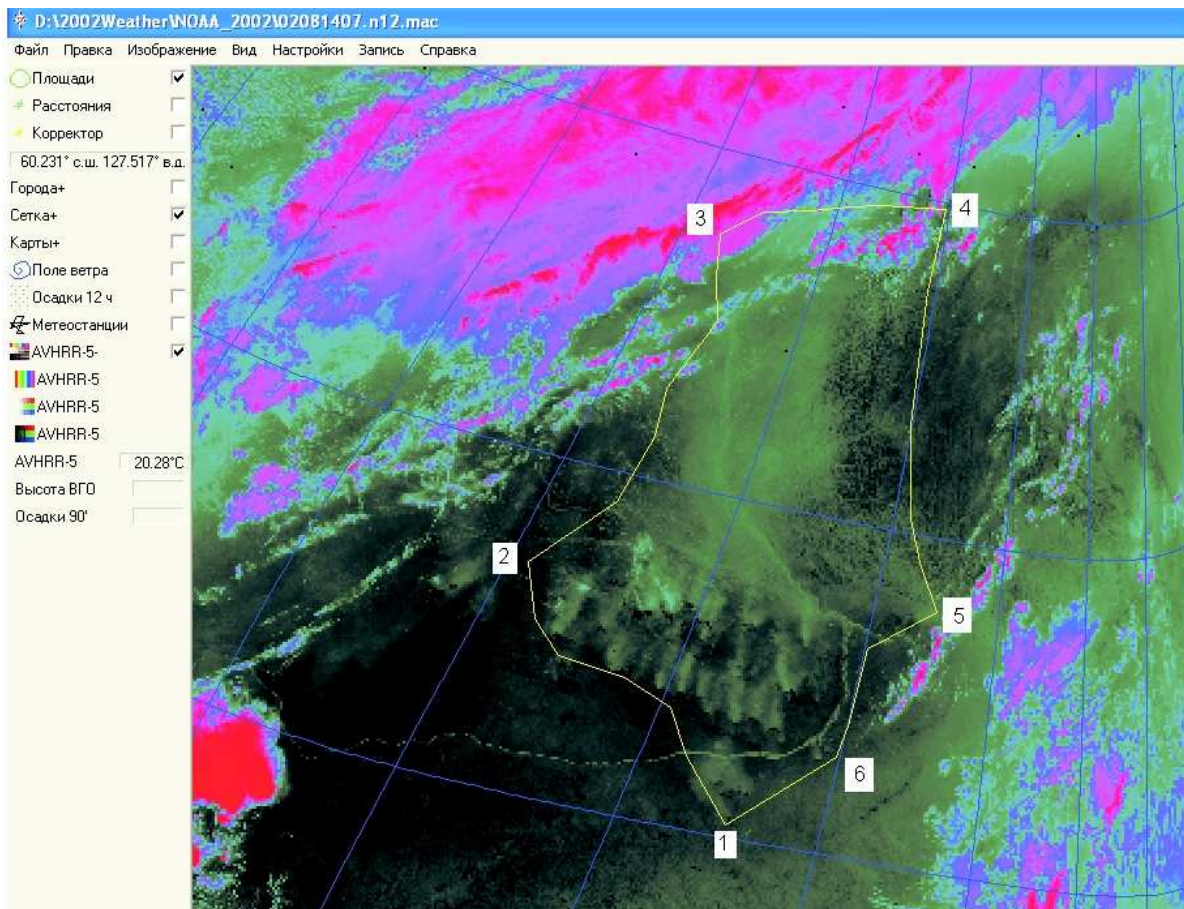


Рис. 3. Снимок пожаров и зоны задымления в Якутии 14.08.2002

в виде черных точек. Изолиниями очерчены зоны распространения эмиссии двуокиси углерода и представлено ее количественное распределение. Более детальный анализ показывает, что территория с самым высоким уровнем концентрации на рис. 4 имеет схожие очертания с зоной пожаров и дымового шлейфа на спутниковом изображении. На рис. 5 представлены результаты численного эксперимента для района $63.5^{\circ} - 73.5^{\circ}$ с.ш. и $90^{\circ} - 152.5^{\circ}$ в.д. Процедура позволяет оценивать концентрацию примеси в различ-

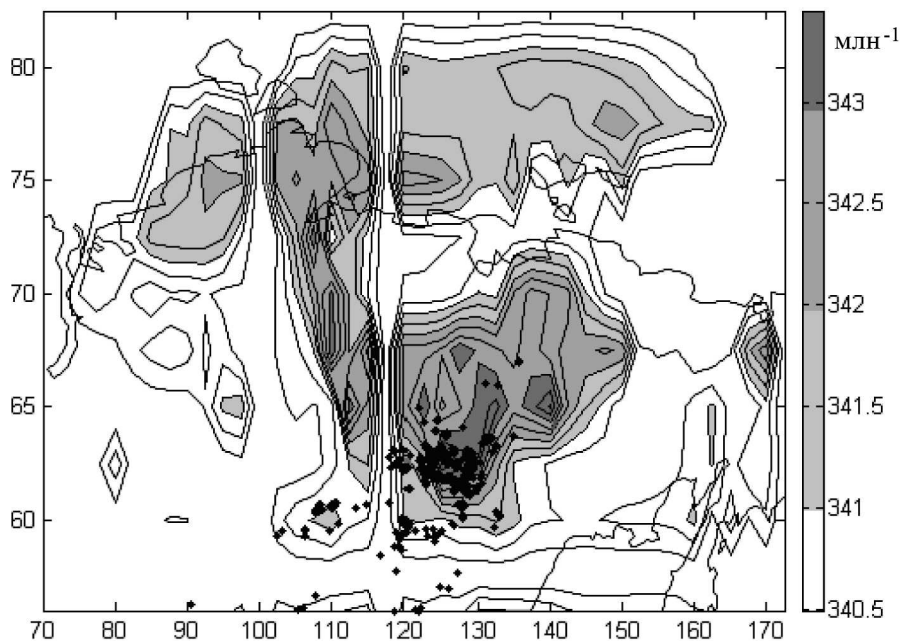


Рис. 4. Результаты расчетов распространения примеси и ее концентрации для региона $63.5^{\circ} - 80^{\circ}$ с.ш. и $70^{\circ} - 172.5^{\circ}$ в.д.

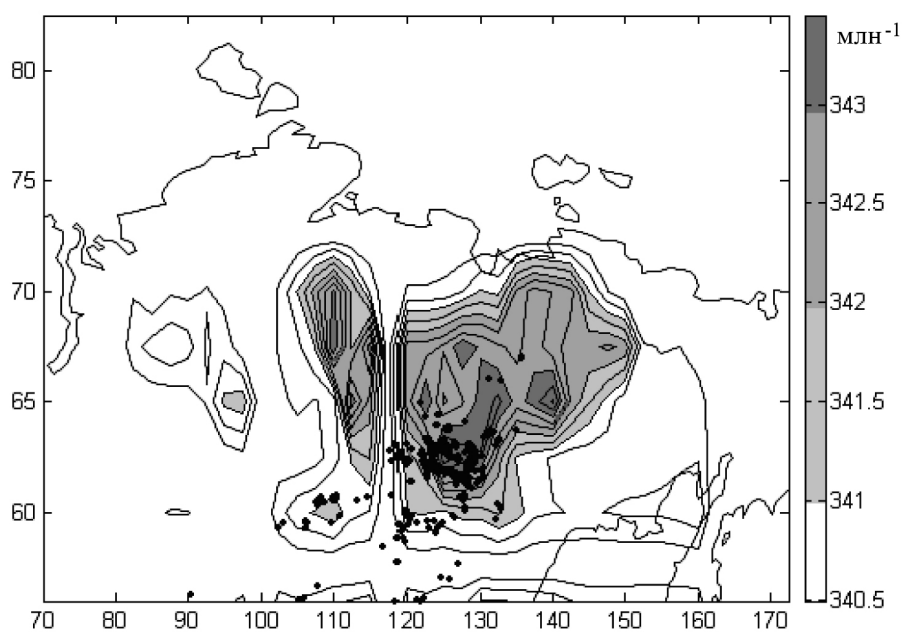


Рис. 5. Результаты расчетов распространения примеси и ее концентрации для региона $63.5^{\circ} - 73.5^{\circ}$ с.ш. и $90^{\circ} - 152.5^{\circ}$ в.д.

ных заданных регионах. На рис. 4 и 5 представлено распределение концентрации для различных областей. Из этих рисунков видно, что изолинии в области локализации пожаров совпадают.

Заключение

Таким образом, представленная методика восстановления распространения объемной концентрации примеси при использовании реальных метеорологических данных и данных о лесных пожарах позволяет описывать распространение газовых составляющих при лесных пожарах за счет атмосферной циркуляции. Результаты численных экспериментов, полученные при использовании данной методики, хорошо согласуются с фактическим распределением дымовых шлейфов по данным спутников серии NOAA.

Выражаем благодарность за предоставленные данные о пожарах Отделу приема и обработки космической информации ВНИИ ГОЧС г. Красноярск.

Список литературы

- [1] ПАРНИКОВЫЙ эффект, изменение климата и экосистемы / Под редакцией Б. Болина, Б.Р. Дееса, Дж. Ягера, Р. Уоррика. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 33–234.
- [2] SOJA A.J., COFER W.R., SHUGART H.H. ET AL. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998 through 2002) // J. of Geophys. Res. 2004. Vol. 109, D14S06, doi:10.1029/2004JD004570.
- [3] МИЦЕЛЬ А.А., ФИРСОВ К.М., ФОМИН Б.А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере. Томск, 2001. С. 67–80.
- [4] SUTTON R.T., O'NEILL A., TAYLOR F.M. High-resolution stratospheric tracer fields estimated from satellite observations using lagrangian trajectory calculations // J. Atmos. Sci. 1994. Vol. 51. P. 2995–3005.
- [5] КНАТТАТОВ В.В., GILL J.C., LYJAK L.V. ET AL. Assimilation of photo chemically active species and a case analysis of UARS data // J. of Geophys. Res. 1999. Vol. 104. P. 18715–18737.
- [6] SUKHININ A.I., IVANOV V.V., PONOMAREV E.I. ET AL. The 2002 Fire season in the Asian part of the Russian Federation: A view from space (2003) // Intern. Forest Fire News. 2003. N 28. P. 18–28.
- [7] SEILER W., CRUTZEN P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere // Clim. Change. 1980. Vol. 2. P. 207–247.
- [8] KASISCKE E.S., HYER E.J., NOVELLI P.C. ET AL. Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide // Global Biogeochem. Cycles. Vol. 19, GB1012, doi:10.1029/2004GB002300.
- [9] БЕЛОУСОВ С.Л., ЮСУПОВ Ю.И. Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 41–48.
- [10] КАЛИТКИН Н.Н. Численные методы М.: Наука, 1978. С. 237–260.

- [11] Климова Е.Г., Киланова Н.В. Численные эксперименты по оценке эмиссии метана на основе системы усвоения данных о пассивной примеси в атмосфере Северного полушария // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 11. С. 961–964.
- [12] Киланова Н.В., Климова Е.Г. Численные эксперименты по оценке систематической ошибки модели в задаче усвоения данных о концентрации пассивной примеси // Вычисл. технологии. 2006. Т. 11, № 5. С. 32–40.
- [13] Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей Л.: Гидрометеиздат, 1963. 287 с.
- [14] BRATSETH A.M. Statistical interpolation by means of successive correction // Tellus. 1986. N 38A. P. 439–447.
- [15] Владимирова А.М., Ляхин Ю.И., Матвеев Л.Т., Орлов В.Г. Охрана окружающей среды. Л.: Гидрометеиздат, 1991. С. 87–116.

*Поступила в редакцию 16.05.07 2007 г.,
в переработанном виде — 2.07.07 2007 г.*