

*R. Ванкевич, Т. Ермакова, М. Софиев*

**СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ПОДЪЕМА СТРУИ ДЫМА ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПО ПОЛУЭМПИРИЧЕСКИМ ФОРМУЛАМ И ОДНОМЕРНОЙ МОДЕЛИ BUOYANT**

*R. Vankevich, T. Ermakova, M. Sofiev*

**COMPARISON OF THE INJECTION HEIGHT OF PLUMES FROM WILD-LAND FIRES CALCULATED WITH SEMI-EMPIRICAL FORMULAS AND 1-D PLUME-RISE MODEL BUOYANT**

*В работе представлены результаты вычислений высот подъема струй дыма от лесных пожаров на территории Северной Америки в 2007 г. Вычисления проводились с использованием модифицированных полуэмпирических формул Г. Бриггса и одномерной модели подъема BUOYANT. Сравнение показало заметно лучшее соответствие экспериментальным данным результатов BUOYANT.*

*Ключевые слова: высота подъема струи дыма, лесные пожары.*

*The results of the wild-land fires plume rise calculations with the modified semi-empirical formulas of G. Briggs and 1-D BUOYANT model are compared for the US-2007 fire season. The outcome showed significantly better agreement with observations for the BUOYANT simulations.*

*Key words: plume heights, forest fires.*

## **Введение**

Проблема лесных пожаров становится все более актуальной. Неконтролируемые лесные пожары, которые зачастую являются результатом халатности или поджога, уничтожают миллионы гектаров леса, приводят к гибели людей и животных, а также к огромным экономическим потерям.

Ежегодно в мире в целях производства энергии сжигается 9,2 млрд т биомассы. На долю стихийных лесных пожаров приходится свыше половины всей сгораемой биомассы или 5,1 млрд т. В то же время в результате лесных пожаров в атмосферу выбрасывается 3,4 млрд т углекислого газа, что усиливает парниковый эффект и способствует изменению климата на нашей планете.

Выбросы от лесных пожаров вносят существенный вклад в состав атмосферы в региональных и глобальных масштабах. При сжигании древесины выделяется широкий спектр химически активных газовых примесей (например, CO, неметановых углеводородов, оксидов азота). Кроме того, пожары являются значительным источником аэрозолей, которые оказывают существенное воздействие на радиационный баланс атмосферы.

Высота подъема струи дыма от пожара определяется сложной функцией, зависящей от интенсивности горения и метеорологических характеристик состояния атмосферы во время горения. В результате вертикальное распределение

выбросов вредных веществ вблизи источника варьируются в широких пределах [1]. Например, некоторые исследования показали, что струи дыма от отдельных пожаров часто не выходят за границу пограничного слоя [2]. Однако большие пожары могут выделять достаточно энергии, чтобы дым поднимался выше пограничного слоя. При проведении измерений на Аляске и в Канаде были обнаружены пожары, выбросы от которых достигали высот от 2 до 7 км [3, 4, 5]. Также известны случаи, когда из-за сильной конвекции, вызванной пожаром, выбросы достигали нижних слоев стратосферы ( $> 10$  км), но такая пиро-конвекция не является частым, регулярным событием [6, 7, 8].

Большинство современных моделей, считающих высоту подъема струи дыма от пожара, могут быть разделены на две категории: интегральные и численные модели.

Для интегральной модели размерные аргументы и/или интегральные уравнения сохранения используются для получения отношений между характеристиками параметров, таких как максимальный подъем струи дыма, описываемый как функция источника и метеоусловий окружающей среды совместно с простыми законами, которые описывают процесс вовлечения окружающего воздуха в дымовую струю. В большинстве случаев, эти модели предполагают профили физических величин автотельного поперечного сечения, как правило, Гауссовских структур, по оси факела. Простые алгоритмы, используемые для описания подъема струи и силы плавучести, были предложены в середине 1960-х гг. Бриггсом для выбросов дымовых газов из фабричных труб. Примером внедрения в основную модель интегральной модели подъема струи являются FEPS (Fire Emission Production Simulator), FIREPLUME, VSMOKE и BUOYANT [9].

Численные модели обычно используют численное интегрирование осредненных уравнений сохранения, дополненные схемами замыкания турбулентности, для того, чтобы описать поля в деталях. Эти модели позволяют более подробно и точно прогнозировать динамику подъема струи дыма, чем интегральные модели.

### **Мониторинг пожаров из космоса**

В настоящее время одним из распространенных способов получения информации о лесных пожарах является анализ космических наблюдений [14]. Различные спутники обеспечивают наблюдение и возможность измерения различных характеристик пожара с целью мониторинга опасных ситуаций: районы с очень сухой и, следовательно, крайне чувствительной к любой огненной вспышке почвой, активно пылающие и тлеющие пожары, выгоревшие районы, а также дым и тренды газовых выбросов от пожарной деятельности. Спутниковые системы, используемые для мониторинга пожаров, обладают различными характеристиками. Некоторые спутниковые системы доступны для мониторинга пожаров с различными возможностями в отношении пространственного раз-

решения, чувствительности спектральных диапазонов, а также частоты пролетов над горящей поверхностью.

За последние десятилетия, вместе с достижениями в области технологий спутникового дистанционного зондирования, космические датчики для различных задач стали широко использоваться для оперативного обнаружения пожара и для потенциальных оценок пожарной деятельности, например, NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Visible and Infrared Scanner (VIRS), the US Geological Survey (USGS) Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM) and Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), the National Aeronautics and Space Administration (NASA), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (Modis) [10].

Запуск спутника Nasa Terra в конце 1999 г. был значительным шагом вперед в вопросе мониторинга пожаров из космоса. Полезная нагрузка спутника включает в себя Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), инструмент, имеющий одно-километровые, средние и длинноволновые инфракрасные диапазоны (области спектра), разработанные специально для наблюдения за активными пожарами. В дополнение к возможности обнаружения пожаров эти диапазоны позволяют, например, различать низовые пожары слабой интенсивности от верховых лесных пожаров большей интенсивности [11].

### **Материалы и методы**

Инструменты MISR и MODIS на борту спутника Terra позволяют получать ряд параметров, с помощью которых возможно изучение струй дыма от лесных пожаров. Эти данные находятся в свободном доступе и обрабатываются в рамках проекта по развитию климатологии с точки зрения высоты выброса аэрозоля и для поддержки исследований в области лесных пожаров, изменения климата и качества воздуха.

Информация о струе дыма извлекается из комплекта спутниковых данных, который также включает в себя местоположение и время наблюдения, измерения высоты струи дыма (из которых может быть получена высота выбросов аэрозоля), примерную радиационную мощность пожаров, направление перемещения дыма, площади индивидуальных струй дыма, свойства аэрозоля и оценки альбедо. В этом контексте струи дыма рассматриваются как дискретные области дыма, которые можно проследить до их источника на земле и которые имеют отличительную форму, определяемую направлением ветра.

Также MISR осуществляет стереосъемку облаков и подстилающей поверхности. Сопоставляя скорость спутника с изменением положения облака и учитывая поправку на ветер, можно оценить высоту облака над поверхностью.

В данном исследовании было проведено сравнение высот подъема струи дыма от пожара, посчитанных по формулам Бриггса, предложенных им в 1960-х и в 1980-х гг., с высотами, полученными из спутниковых данных [15]. Эти же

высоты были посчитаны на одномерной модели BUOYANT [9]. После чего результаты всех вычислений сравнили между собой, для выявления наиболее точного метода вычисления.

Были протестированы пожары, полученные со спектрорадиометра MISR, с борта спутника NASA Terra. Пожары имели место на территории Северной Америки в 2007 году, преимущественно в летний период времени.

Предложенные формулы Бриггсом в 1969 г. – это так называемый «закон 2/3», который гласит, что подъем прямо пропорционален расстоянию от источника, где дым от пожара начинает движение по ветру, в степени 2/3. В условиях неустойчивой или нейтральной стратификации атмосферы подъем рассчитывается по формуле:

$$\Delta h = 1,6BF^{1/3}(3,5x^*)^{2/3}u^{-1}, \quad (1)$$

где  $\Delta h$  – подъем выбросов над трубой, м;  $u$  – средняя скорость ветра от трубы до максимальной высоты подъема, м/с<sup>-1</sup>;  $BF$  – параметр силы плавучести (м<sup>4</sup>с<sup>-3</sup>) [ $= g v_s r^2 (1 - \rho/\rho_a)$ ];  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>-2</sup>;  $v_s$  – скорость газа на выходе из трубы, м/с<sup>-1</sup>;  $r$  – радиус трубы (м);  $\rho$  – плотность газа, г/м<sup>3</sup>;  $\rho_a$  – плотность окружающего воздуха, г/м<sup>3</sup>;  $x^*$  – расстояние, на котором атмосферная турбулентность начинает доминировать над вовлечением (м):

$$x^* = 14BF^{5/8}, \text{ когда } BF < 55 \text{ м}^4\text{с}^{-3}, \quad (2)$$

$$x^* = 34BF^{2/5}, \text{ когда } BF \geq 55 \text{ м}^4\text{с}^{-3}. \quad (3)$$

В случае устойчивой стратификации подъем рассчитывается:

$$\Delta h = \begin{cases} 2,4(BF/us)^{1/3} \\ 5BF^{1/4}s^{-3/8} \end{cases}. \quad (4)$$

В данном случае первое уравнение в системе применяется для ветреных условий, второе в случае безветренной погоды.  $s$  – параметр устойчивости (с<sup>2</sup>):

$$s = \frac{g}{T} \frac{\partial \Theta}{\partial z}, \quad (5)$$

где  $\partial \theta / \partial z$  – вертикальный градиент потенциальной температуры по высоте всего подъема дыма, Км<sup>-1</sup>;  $T$  – температура воздуха, К.

Эти формулы были преобразованы и расписаны для разных стратификаций атмосферы в 80-х годов предыдущего столетия с учетом большего числа метеохарактеристик для условий устойчивой, безразличной и неустойчивой стратификаций соответственно:

$$\Delta h_f = 2,1 \left( \frac{r_0 U^2}{N^2 F^2 K^3} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (6)$$

$$\Delta h_f = 0,76 \left( \frac{r_0 U^2}{u_*^2 F^2 K^3} \right), \quad (7)$$

$$\Delta h_f = 4,5 \left( \frac{r_0 U^2 z_i^{\frac{2}{3}}}{4 w_*^2 F^2 K^3} \right)^{\frac{3}{5}}, \quad (8)$$

здесь  $\Delta h_f$  – высота подъема выбросов, м;  $r_0$  – радиус лесного пожара, м;  $U$  – скорость ветра на высоте 10 м, м/с;  $w_*$  – скорость конвекции, м/с;  $N$  – частота Брента-Вайсяля:

$$N = \left( \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (9)$$

$F$  – число Фруда:

$$F = \left( \frac{w_0^2 \rho_a}{2 \Delta \rho g r} \right)^{\frac{1}{2}}; \quad (10)$$

$K$  – отношение скоростей [ $=U/w_0$ ];  $\Delta \rho$  – разница между плотностью окружающего воздуха и плотностью дыма ( $\rho_a - \rho_p$ );  $w_0$  – начальная вертикальная скорость, м/с:

$$w_0 = \frac{8,8 \cdot 10^{-6} Q_h T_p}{g(T_p - T_a) r_0^2}, \quad (11)$$

здесь  $Q_h$  – скорость тепловыделения, Дж/с;  $T_p, T_a$  – температура дымового шлейфа и атмосферы (К);  $U_*$  – динамическая скорость, м/с;  $z_i$  – высота инверсии, м. Частота Брента-Вайсяля, динамическая и конвективные скорости были посчитаны на модели SILAM [12] по данным Европейского центра.

Радиационная мощность излучения пожара (fire radiative power, далее FRP) – максимально доступная и физически обоснованная характеристика пожара, которая, скорее всего, уже включает в себя все необходимые данные о пожаре, поэтому формула (1) для нейтральной и неустойчивой стратификации была преобразована к виду, базирующемуся на FRP:

$$\Delta h = 10 \left( \frac{gFRP}{TC_p \rho} \right)^{3/5}. \quad (13)$$

Формула (4) для устойчивой стратификации в ветренную и безветренную погоду были приведены к виду:

$$\Delta h = 2,4 \left( \frac{FRP}{u C_p \rho \frac{\partial \Theta}{\partial z}} \right)^{1/3}, \quad (14)$$

$$\Delta h = \frac{5 \left( \frac{gFRP}{T \rho C_p} \right)^{1/4}}{\left( \frac{g}{T} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right)^{3/8}}. \quad (15)$$

Формулы (6), (7) и (8) для устойчивой, безразличной и неустойчивой стратификаций соответственно были приведены к виду:

$$\Delta h_f = 5,2 \left( \frac{FRP}{N^2 U} \right)^{1/3}, \quad (16)$$

$$\Delta h_f = 13,376 \left( \frac{FRP}{u_*^2 U} \right), \quad (17)$$

$$\Delta h_f = 10,9 \left( \frac{FRP * BLH^{2/3}}{w_*^2 U} \right)^{3/5}. \quad (18)$$

$FRP$  для формул (13), (14), (15) подставляется в ваттах, для (16), (17), (18) – в мегаваттах,  $BLH$  – высота пограничного слоя в метрах.

Модель BUOYANT применима для устойчивых плавучих струй дыма и позволяет учитывать изменение скорости ветра, температуры, давления и плотности с высотой. В модели предусмотрена ситуация столкновения дымовой струи с инверсией температуры выше пограничного слоя. Состояние атмосфера вокруг дымовой струи предполагается постоянным, не нарушаемым источником, т.е. его характеристики не подвержены влиянию тепла от источника. Воздействие силы плавучести постепенно снижается по мере того, как дым начинает взаимодействовать с инверсионным слоем [13, 9].

Уравнения модели формулируются как система интегральных потоков в виде функции по расстоянию  $y$  вдоль траектории центральной линии дымовой струи. Основным уравнением модели является уравнение потока массы:

$$Q = \pi R^2(y) \rho(y) u(y), \quad (12)$$

где  $R(y)$  – радиус пожара, м;  $\rho(y)$  – средняя плотность дымового шлейфа,  $г/м^3$ ;  $u(y)$  – средняя скорость ветра вдоль центральной линии шлейфа, м/с.

Входными параметрами модели, характеризующими метеорологические

условия, являются следующие величины: высота пограничного слоя, скорость ветра, температура и давление у земной поверхности, высота инверсионного слоя и градиент потенциальной температуры на этой высоте. Для описания источника пожара вводились: поток массы, температура и радиус горящей зоны.

Определение, как правило, необходимых характеристик, таких как радиус, температура источника и так далее является сложной задачей, так как их невозможно получить напрямую, из спутниковых наблюдений. Также горящая местность, как правило, не имеет правильной формы, а подразумеваемая температура источника – это либо температура пламени, либо температура исходящих газов, либо вообще нечто среднее.

При вычислении температуры и радиуса пожара для данного исследования использовалась яркостная температура с двух каналов спутника MODIS, 21 и 31 (с длиной волны 3,96 и 11 мкм, соответственно). Предполагалось, что лишь часть пикселя ( $f$ ) (размером 1–2 км<sup>2</sup>) покрыта пожаром и имеет температуру  $T_f$ , а оставшаяся площадь пикселя ( $1-f$ ) имеет температуру  $T_b$ . Излучение, определенное на каждом канале, можно выразить следующей формулой:

$$L_i = f\varepsilon B(T_f) + (1 - f)\varepsilon B(T_b), \quad (19)$$

где  $B(T)$  – функция Планка для абсолютно черного тела с температурой  $T$ . Зная фоновую температуру воздуха  $T_b$  и излучательную способность  $\varepsilon$ , полагая ее постоянной для всего пикселя на обоих каналах, можно составить систему из двух уравнений с двумя неизвестными  $f$  и  $T_f$ .

В результате решения этой системы получается обратная зависимость между этими характеристиками: чем меньше площадь пожара, тем выше температура пожара. Из-за погрешностей измерений, при крайне малых площадях получаются нереально большие температуры. В том случае, если яркостные температуры на обоих каналах совпадают, вычисление вышеуказанных характеристик невозможно.

## Результаты

Измерения высоты подъема струи дыма от пожаров были взяты из архива MISR [<http://www-misr.jpl.nasa.gov/Mission/misrInstrument/>]. В случае пожаров облако дыма часто формируется несколькими близко расположенными очагами горения. В таких случаях MISR архив содержит список всех пожаров и их FRP, участвовавших в формировании облака. Для расчетов эти мощности были: а) просуммированы (далее TOTAL FRP), б) выбрана максимальная (далее max FRP).

Также каждое спутниковое измерение высоты струи дыма имеет свою качественную характеристику: хорошее, среднее или плохое измерение. В исследовании использовались все измерения. Наблюдения за пожаром не ведется в режиме non-stop, данные поступают лишь после того, как спутник пролетает над горящей поверхностью, обязательно незакрытой облачным массивом.

Погрешность измерения высоты струи дыма от пожара со спутника может составлять плюс-минус 500 м. Соответственно все расчетные высоты, которые попали в амплитуду данной погрешности, считаются «точными» результатами вычислений.

Результаты вычислений с использованием  $\max$  FRP по более ранним и более простым формулам Бриггса (13), (14) и (15) оказались точнее, чем вычисления по формулам (16), (17), (18), однако хуже модельных вычислений (рис. 1 и 2).

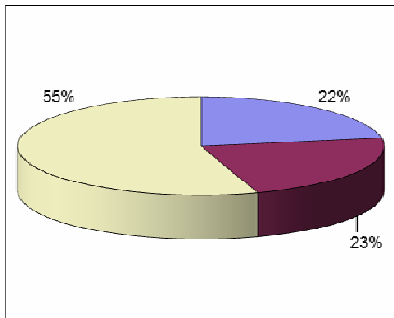


Рис. 1. Процентное соотношение результатов сопоставления расчетов по формулам (13), (14), (15) Гарри Бриггса с данными: внутри диапазона погрешности MISR – 55%, занижение – 22%, завышение высот – 23%

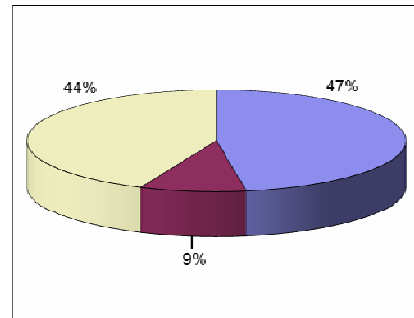


Рис. 2. Процентное соотношение результатов сопоставления расчетов по формулам (16), (17), (18) Гарри Бриггса с данными: внутри диапазона погрешности MISR 44%, занижение – 47%, завышение высот – 9%

Вычисление высот при помощи модели BUOYANT проводилось дважды: для TOTAL FRP и  $\max$  FRP. Результаты сопоставления вычислений и данных измерений представлены на рис. 3 и 4. Следует уточнить, что величина FRP влияет лишь на один входной параметр – поток массы источника.

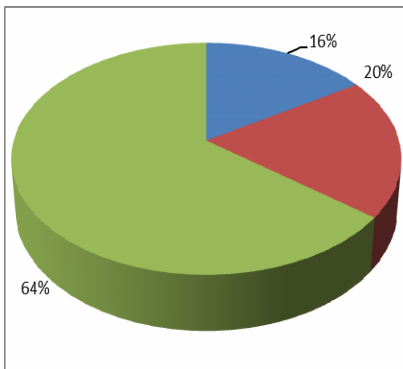


Рис. 3. Процентное соотношение результатов сопоставления высот вычисленных на модели BUOYANT при использовании  $\max$  FRP: внутри диапазона погрешности MISR – 64%, занижение – 16%, завышение высот – 20%

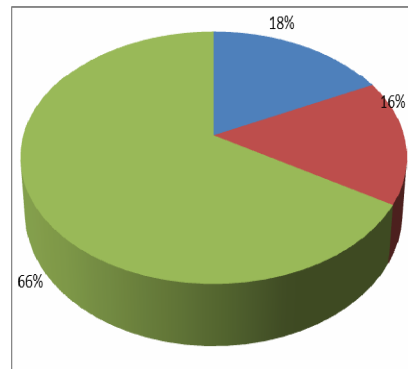


Рис. 4. Процентное соотношение результатов сопоставления высот вычисленных на модели BUOYANT при использовании TOTAL FRP: внутри диапазона погрешности MISR – 66%, занижение – 18%, завышение высот – 16%



Однако надежность оценки для индивидуального пожара может быть довольно низкой. Например, из спутниковых данных трудно сказать зарождающийся ли это пожар, либо уже затухающий, что тоже может быть немаловажным.

Итак, конечная высота подъема струи дыма зависит от множества факторов: типа горящей подстилающей поверхности (луг или лесной массив), запаса «топлива» и метеорологических условий. Все эти факторы из-за неизбежных погрешностей добавляют сложность в подсчет высоты подъема дымовой струи, проведение сравнительного анализа и выявление какого-либо рода закономерностей.

Сравнение результатов вычислений однозначно говорит в пользу использования BUOYANT-а. Однако столь «неудачные» показатели вычислений по более поздним формулам Бриггса отчасти связаны с тем, что в знаменатель формул добавилась скорость приземного ветра, что не может не сказываться в случаях с очень малыми скоростями. Определенно недостаточно в качестве характеристики стратификации атмосферы использовать градиент потенциальной температуры лишь на приземном уровне. В случае с пожарами, высота струи дыма которых поднимается выше пограничного слоя, необходимо учитывать стратификацию атмосферы и в свободной тропосфере.

Пожары, когда высота подъема струи дыма поднимается выше 4 км, случаются не так часто (рис. 5), наоборот, до 83 % высот лежат в пределах высот пограничного слоя земли. Тогда высота погранслоя может выступать доминантной характеристикой для большинства пожаров.

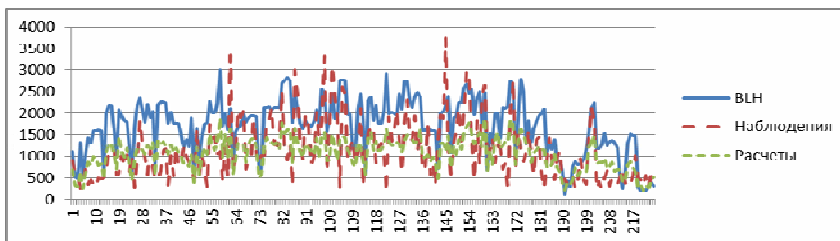


Рис. 5. Высота погранслоя, высота дыма от пожара согласно наблюдениям и расчетам. По оси абсцисс – номер случая, по оси ординат – высота в метрах.

### **Заключение**

Проведенное исследование показало, что качество оценки подъема с помощью физических моделей зависит от качества входных параметров. Однако четко просматривается возможность предсказания высоты подъема дыма от лесного пожара для прогноза качества воздуха. Для примерно двух третей из рассмотренных 400 пожаров высота подъема, рассчитанная на модели BUOYANT, находилась внутри диапазона неопределенности измерений. Расчеты по полуэмпирическим формулам Г. Бриггса, сформированными для промышленных источников, показали примерно 50 % попадание в вышеуказанный диапазон.

**Литература**

1. *Martin, M. Val; Logan, J. A.; Kahn, R. A.; Leung, F.-Y.; Nelson, D. L.; Diner, D. J.* Smoke injection heights from fires in North America: analysis of 5 years of satellite observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 10, Issue 4, 2010, pp. 1491-1510
2. *Trentmann, J., Andreae, M. O., Graf, H.-F., Hobbs, P. V., Ottmar, R. D., and Trautmann, T.* Simulation of a biomass-burning plume: Comparison of model results with observations, *J. Geophys. Res.*, 107, doi:10.1029/2001JD000410, 2002.
3. *Wofsy, S.C., Sachse, G.W., Gregory, G.L., Blake, D.R., Bradshaw, J.D., Sandholm, S.T., Singh, H.B., Barrick, J.A., Harriss, R.C.R. C., Talbot, R.W., Shipham, M.A., Browell, E.V., Jacob, D.J., and Logan, J.A.* Atmospheric chemistry in the Arctic and subarctic: Influence of natural fires, industrial emissions, and stratospheric inputs, *J. Geophys. Res.*, 97, 16731–16746, 1992.
4. *Blake, D.R., Smith, J.T.W., Chan, T.-Y., Whipple, W.J., and Rowland, F.S.* Effects of biomass burning on summertime nonmethane hydrocarbon concentrations in the Canadian wetlands, 99, 1699–1719, 1994.
5. *de Gouw, J.A., Warneke, C., Stohl, A., Wollny, A.G., Brock, C.A., Cooper, O.R., Holloway, J.S., Trainer, M., Fehsenfeld, F.C., Atlas, E.L., Donnelly, S.G., Stroud, V., and Lueb, A.* Volatile organic compounds composition of merged and aged forest fire plumes from Alaska and western Canada, *J. Geophys. Res.*, 111, D10303, doi:10.1029/2005JD006175, 2006.
6. *Fromm, M., Alfred, J., Hoppel, K., Hornstein, J., Bevilacqua, R., Shettle, E., Servranckx, R., Li, Z., and Stocks, B.* Observations of Boreal Forest Fire Smoke in the Stratosphere by POAM III, SAGE II, and Lidar in 1998, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1407–1410, 2000.
7. *Fromm, M., Bevilacqua, R., Servranckx, R., Rosen, J., Thayer, J. P., Herman, J., and Larko, D.* Pyrocumulonimbus injection of smoke to the stratosphere: Observations and impact of a super blowup in northwestern Canada on 3–4 August 1998, *J. Geophys. Res.*, 110, 1–16, doi:10.1029/2004JD005350, 2005.
8. *Damoah, R., Spichtinger, N., Servranckx, R., Fromm, M., Eloranta, E.W., Razenkov, I.A., James, P., Shulski, M., Forster, C., and Stohl, A.* A case study of pyro-convection using transport model and remote sensing data, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 173–185, 2006, <http://www.atmos-chem-phys.net/6/173/2006/>.
9. *Nikmo, J., Tuovinen, J. P., Kukkonen, J., and Valkama, I.* A hybrid plume model for local-scale atmospheric dispersion, *Atmos. Environ.*, 33, 4389–4399, 1999.
10. *Qu, J.J., W. Wang, S. Dasgupta, and X. Hao,* 2008, Active Fire Monitoring and Fire Danger Potential Detecting from Space: A Review. *Frontiers in Earth Sciences* (accepted, in press).
11. *Giglio, L., Csiszar, I., and Justice, C.O.* Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensors, *J. Geophys. Res.*, 111, doi:10.1029/2005JG000142, 2006.
12. *Sofiev M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M., Kukkonen, J.* A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data, *Atmos. Env.*, **40**, 674–685, DOI:10.1016/j.atmosenv.2005.09.069, 2006.
13. *Martin, D., Webber, D.M., Jones, S.J., Underwood, B.Y., Tickle, G.A. and Ramsdale, S.A.,* 1997. Near- and intermediate-field dispersion from strongly buoyant sources. AEA Technology Report AEAT/1388, Warrington, 277 p.
14. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>
15. <http://www-misr.jpl.nasa.gov/Mission/misrInstrument/>.

Работа выполнена при поддержке проекта IS4FIRES Академии Финляндии.