

## ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Т.С. Ермакова

## EVALUATION OF HEIGHT DISTRIBUTION OF EJECTIONS FROM FOREST FIRES USING SATELLITE DATA

T.S. Ermakova

Представлена новая методология определения высоты выбросов от лесных пожаров. Расчет проводится по аналогии с определением энергии конвективной неустойчивости CAPE. Методика была протестирована на более чем 2000 случаев для Северной Америки и Сибири. Полученные результаты сравнили с данными, полученными с инструмента MISR. Результаты вычислений по новой методике значительно точнее, чем с использованием вышеуказанных. Для двух третей случаев погрешность прогноза высоты выбросов по спутниковым измерениям не превышает 500 м, что является допустимой погрешностью. Показано, что оправдываемость прогноза для высоких пожаров, достигающих свободной тропосферы, с качественной спутниковой характеристикой «good» составляет более 80 %.

A new methodology for the estimation of forest fire ejection heights is presented. The proposed new methodology considers convective instability determination in a way similar to Convective Available Potential Energy (CAPE) computations. The new formulations are applied to a dataset collected within the MISR Plume Height Project for about 2000 fire plumes in North America and Siberia. Estimates of the new method are compared with remote-sensing observations from MISR instrument. The new method has performed significantly better than all these approaches. For two-thirds of cases, its predictions deviated from the MISR observations by less than 500 m, which is the uncertainty of the observations themselves. It is shown that the fraction of «good» predictions is much higher (>80 %) for the plumes reaching the free troposphere.

Высота подъема выбросов от пожаров является определяющим фактором продолжительности атмосферного цикла, трансформации и влияния на перемещение загрязняющих воздух веществ. Попадание выбросов от лесных пожаров в стратосферу означает их долгое присутствие в воздухе и, как следствие, существенное влияние на изменение климата – при попадании в верхние слои тропосферы происходят изменения в химическом составе атмосферы, а локальные выбросы от пожаров отрицательно влияют на качество воздуха.

Из-за ограниченной информации о лесных пожарах, их большого количества (более 50 000 в год) и некачественных оценок высоты выбросов применение даже простых моделей для оперативных вычислений едва ли возможно. В связи с этим, большинство исследователей полагают высоту выбросов постоянной величиной в области моделирования. Например, в работе [Wang, 2006] высота выбросов принята равной 1.2 км при мезомасштабном моделировании переноса дыма в Центральной Америке. Точно так же в работе [Matichuk, 2007] использовалась постоянная величина выбросов от пожаров при исследовании влияния высоты выбросов на оптическую плотность аэрозоля в проекте Southern African Regional Science Initiative (SAFARI 2000) [Swap, 2003]. Предыдущие исследования предлагают различные постоянные значения высоты выбросов от лесных пожаров от 1.2 км для областей Центральной Америки до 8 км для интенсивных канадских пожаров. Современные глобальные и региональные модели переноса часто полагают, что все выбросы остаются внутри пограничного слоя [Lamarque, 2003; Colarco 2004] либо достигают определенных высот в зависимости от мощности пожара и остаются на этих высотах [Lavoie, 2000]. Они могут перемещаться внутри тропосферы [Pfister, 2006] или в разных долях оставаться внутри и выше пограничного слоя. В действительности же высота выбросов

зависит от условий окружающей среды (устойчивости атмосферы, количества водяного пара и т. д.), потока тепла и самого размера пожара.

Например, некоторые исследования показали, что струи дыма от отдельных пожаров, как правило, не выходят за границу пограничного слоя [Trentmann, 2002]. 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. Также известны случаи, когда из-за сильной конвекции, вызванной пожаром, выбросы достигали нижних слоев стратосферы (больше 10 км), но такая пиро-конвекция не является частым регулярным событием.

Оценка высоты подъема дымовой струи от лесного пожара может быть получена из предположения, что тепловая энергия пожара затрачивается на преодоление сил плавучести и трения [Sofiev, 2011]. Данный подход игнорирует импульс поднимающегося факела, что резонно для большинства пожаров (вертикальные скорости в данном случае сравнительно невысоки). Из вышеупомянутого предположения следует, что конец подъема дымовой струи наступает, когда энергия от пожара полностью растрачивается. Этот подход похож на тот, что используется при вычислении CAPE (Convective Available Potential Energy), и полностью отличается от подхода для промышленных источников. Высота подъема дымовой струи

$$H_p = \alpha H_{ABL} + \beta \left( \frac{FRP}{P_{f0}} \right)^\gamma \exp(-\delta N^2 / N_0^2). \quad (1)$$

Значения эмпирических констант можно оценить из следующих соображений:  $\alpha$  составляет ту часть пограничного слоя  $H_{ABL}$ , которая преодолевается свободно,  $\beta$  отражает вклад, вносимый в подъем дымовой струи радиационной мощностью пожара  $FRP$  (fire radiation power),  $\gamma$  вводится для оценки

степенной зависимости от  $FRP$ ,  $\delta$  определяет зависимость от атмосферной стратификации, которая характеризуется частотой Брента-Вяйсаала  $N^2$  в свободной тропосфере.

$$P_{f0} = 10^6 \text{ Вт}, N_0^2 = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-2}.$$

Идентификация констант, используемых в уравнении (1), основывалась на рабочем комплекте данных, который был взят из спутниковых наблюдений MISR (всего 1913 случаев пожара). Для идентификации параметров применялся ранговый метод ( $J_R$ ).

В качестве основного критерия качества была принята ранговая функция как наиболее устойчивая при слабых предположениях об исходных данных. Этот метод также оказался наиболее оптимальным (ранговый метод дает наиболее узкий точечный график и наиболее высокий коэффициент корреляции):

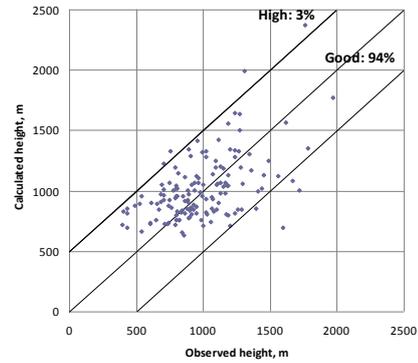
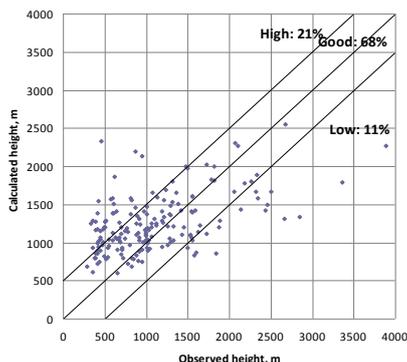
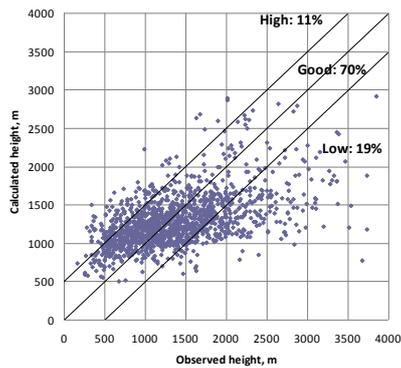
$$J_R = \sum_{i=1}^{N_{\text{пожаров}}} l\left(\left|H_p^{\text{obs}}(i) - H_p^{\text{mdl}}(i) - \Delta h\right|\right),$$

$$l(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$$

Здесь  $\Delta h$  – необходимая точность прогнозирования,  $N_{\text{пожаров}}$  – количество пожаров в конкретном комплекте данных,  $H_p^{\text{obs}}(i)$  и  $H_p^{\text{mdl}}(i)$  наблюдаемая и прогнозируемая высоты дымовых струй для  $i$ -го пожара. Такой вид статистической модели является стандартным для данных с высокой вероятностью резко отклоняющихся значений.

	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
$J_R$	0.24	169	0.35	0.1

Каждое спутниковое измерение высоты струи дыма имеет свою качественную характеристику: хорошее, удовлетворительное или плохое измерение.



По оси абсцисс – расчетная высота выбросов, по оси ординат – высота выбросов, полученная по спутниковым данным. Пожары умеренных широт и бореальной зоны, Северная Америка и Сибирь, 2007–2009 гг., 1321 лесной пожар с хорошей качественной характеристикой (а); субтропическая саванна, Африка, 2005–2006 гг., 181 лесной пожар с хорошей качественной характеристикой (б); тропические пожары, Борнео, 2006–2009 гг., 144 лесных пожара с хорошей качественной характеристикой (в).

Показательными являются корреляционные графики (рисунок), которые демонстрируют, что уравнение (1) с вышеуказанными параметрами прогнозирует примерно две трети случаев внутри допустимой погрешности 500 м.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Colarco P.R., Schoeberl M.R., Doddridge B.G., et al. Transport of smoke from Canadian forest fires to the surface near Washington, D.C.: Injection height, entrainment, and optical properties // *J. Geophys. Res.* 2004. N 109. D06203.

Lamarque J.-F., Edwards D.P., Emmons L.K., et al. Identification of CO plumes from MOPITT data: Application to the August 2000 Idaho-Montana forest fires // *Geophys. Res. Lett.* 2003. N 30. P. 1688.

Lavoue D., Lioussé C., Cachier H. et al. Modeling of carbonaceous particles emitted by boreal and temperate wildfires at northern latitudes // *J. Geophys. Res.* 2000. N 105. P. 26871–26890.

Matichuk R.I., Colarco P.R., Toon O.B. Modeling the transport and optical properties of smoke aerosols from African savanna fires during the Southern African Regional Science Initiative Campaign (SAFARI 2000) // *Ibid.* 2007. N 112. D08203.

Pfister G.G., Emmons L.K., Hess P.G. et al. Ozone production from the 2004 North American boreal fires // *Ibid.* 2006. N 111. D24S07.

Sofiev M., Ermakova T., Vankevich R. Evaluation of injection height of smoke from wild-land fires using remote sensing data // *Atm. Chem. Phys.* 2011. N 11. P. 27937–27966.

Swap R.J., Annegarn H.J., Suttles T., et al. Africa burning: A thematic analysis of the Southern African Regional Science Initiative (SAFARI 2000) // *J. Geophys. Res.* 2003. N 108. P. 1–15.

Trentmann J., Andreae M.O., Graf H.-F. et al. Simulation of a biomass-burning plume: Comparison of model results with observations // *Ibid.* 2002. N 107. P. 4013.

Wang J., Christopher S.A., Nair U.S., et al. Mesoscale modeling of central American smoke transport to the United State: 1. Topdown assessment of emission strength and diurnal variation impacts // *Ibid.* 2006. N 111. D05S17.

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия