

УДК 551.509.313

Вычислительные технологии оценки состояния окружающей среды по данным наблюдений Земли из космоса

Екатерина Г. Климова*, **Ольга А. Дубровская**
*Институт вычислительных технологий СО РАН,
630090 Россия, Новосибирск, пр. Акад. Лаврентьева, 6¹*

Received 22.10.2008, received in revised form 30.10.2008, accepted 29.12.2008

Работа посвящена численному моделированию переноса и трансформации дымовых аэрозолей, выделяемых при массовых лесных пожарах и создающих обстановку чрезвычайного задымления местности. В работе представлена методика восстановления значений концентрации газовых составляющих на примере CO_2 в узлах сетки заданного региона по данным о лесных пожарах и метеорологической информации. Алгоритм восстановления значений концентрации основан на совместном учете математической модели и данных наблюдений для описания пространственно-временной картины распределения исследуемых полей. Численные эксперименты проводились на примере пожаров 2002 г. на территории Республики Саха (Якутия) и 2006 г., имевших место на территориях Красноярского края и Иркутской области.

Ключевые слова: вычислительный алгоритм, данные наблюдений, обратные траектории, дымовой аэрозоль, газовые эмиссии, массовые лесные пожары.

Введение

Регулярно возникающие в различных регионах земного шара массовые лесные пожары привлекают к себе внимание как природные бедствия, приносящие серьезный экономический ущерб. Лесные пожары – не только бедствие для населения, но и важный фактор локальной, региональной и даже глобальной экодинамики, что проявляется в выбросах в атмосферу дымовых газов и аэрозоля, которые вносят существенный вклад в образование и развитие парникового эффекта [6]. В этой связи оценка выбросов в атмосферу от лесных пожаров выступает одной из актуальных задач.

Газовые составляющие атмосферы, такие как CO , CO_2 , CH_4 , называемые парниковыми газами, оказывают существенное влияние на характер атмосферных процессов и экологическую обстановку в различных регионах [8]. Одним из источников этих газов являются лесные пожары в бореальных лесах на территории Сибири, Якутии, Дальнего Востока.

Так как в Сибири сосредоточены большие запасы наземного углерода, то увеличение площадей пожарищ, длительности пожарного сезона и силы пожаров приводит к тому, что освобождаются значительные объемы углерода [15, 7]. В годы с экстремальной пожарной

* Corresponding author E-mail address: klimova@ict.nsc.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

активностью общая эмиссия углерода может быть на 37-41 % больше, чем в годы с нормальной пожарной активностью, из-за 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 Тг), CH₄ (2,4–4,5 Тг). Эти оценки представляют 10, 15, 19 % соответственно от глобальных оценок, сделанных по всему Земному шару для пожаров растительности [15].

Газовые составляющие, выделяющиеся при пожарах, распространяются далеко за их пределы благодаря атмосферной циркуляции. Поэтому одной из важных задач является описание распространения дымового аэрозоля в пространстве и во времени с привлечением фактической метеорологической информации и данных о пожарах.

1. Вычислительный алгоритм восстановления значений концентрации. Для оценки территории, охваченной дымовым аэрозолем, разработана методика, основанная на вычислении обратных траекторий [17]. В расчетах используются метеорологические данные о ветре, температуре и высоте на заданных изобарических поверхностях.

Система уравнений траекторий имеет следующий вид:

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

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{a} v(t, \lambda, \varphi, p); \quad (2)$$

$$\frac{dp}{dt} = w(t, \lambda, \varphi, p), \quad (3)$$

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 [1]:

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

На каждом временном шаге находится значение координаты p из уравнения (4) с использованием простейшей схемы односторонних разностей:

$$p^{n+1} = p^n + w(\lambda, \varphi, p, t)^n \Delta t, \quad (4)$$

где Δt – шаг по времени.

Затем для нахождения горизонтальных координат решается система уравнений (1) -(2) методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности [3].

Алгоритм восстановления значений концентрации основан на совместном учете математической модели и данных наблюдений для описания пространственно-временной картины распределения исследуемых полей. Такие алгоритмы еще называют алгоритмами усвоения данных. В качестве данных наблюдений берутся значения эмиссии CO₂ в зонах пожара, вычисленные с помощью модели оценки эмиссий газовых примесей по данным о сгоревшей биомассе. Методика усвоения данных частично заимствована из работ [17, 13].

Усвоение данных проводится на основе цикла прогноз-анализ, при этом под анализом данных понимается интерполяция наблюдений в заданную точку [5, 4]. Наиболее популярным методом анализа является в настоящее время метод оптимальной интерполяции [2], 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 экспоненциальной интерполяции [11]. Для i -го сеточного узла широтно-долготной сетки производится вычисление координат траектории частицы $\lambda(t)$, $\varphi(t)$, $p(t)$ в обратном времени. При этом предполагается, что значение этой концентрации при отсутствии данных наблюдений остается неизменным вдоль траектории частицы [17].

Процедура усвоения данных производится следующим образом: от момента времени t^{j+1} до t^j (j – номер шага по времени), т.е. для одного временного шага вдоль траектории считается шаг «прогноза», который можно формально записать следующим образом:

$$q_f^n = q_f^{n+1}, \quad (5)$$

где q_i – значение объемной концентрации углекислого газа в i -ом сеточном узле в момент времени t^N . В начальный момент времени t^N задается фоновое значение. Если есть данные о пожарах 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 , производится шаг «анализа», т.е. оценка значений концентрации в i -м сеточном узле по вычисленному на этот момент значению концентрации и измеренным значениям. Полученное значение «анализа» является начальным для вычисления следующего шага «прогноза».

Значение концентрации на шаге «анализа», соответствующее точке траектории $\lambda(t)$, $\varphi(t)$, $p(t)$ в момент времени t^j , в котором есть информация о пожарах, определяется по значениям данных наблюдений, известным в окрестности этой точки радиусом R (рис. 1). На схеме представлены восстановленная траектория частицы и ее направление. Радиус R описывает окружность, в которую попали пожары, зарегистрированные спутником в момент времени t^j .

Для оценки эмиссий газовых примесей по данным о сгоревшей биомассе была использована модель, предложенная в [12]. При расчете по модели необходима информация по расходу горючего материала, которая зависит от выгоревшей территории, количества горючих материалов на единицу площади, а также характеристик и состояния горючих материалов. Количество горючего материала, в действительности сгоревшего при пожаре, зависит от запаса и состояния топлива, его типа, климатических и метеорологических факторов, а также интенсивности пожара.

При определении расхода горючих материалов измеренные коэффициенты могут применяться для вычисления эмиссий, загрязняющих воздух. Однако эти коэффициенты эмиссий также зависят от пожарных условий. Сделанные измерения показали, что эмиссии некоторых загрязняющих веществ значительно выше при тлении, чем при горении. Модели расхода горючих материалов в общем случае включают эмпирические коэффициенты для прогнозирования относительных объемов тления и горения для различных условий горения. Использование спутниковых данных о выгоревшей территории позволяет сделать более точные оценки эмиссий углерода от лесных пожаров.

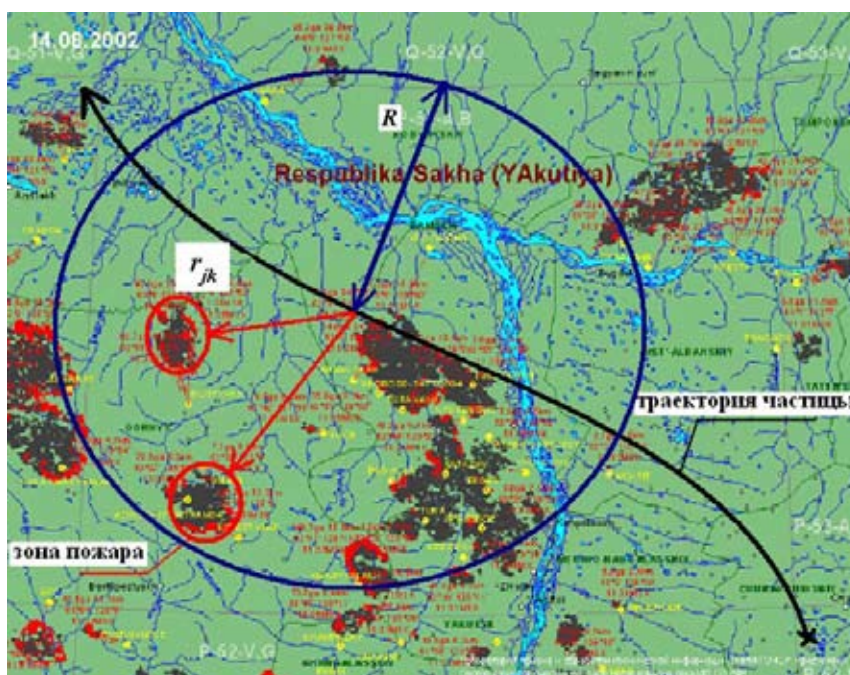


Рис. 1. Схема траектории частицы в момент времени, в котором есть информация о пожарах

Подходы к оцениванию общих эмиссий углерода C_t и эмиссий конкретных шлейфовых газов E_s основаны на известных моделях, предложенных в работе [14]:

$$C_t = A \cdot B \cdot f_c \cdot \beta, \quad (6)$$

$$E_s = C_t \cdot ef_s, \quad (7)$$

где A это 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 видом лесного горючего материала), и ef_s – коэффициент эмиссии для данного вида шлейфового газа s (обычно выражается как доля данного вещества по отношению к сухому топливу, сгоревшему во время пожара).

В работе расчеты оценки эмиссии CO_2 по формулам (6)-(7) были сделаны при использовании спутниковых данных о площади, пройденной огнем, со следующими эмпирическими коэффициентами: средний запас горючего материала рассматриваемого региона – 8,0 т углерода на гектар, доля углерода f_c от 1 до 0,6, масштабирующий коэффициент $0 \leq \beta \leq 1$, коэффициент эмиссии для CO_2 – 0,45 [12].

Погрешности в оценках эмиссии могут быть уменьшены путем более детального учета условий горения, а также исследования закономерностей горения топлива в зависимости от погодных и экологических условий в типичных для исследуемого региона экосистемах [9, 10].

2. Численные эксперименты. Были проведены численные эксперименты с целью получения пространственного распределения концентрации CO_2 и сравнения их со спутниковыми изображениями, на которых можно проследить динамику переноса дымовых шлейфов.

Проведена серия экспериментов на примере пожаров 2002 г. Республики Саха (Якутия) и 2006 г. Красноярского края, Иркутской области. В этих экспериментах была реализована

процедура усвоения данных, а также сделаны расчеты на более мелкой сетке – $1,25^0 \times 1,25^0$. Представленная методика позволяет оценивать концентрацию примеси в различных заданных регионах.

В качестве источника данных дистанционного зондирования были использованы материалы спутниковых съемок низкого и среднего пространственного разрешения NOAA/AVRR/TOVS и Terra/MODIS на территории Восточной Сибири, республик Саха (Якутия) и Тыва [16]. При обнаружении пожара фиксировались год, месяц, дата, час, минута, секунда, широта, долгота и площадь, пройденная огнем.

В работе расчеты оценки эмиссии CO_2 были сделаны на примере Якутских пожаров 2002 г. и пожаров в районе р. Ангары в 2006 г. при использовании данных о площади, пройденной огнем, со следующими эмпирическими коэффициентами: средний запас горючего материала рассматриваемого региона – 8,0 т углерода на гектар, доля углерода f_s от 1 до 0,6, масштабирующий коэффициент $0 \leq \beta \leq 1$, коэффициент эмиссии для CO_2 – 0,45 [12].

Массовые лесные пожары наибольшей мощности прошли на территории Республики Саха (Якутия) в 2002 г. В работе использовались данные с 10 по 20 августа 2002 г., что соответствует пику пожарной активности, который был зафиксирован спутником NOAA.

Для Якутских пожаров 2002 г. восстановление концентрации проводилось для региона $70^0 - 172,5^0$ в.д. и $63,5^0 - 80^0$ с.ш. в узлах сетки $2,5^0 \times 2,5^0$. В численных экспериментах использовались данные Реанализа Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды (ECMWF) о ветре и температуре, которые линейно интерполировались по времени на 6-ти уровнях. Эти уровни соответствуют высотам 1000, 925, 850, 775, 700, 600 мбар. Фоновая концентрация CO_2 задавалась равной 340 ppm. В этих численных экспериментах использовалась не только метеорологическая информация, но и учитывалась спутниковая информация о пожарах в реальном времени.

Выгоревшая площадь, зафиксированная по данным спутника NOAA, при пожарах в Якутии составила около 5 млн га, а восстановленные значения газовых примесей по данным о сгоревшей биомассе были для $\text{CO}_2 = 28.6 \cdot 10^9$ кг. Длительность пожарного сезона в этих экспериментах бралась 90 дней с шагом по времени 1 час.

Все пожары на рис. 2, 3 отмечены в виде черных точек. Изолиниями очерчены зоны распространения эмиссии двуокси углерода и представлено ее количественное распределение. На рис. 2 и 3 представлено распределение концентрации для различных областей.

При восстановлении концентрации в узлах более мелкой широтно-долготной сетки, а именно $1,25^0 \times 1,25^0$, было получено распределение концентрации, представленное на рис. 3 а, б. Данные о ветре и температуре были взяты на сетке $2,5^0 \times 2,5^0$, как и в предыдущих экспериментах.

Результаты расчетов сравнивались с данными спутникового зондирования зон массовых лесных пожаров, на которых можно проследить динамику дымовых шлейфов. Была использована программа приема изображений облачности с космических аппаратов NOAA в формате Analog Picture Transmission (APT) с последующей тематической обработкой.

На рис. 4 представлен спутниковый снимок в APT-формате, на котором замкнутой линией очерчена зона видимого задымления и пожаров. В ней концентрация CO_2 достигает своих наибольший значений. Также отмечены контрольные точки и определены их координаты.

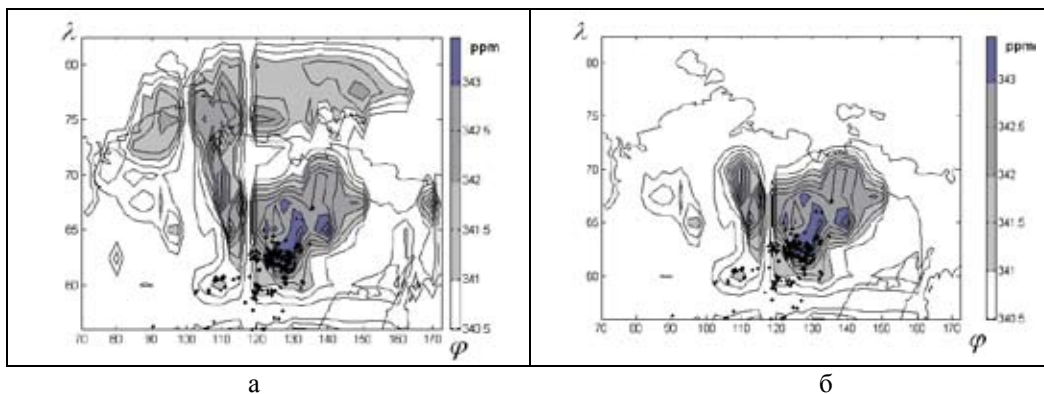


Рис. 2. Результаты расчетов распространения примеси и ее концентрации для регионов: а – $70^{\circ} - 172,5^{\circ}$ в.д. и $63,5^{\circ} - 80^{\circ}$; б – $90^{\circ} - 152,5^{\circ}$ в.д. и $63,5^{\circ} - 73,5^{\circ}$ с.ш.

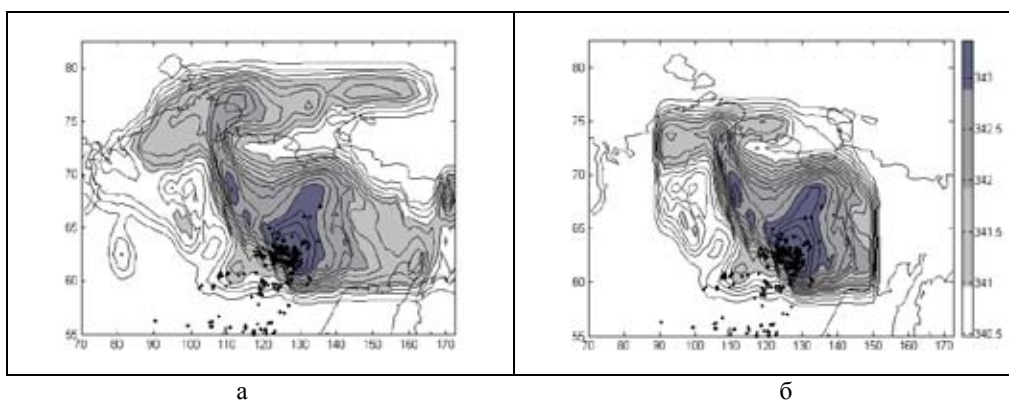


Рис. 3. Для регионов: а) $70^{\circ} - 172,5^{\circ}$ в.д. и $63,5^{\circ} - 80^{\circ}$ с.ш.; б) $90^{\circ} - 150^{\circ}$ в.д. и $60^{\circ} - 75^{\circ}$ с.ш. в узлах сетки $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$

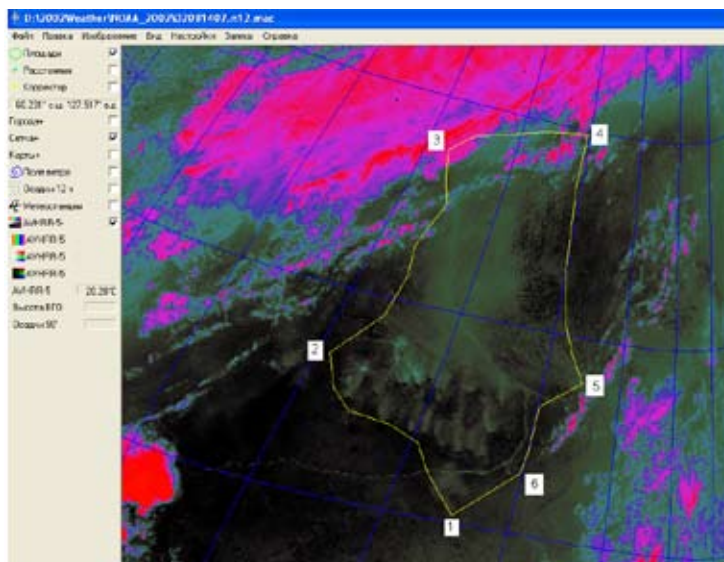


Рис. 4. Снимок пожаров и зоны задымления в Якутии 14.08.2002 г.

Результаты численных экспериментов (рис. 3) и космический снимок (рис. 4) соответствуют дате 14 августа 2002 г. Более детальный анализ показывает, что территория с самым высоким уровнем концентрации на рис. 3 имеет схожие очертания с зоной пожаров и дымового шлейфа на спутниковом изображении.

Вторая серия численных экспериментов проводилась на примере пожаров 2006 г., имевших место на территориях Красноярского края и Иркутской области. При расчете обратных траекторий были использованы метеорологические данные о ветре, температуре и высоте с 19 по 22 июля 2006 г., предоставленные Гидрометцентром России. Восстановление концентрации проводилось для регионов $60^{\circ} - 120^{\circ}$ в.д. и $55^{\circ} - 70^{\circ}$ с.ш. и $73^{\circ} - 111^{\circ}$ в.д. $55^{\circ} - 67^{\circ}$ с.ш. в узлах широтно-долготной сетки $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$ при задании модельного времени 96 ч. На рис. 5 а, б приведены результаты численного эксперимента по восстановлению концентрации CO_2 для различных областей. На рис. 6 представлен спутниковый снимок в АРТ-формате зоны массовых лесных пожаров 21 июля 2006 г. На нем видно расположение циклонов и облачности. Выделена область пожаров и распространения дымовых шлейфов. Более детальный анализ показывает, что на рис.5 территория с самым высоким уровнем концентрации имеет пространственное совпадение с распространением дымовых шлейфов на спутниковом изображении (рис. 6). Эта область расположена в районе $61,5^{\circ}$ с.ш. и $92, 3^{\circ}$ в.д.

К сожалению, используя имеющуюся у нас спутниковую информацию, мы можем сделать лишь качественные оценки работоспособности предлагаемой методики, т.е. пространственное совпадение. Для проведения количественного сравнения требуются данные о концентрации двуокси углерода в районе массовых лесных пожаров, которыми мы в настоящее время не располагаем.

Заключение. Таким образом, в работе представлена методика восстановления значений концентрации газовых составляющих на примере CO_2 в узлах сетки заданного региона по спутниковым данным о лесных пожарах и метеорологической информации. Концентрации CO_2 в регионе оценивались с помощью построения обратных траекторий. Для восстановления значений концентрации вдоль траекторий использовалась процедура усвоения данных. Расчеты

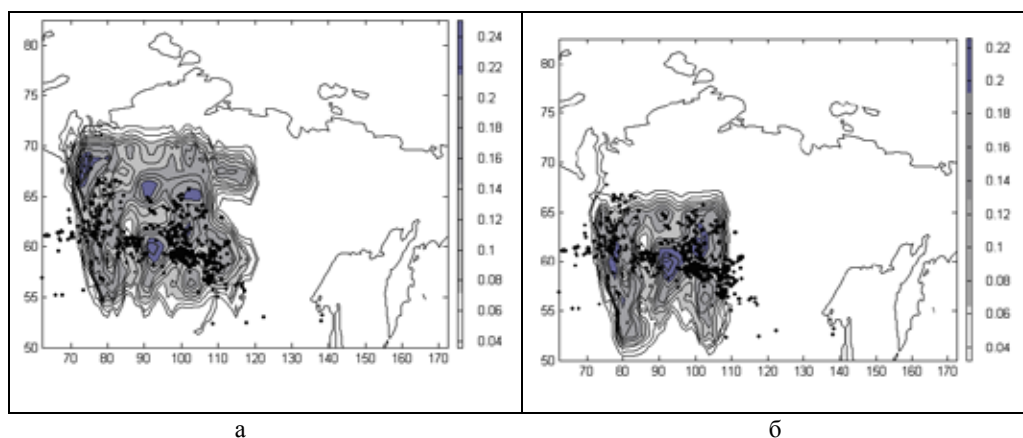


Рис. 5. Результаты расчетов распространения примеси и распределение концентрации в регионе: а – $60^{\circ} - 120^{\circ}$ в.д. и $55^{\circ} - 70^{\circ}$ с.ш.; б – $73^{\circ} - 111^{\circ}$ в.д. $55^{\circ} - 67^{\circ}$ с.ш.

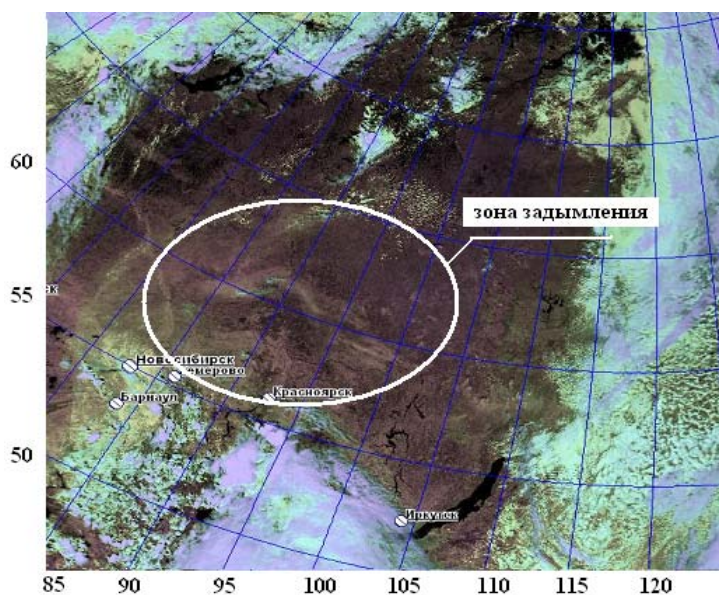


Рис. 6. Спутниковый снимок территории Иркутской области и Красноярского края 21.07.2006 г.

оценки эмиссии CO_2 были сделаны на примере пожаров на территории Республики Саха (Якутия) в 2002 г. и в Приангарье 2006 г. Приводятся результаты численных экспериментов, с помощью которых вычисляется распространение CO_2 . Комплексный анализ спутниковых снимков, метеорологических данных и результатов численного моделирования переноса примеси показал, что предложенная методика позволяет получать качественную картину распространения CO_2 в заданном регионе. Качественная оценка территории распространения газовых составляющих является важной при прогнозе катастрофических последствий лесных пожаров. В дальнейшем планируется продолжить работу по данной методике и, при наличии натуральных данных о концентрации газовых составляющих дымовых шлейфов, провести оценки точности восстановления количественных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 86.

Список литературы

1. Белоусов С.Л., Юсупов Ю.И. Расчет трехмерных траекторий воздушных частиц // Метеорология и гидрология. 1991. № 12. С. 41 – 48.
2. Гандин Л.С. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 287 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
4. Киланова Н.В., Климова Е.Г. Численные эксперименты по оценке систематической ошибки модели в задаче усвоения данных о концентрации пассивной примеси // Вычислительные технологии. 2006. –Т. 11. № 5. С. 32 – 40.
5. 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. № 11. С. 961 – 964.

6. Кокорин А.О., Кураев С.Н. Обзор доклада Николаса Стерна «Экономика изменения климата» / WWF, GOF. М.: WWF России. 2007. 50 с.
7. Мицель А.А., Фирсов К.М., Фомин Б.А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере. Томск: STT, 2001. 444 с.
8. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы [Под ред. Б. Болина, Б.Р. Деса, Дж. Ягера, Р. Уоррика]. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 557с.
9. Alexeyev V. A., Birdsey R.A., Stakanov V.D., Korotkov I. A. Carbon storage in the Asian boreal forests of Russia // *Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*. Springer-Verlag. New York. 2000. P.289 – 311.
10. Bertschi I., Yokelson R. J., Ward D. E., Babbitt R. E., Susott R. A. et al. Trace gas and particle emissions from fires in large diameter and belowground biomass fuels // *J. Geophys. Res.* 2002. № 108. P. 69 – 84.
11. Bratseth A.M. Statistical interpolation by means of successive correction // *Tellus*. 1986. №38A. P.439 – 447.
12. Kasiske Eric S., Hyer Edward J., Novelli Paul C., Bruhwiler Lori P., French Nancy H. F., Anatoly I. Sukhinin et al. Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide// *Global Biogeochem. Cycles* 2005. 19, GB1012, doi:10.1029/2004GB002300.
13. Khattatov B.V., Gill J.C., Lyjak L.V., Brasseur G.P. et al. Assimilation of photo chemically active species and a case analysis of UARS data // *Journal of Geophys. Res.* 1999. Vol.104. P. 18715 – 18737.
14. Seiler W., Crutzen P. J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere // *Clim. Change*. 1980. №2. P.207 – 247.
15. Soja Amber J., Cofer W. Randy, Shugart Herman H., Sukhinin Anatoly I., et al. Estimating fire emissions and disparities in boreal Siberia (1998 through 2002) // *Journal of Geophysical Reseach*. 2004. Vol. 109, D14S06, doi:10.1029/2004JD004570.
16. Sukhinin A.I., Kashkin V.B., Ponomarev E.I. Monitoring Forest Fire In Eastern Siberia From Space // *Proceeding Of SPIE*. 1999. V. 3983. P. 206 – 214.
17. Sutton R.T., O'Neill A., Taylor F.M. High-resolution stratospheric tracer fields estimated from satellite observations using lagrangian trajectory calculations // *Journal of Atmospheric Science*. 1994. №51. P. 2995 – 3005.

Computational Technologies of Environment Condition Estimation According to the Data of Observations

Ekaterina G. Klimova and Olga A. Dubrovskaya
*Institute of Computational Technologies SB RAS,
6 Acad. Lavrentiev pr., Novosibirsk, 630090 Russia*

The paper is devoted to numerical modeling of transport and transformation of the smoke aerosols allocated at mass forest fires and creating conditions of extreme smoke blanketing of territory. The technique of restoration of gas components concentration on example CO₂ in the grid points of the given region using the information about forest fires and the meteorological data is presented. The algorithm of restoration of values of concentration is based on the joint account of mathematical model and the observations for the description of space – temporary distribution of researched fields. Numerical experiments were made on an example of fires 2002 in territory of Republic Sakha (Yakutia) and of fires 2006, taken place on territories of Krasnoyarsk region and Irkutsk area.

Keywords: numerical algorithm, data of observations, the backward trajectories, smoke aerosol, gas emission, mass forest fires.
