

М.Е. Баранова, А.С. Гаврилов, К.Б. Чихачев

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОЙ СТРУИ
ОТ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ДЛЯ ПРОГНОЗА
ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ**

M.E. Baranova, A.S. Gavrilov, K.B. Tchikhatchev

**USE OF NUMERICAL MODELS OF THERMAL JETS
FROM FOREST FIRE FOR PREDICTION
OF POLLUTION OF THE ATMOSPHERE**

Излагается технология организации расчетов с использованием численной модели подъема тепловой струи от лесного пожара применительно к интерпретации оперативных данных дистанционного зондирования из космоса лесных пожаров, а также численного прогноза загрязнения атмосферы продуктами сгорания. Представлены результаты расчетов, иллюстрирующие сложный характер взаимодействия тепловых струй от очагов пожаров друг с другом и с внешним ветровым потоком.

Ключевые слова: численное моделирование, лесной пожар, эмиссия загрязняющих веществ, прогноз загрязнения атмосферы.

We present the technology organization of calculations using a numerical model of thermal recovery of the jet by a forest fire in relation to the interpretation of operational remote sensing from space of forest fires and the numerical prediction of atmospheric pollution by combustion products. The results of calculations illustrating the complex interaction of heat from the jet fires with each other and with external wind flow.

Key words: numerical modeling, forest fire, emission of pollutants, air pollution forecast.

1. Исходные данные

Используемая в настоящей работе численная модель формирования так называемых «тепловых колонок» от очагов лесных пожаров изложена в работе [1] и основывается на полных уравнениях гидротермодинамики атмосферы глубокой конвекции с приближенным описанием турбулентного режима и особенностей теплового излучения. Модель позволяет использовать в качестве исходных данных единственную доступную в настоящее время в оперативном режиме информацию – сведения об излучении в длинноволновом диапазоне, детектируемые космическими аппаратами.

В качестве одного из самых перспективных источников такого рода оперативных данных о характеристиках лесных пожаров, имеющих глобальный характер, в настоящее время следует рассматривать данные дистанционного зондирования из космоса, в частности, стандартного набора свободно распространяемых оперативных продуктов MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) на борту искусственных спутников Земли (ИСЗ) NASA Aqua и Terra [2, 3, 4].

На основе этих данных в оперативном режиме можно приближенно оценивать местоположение и яркостную температуру очагов горения, причем местоположение дается с точностью до размера проекции пикселя матрицы приемника излучения на ИСЗ (около 1 км на местности). Между тем, как показывают многочисленные наблюдения на местности (например, [5]), очаг активного горения в лесном пожаре представляет сравнительно узкую полосу шириной не более 100–200 м (так называемый фронт пожара), распространяющуюся по приземному ветру. При этом, если для низовых пожаров, которые, по данным [5], наблюдаются в 98 % всех случаев, эта скорость составляет несколько метров в минуту, то верховые пожары (около 1,5 % всех случаев) имеют скорость распространения свыше 50 м/мин.

Специальный анализ спутниковых данных, проведенный в работе [6], показал, что такого рода локальные очаги горения формируются на местности в некоторые группы, связанные, вероятно, с общим источником возгорания. В этой же работе предложен и метод их группировки, основанный на процедурах кластерного анализа.

Существенно, что такого рода очаги располагаются в непосредственной близости и, безусловно, оказывают динамическое и термодинамическое воздействие друг на друга. Кроме того, дымовые шлейфы от наветренных очагов внутри одной группы приводят, в итоге, к экранированию излучения, детектируемого из космоса, от других очагов. Из вышеизложенного следует, что такого рода группы (далее – кластеры) должны рассматриваться в качестве единого источника выброса продуктов сгорания, причем разработанная в [1] модель должна применяться непосредственно ко всему кластеру.

Весьма грубая информация о местоположении и яркостной температуре очагов горения, детектируемые приемниками ИСЗ, приводит к необходимости некоторой схематизации в привязке этих очагов к местности. При этом будем исходить из предположения, что линейный размер очага горения L_F примерно совпадает с размером пикселя, фронт пожара распространяется по направлению приземного ветра, а ширина этого фронта L_N представляет собой параметр, который требуется подбирать из сопоставления результатов расчетов с экспериментом (рис. 1).

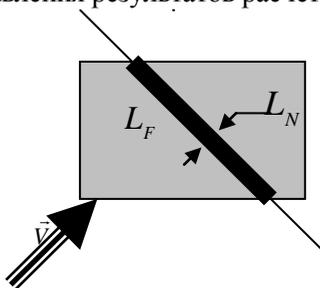


Рис. 1. Схематическое представление очага горения шириной L_N с длиной L_F , определяемой путем сечения прямоугольного пикселя прямой, ориентированной перпендикулярно направлению приземного ветра

2. Результаты расчетов для изолированного очага горения

Численные эксперименты с изолированным очагом горения преследовали, в первую очередь, цель исследовать чувствительность решения к вариациям внешних параметров. Одна из первых задач здесь состояла в оценке суммарной эмиссии от очага горения суммы твердых аэрозолей – сажевых частиц дыма. В модели [1] величина оценивается по теплотворной способности сгораемой древесины на основе расчетных значений турбулентного потока тепла от очага горения, зависящего, в свою очередь, от его температуры и скорости ветра в приземном слое. Расчетные зависимости этой величины от времени суток, скорости ветра и яркостной температуры, детектируемой приемником ИСЗ, представлены на рис. 2.

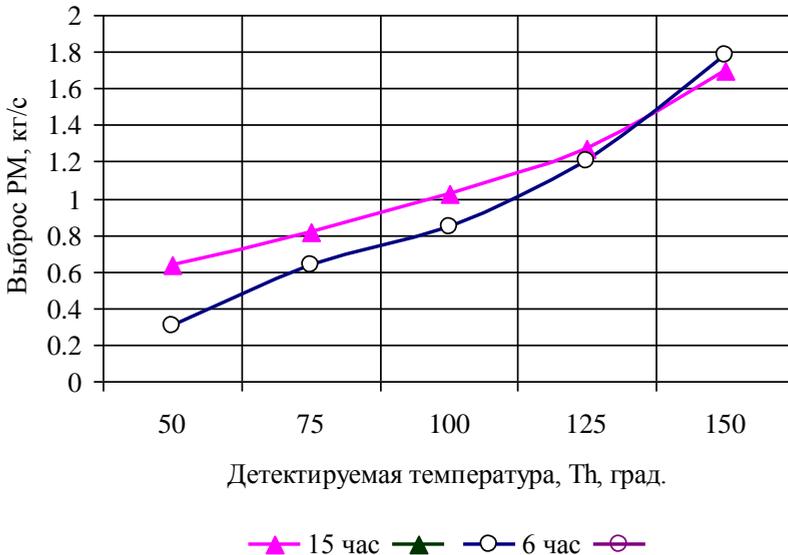


Рис. 2. Расчетные зависимости суммарного выброса (Кг/с) по группе аэрозолей PM 2.5 и PM10 от очага горения для различного времени суток и скорости ветра от яркостной температуры, детектируемой приемниками ИСЗ для $L_F = 1000$ м и $L_N = 200$ м

Пространственное распределение эмиссии аэрозолей во многом совпадает с распределением поля яркостной температуры. Примеры таких полей для условий утренней инверсии и дневной конвекции представлены на рис. 3, а на рис. 4 – вертикальные разрезы поля вертикальной скорости ветра и температуры для условий дневной конвекции.

Как можно видеть из представленных рисунков, эмиссия аэрозолей (сажевых частиц) достаточно быстро возрастает с ростом детектируемой датчиками ИСЗ яркостной температуры, увеличиваясь от значений около 0,5 кг/с при температуре 50 °С до 1,8 кг/с – при температуре 150 °С, причём максимальные значения этих величин достигаются на наветренной кромке фронта пожара.

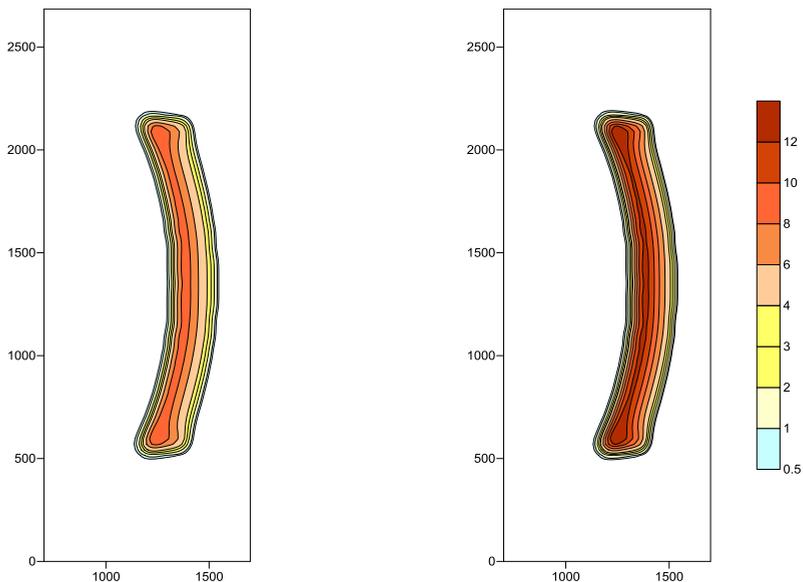


Рис. 3. Примеры расчетных полей эмиссии суммы аэрозолей PM2.5, PM10 (г/м³ ч) для относительного перегрева очага горения 200 °С в 6 ч утра (слева) и в 15 ч (справа) при скорости приземного ветра 4 м/с для $L_F = 1000$ м и $L_N = 200$ м

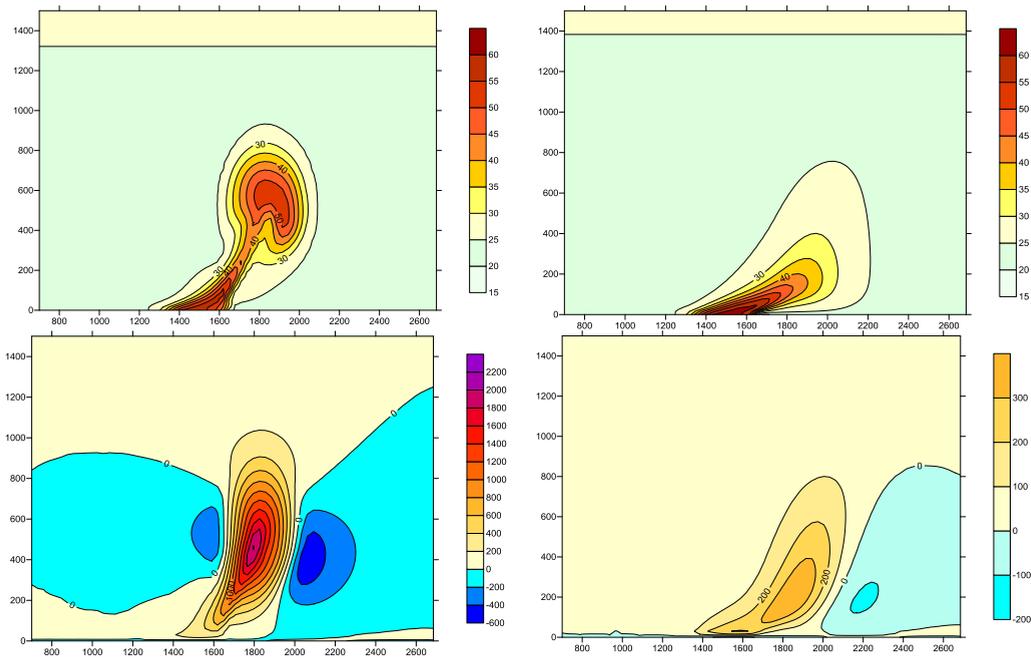


Рис. 4. Примеры расчетных полей температуры (°С, сверху) и вертикальной скорости (см/с, снизу) в форме вертикальных разрезов через центр очага горения вдоль направления ветра: 15 ч, ветер 2 (слева) и 4 (справа) м/с, $L_F = 1000$ м и $L_N = 200$ м

Причина этого вполне очевидна: при натекании холодного воздуха на очаг возгорания наблюдаются максимальные отрицательные вертикальные градиенты температуры и, следовательно, максимальные по величине турбулентные потоки отводимого в атмосферу тепла от сгорания топлива, а значит, возрастает и эмиссия загрязняющих веществ.

Существенно, что появление аэрозольного факела от очага пожара значительно ослабляет и интенсивность уходящего теплового излучения, а значит при этом снижается и яркостная температура очага пожара, детектируемая приемником ИСЗ. На рис. 5 приведен пример расчета подобного «дефицита температуры», который для этого случая составляет около 30% от аналогичной яркостной температуры на уровне горения в приземном слое.

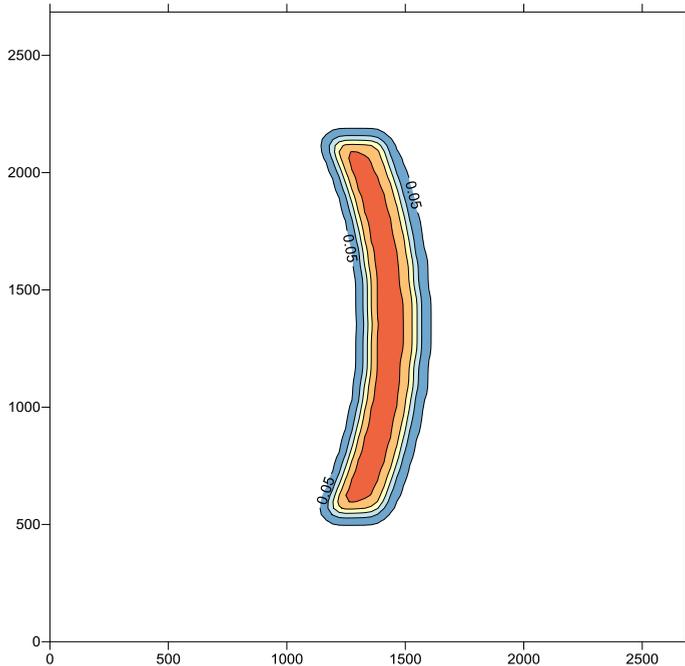


Рис. 5. Расчетное поле разности значений дефицита температуры $T_0 - T_H$, восстановленного с использованием численной модели [1] поля температуры в приземном слое T_0 и яркостной температуры уходящего излучения T_H (время 15 ч, скорость ветра 2 м/с, $T_H = 200^\circ\text{C}$)

Результаты тестовых расчетов зависимости упомянутого выше дефицита температуры от значений детектируемой приемниками ИСЗ яркостной температуры для условий утренней инверсии (6 ч) и дневной конвекции (15 ч) приведены на рис. 6. Из него, в частности, следует, что в дневное время эти величины заметно выше. Причина здесь состоит в том, в дневное время, при конвекции, оптическая толщина аэрозольного облака непосредственно над очагом горения оказывается несколько выше из-за интенсивного выноса вверх продуктов сгорания конвективными струями.

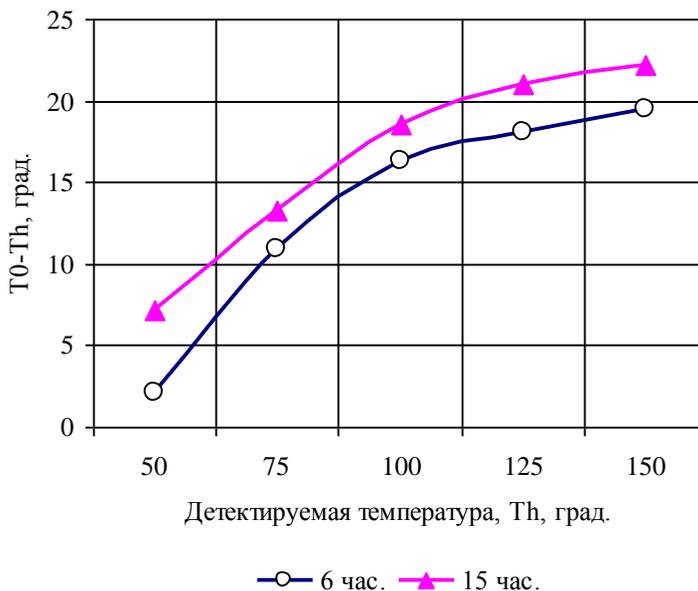


Рис. 6. Расчетная зависимость максимальных значений дефицита температуры $T_0 - T_h$ от яркостной температуры уходящего излучения T_h для утренней инверсии (6 ч) и дневной конвекции (15 ч) для скорости ветра 4 м/с, $L_F = 1000$ м и $L_N = 200$ м

3. Результаты расчетов для очагов горения, объединенных в кластер

Взаимное влияние двух соседних очагов пожаров проявляется, прежде всего, в объединении возникающих над каждым из них конвективных колонок в единую структуру, способствующую подъему факела выброса от наветренного очага каждого кластера за счет восходящих движения воздуха, формируемых другими (подветренными) очагами. Об этом наглядно свидетельствует пример расчета для двух рядом расположенных очагов с теми же параметрами, которые были рассмотрены выше (рис. 7).

Прежде всего, попадание факела от наветренного очага горения (на рисунке слева) в поле восходящих движений от подветренного очага (на рисунке — справа) приводит к значительному дополнительному подъему аэрозольного факела, тем большему, чем меньше средняя скорость ветра.

При этом одновременно, возникает дополнительная экранировка излучения такого рода подветренных очагов за счет аэрозольных факелов от очагов, расположенных вверх по потоку, так что яркостная температура уходящего излучения (рис. 8) на подветренном очаге оказывается ниже, чем на наветренном. Этот эффект подтверждается характером детектируемых датчиками ИСЗ яркостных температур отдельных очагов (пикселей) внутри одной группы (кластера), когда на фоне остальных пикселей отчетливо выделяется один из пикселей на наветренной границе этого кластера.

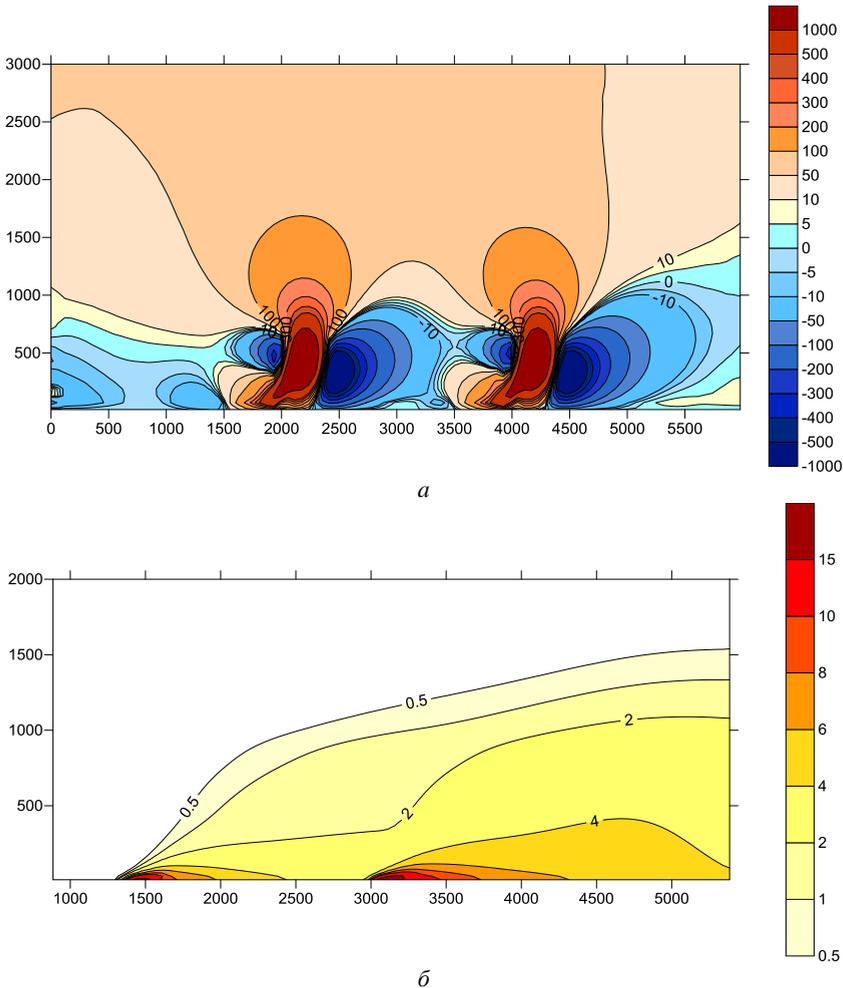


Рис. 7. Примеры расчета вертикальных сечений вдоль направления ветра для двух очагов пожаров ($L_F = 1000$ м, $L_N = 200$ м, $T_0 = 200$ °С, $U = 4$ м/с) полей вертикальной скорости ветра (а), см/с, и концентрации суммы аэрозолей 2,5,10РМ (б), мкг/м³

Как видно из рис. 8, уходящее излучение, фактически регистрируемое детекторами ИСЗ для второго (по направлению ветра) очага горения, оказывается несимметричным. Причиной этого является поворот ветра с высотой в нижней атмосфере вправо за счет действия силы Кориолиса с одновременным поворотом и аэрозольного факела от первого очага, так что его северная половина экранируется в меньшей степени, чем южная.

На рис. 9 приведен пример уже полной композиции множественной структуры очагов горения одного кластера, восстановленной указанным способом путем обработки данных ИСЗ за 17 июля 2011 г. с координатами 63,6 град. с.ш. и 122,88 град. в.д.

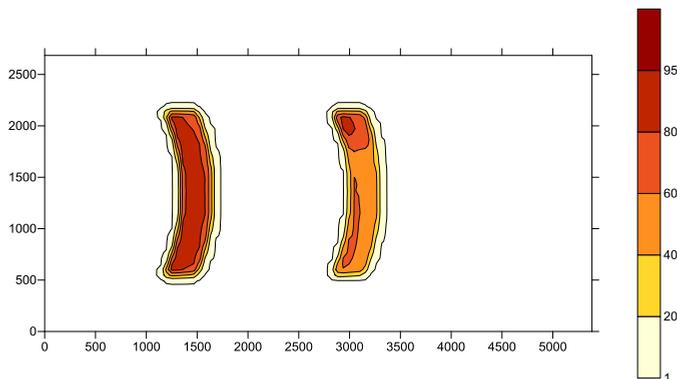


Рис. 8. Расчетное поле значений относительного дефицита температуры $(T_0 - T_H)/T_H$ (в процентах) для двух однотипных очагов горения, расположенных вдоль направления приземного ветра (для условий рис. 7)

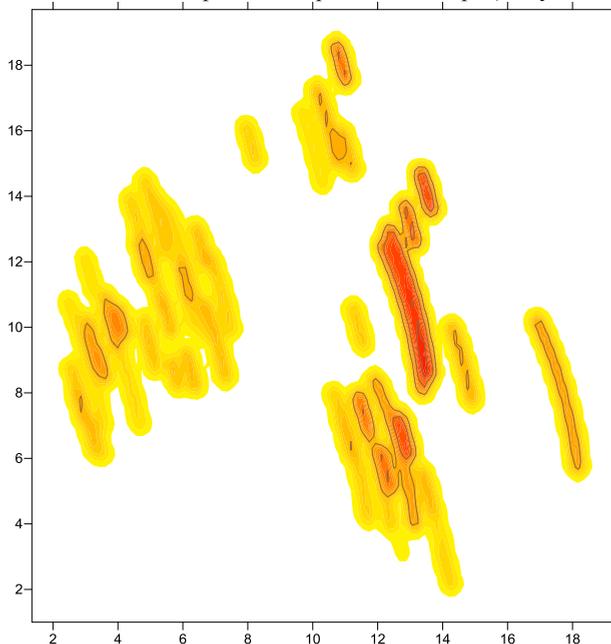


Рис. 9. Пример яркостной температуры кластера очагов горения по данным ИСЗ (63,6 с.ш. 122,88 в.д.) по данным на 17 июля 2011 г.

Цифры по осям – значения расстояний по горизонтали в километрах

Пример суммарного расчетного поля концентрации суммы аэрозолей PM2.5, 10 (дымовой факел) от нескольких естественных кластеров очагов горения приведен на рис. 10.

Таким образом, предложенная технология оказывается весьма эффективной для решения проблемы интерпретации оперативных данных дистанционного зондирования из космоса лесных пожаров и последующего краткосрочного численного прогноза загрязнения атмосферы продуктами сгорания.

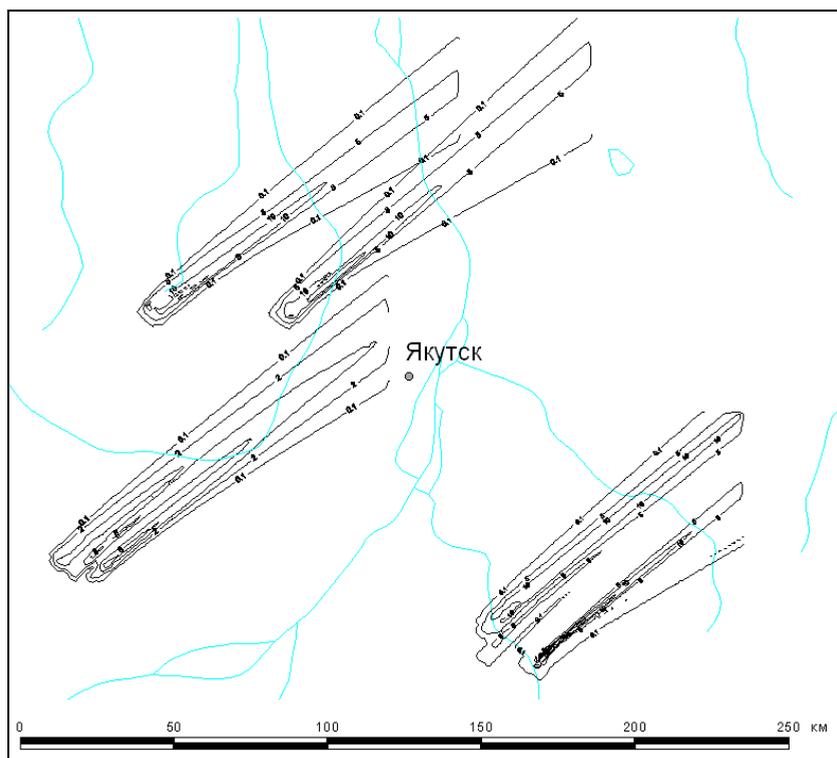


Рис. 10. Поле приземной концентрации суммы аэрозолей PM_{2.5}, 10 (мкг/м³) от нескольких естественных кластеров очагов горения в районе г. Якутска по данным на 17 июля 2011 г.

Литература

1. *L. Giglio, et al.* Algorithm Technical Background Document. MODIS fire products. Version 2.3, [Text] / L. Giglio 1 October 2006.
2. *Ichoku C., and Y.J. Kaufman.* A method to derive smoke emission rates from MODIS fire radiative energy measurements IEEE [Text] / Ichoku C., and Y.J. Kaufman. *Trans. on Geosc. & Rem. Sens.* 2005 (11), 43, 2636-2649.
3. *Sofiev, M., Vankevich, R., Lotjonen, M., Prank, M., Petukhov, V., Ermakova, T., Koskinen, J., and Kukkonen, J.*: An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting, [Text] / M. Sofiev, R. Vankevich, M. Lotjonen, M. Prank, V. Petukhov, T. Ermakova, J. Koskinen, and J. Kukkonen, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 6833-6847, doi:10.5194/acp-9-6833-2009, 2009.
4. *Щетинский Е.А.* Охрана лесов от пожаров. Ч. 1. Лесные пожары и охрана лесов, Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства, г. Пушкино, 1998.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» по теме: «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области технологий мониторинга и прогнозирование состояния атмосферы при лесных и торфяных пожарах» (контракт № 16.515.11.5029 от 12 мая 2011 г.).