

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ФГБОУ ВПО  
«Российский государственный гидрометеорологический университет»  
(РГГМУ)

---

На правах рукописи  
УДК 551.509.68:551.501.86

**Ермакова Татьяна Сергеевна**

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

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВПО «Российский государственный гидрометеорологический университет»

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук, профессор  
Смышляев Сергей Павлович

**Научный консультант:** кандидат технических наук, доцент  
Софиев Михаил Александрович

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук, профессор  
Егоров Александр Дмитриевич

доктор физико-математических наук, профессор  
Генихович Евгений Львович

**Ведущая организация:** Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова

Защита диссертации состоится 17 ноября 2011 г. в 15 часов 30 мин на заседании диссертационного совета Д.212.197.01 при Российском Государственном Гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, г.Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского Государственного Гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан « 17 » октября 2011 г

Ученый секретарь диссертационного совета  
Доктор географических наук, профессор



А. И. Угрюмов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность темы

Пожар является одним из самых серьезных факторов, способных изменить облик ландшафта, а также культурной среды. Эти изменения могут быть очень глубокими, по сути катастрофическими, а могут быть началом или предпосылкой нового цикла развития ландшафта.

Пожары, применяемые для расчистки территории в сельском хозяйстве, а также лесные пожары, вызванные поджогами и молнией, играют важную роль в экосистеме Земли. Помимо их роли в углеродном цикле земной биосферы, пожары представляют собой очень значительный источник выбросов в атмосферу оксидов азота (NOX), летучих органических веществ (VOC, SVOC), оксидов углерода (COX), оксида серы (SO<sub>2</sub>) и метана (CH<sub>4</sub>). Указанные выбросы вносят серьезный вклад в глобальный цикл различных газовых примесей и аэрозолей.

Высота подъема дымовой струи от пожаров является определяющим фактором, влияющим на продолжительность атмосферного цикла, трансформацию и перенос продуктов горения. В частности, вынос аэрозоля и многоатомных газов в стратосферу означает их долгое присутствие в атмосфере Земли и как следствие существенное влияние на изменение климата; наличие продуктов горения в верхних слоях тропосферы приводит к изменениям в ее химическом составе; локально выбросы от пожаров отрицательно влияют на качество приземного воздуха.

Определение высоты выбросов от лесных пожаров имеет фундаментальное значение для переноса дымовой струи. При горении биомассы выделяется большое количества тепла, которое создает сильные вертикальные токи. Эти вертикальные потоки значительно влияют на распределение малых газовых примесей через их прямой и быстрый перенос в свободную тропосферу, а иногда и в стратосферу. Большинство

исследователей полагают высоту выбросов постоянной величиной в их области моделирования. Предыдущие исследования предлагают различные значения высоты выбросов от лесных пожаров, начиная от 1,2 км для областей Центральной Америки до 8 км для интенсивных Канадских пожаров. В действительности же высота выбросов зависит от условий окружающей среды (от устойчивости атмосферы, количества водяного пара и скорости ветра), потока тепла и самого размера пожара.

Существующие системы мониторинга пожаров и оперативного прогнозирования распространения продуктов горения часто содержат крайне грубые оценки высоты подъема дымовой струи. Абсолютная ошибка вычисления может составлять несколько километров.

### **Цель диссертационного исследования**

Решение проблемы оценки высоты подъема дымовой струи от лесных пожаров в глобальном масштабе, используя интегральные характеристики основных физических процессов и данные дистанционного зондирования.

### **Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:**

- создание комплекта модельных оценок метеорологических характеристик в районе пожара;
- разработка нового полуэмпирического метода оценки высоты подъема дымовой струи от лесных пожаров;
- идентификация параметров нового метода расчета высоты подъема примесей от лесных пожаров;
- оценка эффективности нового метода в сравнении с существующими методологиями оценок высоты подъема дымовой струи от

высокотемпературных источников в приложении к лесным пожарам;

- долгопериодное моделирование вертикального распределения выбросов от лесных пожаров в глобальном масштабе.

### **Научная новизна**

В процессе анализа проблемы, разработки нового метода, его сравнения с существующими подходами и применения для создания глобальных оценок вертикального профиля выбросов были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработан новый метод оценки высоты выброса от лесного пожара, основанный на спутниковых характеристиках пожара и модельных оценках метеорологической ситуации. Эффективность данного метода позволяет применять его для оперативного мониторинга.
2. Показана взаимосвязь нового метода с существующими подходами.
3. Продемонстрирована более высокая оправдываемость расчетов высоты подъема дымовой струи новым методом в сравнении с другими подходами.
4. Продемонстрирована доминирующая роль интегральных параметров атмосферы и пожара, таких как высота пограничного слоя атмосферы, и мощность пожара, в определении высоты подъема дымовой струи.
5. Впервые получены оценки характерного профиля распределения выбросов от пожаров в глобальном масштабе.

### **Положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Метод расчета высоты подъема дымовой струи от лесного пожара, использующий данные спутникового мониторинга и расчеты численных моделей прогноза погоды;
2. Результаты анализа качества нового метода расчета высоты подъема выбросов от лесных пожаров в сравнении с существующими подходами;
3. Оценки глобального распределения высот выбросов от лесных пожаров, основанные на результатах долгосрочного моделирования подъема дымовой струи.

### **Обоснованность и достоверность результатов**

Обоснованность и достоверность результатов работы подтверждена сравнением с контрольным комплектом данных, сравнением с другими методами и оценками, полученными в независимых исследованиях.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость заключается в том, что впервые продемонстрировано различие вклада наиболее важных физических процессов в подъем выбросов от лесных пожаров по сравнению с подъемом выбросов от промышленных источников.

Научный интерес также представляет обзор существующих моделей, методик и формул, адаптированных и применимых для расчета высоты выбросов от лесных пожаров.

Практическую ценность представляет созданная в процессе работы глобальная база данных по высотам выбросов от лесных пожаров. Также

может быть рекомендовано к использованию среднее распределение высот выбросов от лесных пожаров.

Внедрение новой методологии расчета подъема дымовой струи в System for Integrated modeling of Atmospheric Composition (SILAM) позволит проводить оперативный расчет высот выбросов от лесных пожаров в реальном времени. И как следствие, становится возможным прогнозирование влияния выбросов от лесных пожаров на обще-экологическую обстановку.

### **Личный вклад автора**

Все положения, выносимые на защиту, основанные на результатах исследований, проведены автором самостоятельно. Выбор подходов к решению задач, разработка метода и алгоритм расчетов проведены автором совместно с учеными из Финского метеорологического института (ФМИ) и Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ).

### **Апробация работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

на рабочих семинарах в Финском метеорологическом университете (январь-2010, сентябрь-2010, апрель-2011).

Annual symposium EU FP-7 MACC (Monitoring of atmospheric composition and climate), Utrecht (май-2011)

Joint-Workshop Global Emission Inventory Activity (GEIA) and EU FP-7 PEGASOS project (июнь-2011)

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 (Государственный контракт №16.515.11.5029)

**Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, пяти основных глав и заключения. Объем работы 90 страниц, в том числе 10 рисунков и 2 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 100 наименований.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор, посвященный существующим моделям, методологиям и формулам, применяемых в расчетах высоты выбросов от лесных пожаров.

Определение высоты выбросов от лесных пожаров имеет фундаментальное значение для переноса дымовой струи. При горении биомассы выделяется большое количества тепла, которое создает сильные вертикальные токи. Эти вертикальные потоки значительно влияют на распределение малых газовых примесей через их прямой и быстрый перенос в свободную тропосферу, а иногда и в стратосферу. Разные модели оценивают влияние горения биомассы по моделированию угарного газа и аэрозоля в свободной тропосфере. Однако большинство исследователей полагают высоту выбросов постоянной величиной в их области моделирования. Например, Wang et al. обозначил высоту выбросов равной 1.2 км при мезомасштабном моделировании переноса дыма в Центральной Америке. Точно так же и Matichuk et al. использовал постоянную величину выбросов от пожаров, исследуя влияние высоты выбросов на оптическую плотность аэрозоля в проекте Southern African Regional Science Initiative (SAFARI 2000). Предыдущие исследования предлагают различные значения высоты выбросов от лесных пожаров, начиная от 1,2 км для областей Центральной Америки до 8 км для интенсивных Канадских пожаров. В действительности же высота выбросов зависит от условий окружающей среды (от устойчивости атмосферы, количества водяного пара и скорости ветра), потока тепла и самого размера пожара. Вывод: использование какой-либо постоянной величины в качестве высоты выбросов в глобальных моделях не является верным.

Следовательно, необходимы методы для более аккуратного и точного определения высоты выбросов.

**Во второй главе** представлена постановка задачи.

Задача: разработать метод расчета высоты подъема дымовой струи от лесного пожара с учетом основных физических процессов на основе спутниковой информации, используя доступные интегральные характеристики, с последующим применением для расчета характерного вертикального профиля аэрозолей.

Существует конкретная необходимость в улучшении определения количества выбросов от пожаров ретроспективно. Кроме того, есть также необходимость установления высококачественной системы наблюдения за пожарами в реальном времени, с целью включения пожарных выбросов в оперативные системы прогнозирования.

До использования в глобальных системах моделирования, спутниковые данные о пожарах предварительно должны быть гомогенизированы, проверены на наличие ошибок, и преобразованы в оценки выбросов. Поэтому требуются дополнительные спутниковые данные о земной поверхности (вегетационный покров, влажность почвы, температура и так далее). Эти процедуры возможно выполнить в процессе ассимиляции данных, когда данные наблюдений объединяются с инструментами моделирования, что часто применяется в численном прогнозировании погоды. В настоящее время созданы такие системы ассимиляции пожарных данные (САПД), как например GFAS (Global Fire Assimilation System) и FAS (Fire Assimilation System).

Определение правильной высоты выбросов является основным источником ошибок в любой САПД. Так, например, оптическая плотность аэрозоля, которая имеется в спутниковых данных, вертикально интегрирована. Но вертикального распределения аэрозоля в спутниковых данных нет. Значит, он должен быть определен с использованием метеорологических данных и высоты выбросов.

В **третьей главе** рассматривается качество имеющейся информации как спутниковой, так и метеорологической, необходимой для проведения данной работы; приводится описание спутниковых данных, использованных в исследовании; описание качества оценок данных инструментов MISR и MODIS. Также приводится описание комплектов метеорологических данных, для расчетов по новому методу и существующим методикам, и методы получения этих комплектов. Представлено описание метеорологических характеристик, применяемых в полуэмпирической формуле для расчета высоты выбросов от лесных пожаров, с последующим выводом данной формулы. Приведены статистические модели задачи идентификации и оптимальные методы определения параметров для новой методики расчета, а также представлены оптимальные значения данных параметров по различным статистическим моделям шума. Рассмотрено качество идентификации параметров – приведены графики и диаграммы, построенные по результатам вычислений с использованием новой методики.

Для настоящего исследования были использованы данные с инструмента MISR и MODIS по лесным пожарам 2007 и 2008 годов, имеющих место на территории Соединенных Штатов Америки, Сибири и Канады. Инструменты MISR и MODIS 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.

Погрешность измерения высоты струи дыма от пожара со спутника может составлять плюс-минус 500 метров. Если струя дыма оцифровывалась с неверным направлением ветра или же дым подвержен турбулентности, которая приводит к быстрому изменению ветра, тогда чем больше погрешность в скорости и направлении ветра, там данные по

высотам менее точны, Соответственно все расчетные высоты, которые попали в амплитуду данной погрешности, считаются «точными» результатами вычислений.

Для данного исследования был необходим ряд метеорологических величин. Эти величины были условно поделены на три комплекта данных:

- I. комплект данных для расчета высоты выбросов от лесных пожаров по новой методике;
- II. комплект дополнительных данных, которые необходимы для расчета высоты выбросов по существующим методикам;
- III. комплект данных с характеристиками пожара

Для первого комплекта необходимы: высота пограничного слоя и частота Брента-Вяйсяла. Для второго: приземные значения температуры, давления и скорости ветра, динамическая и вертикальная скорости, классы устойчивости атмосферы по Пасквиллу. Для третьего – температуры и радиус пожара.

Данные для первого и второго комплекта были посчитаны на модели SILAM по данным ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts).

В данном исследовании были рассмотрены пожары, имевшие место на территории Северной Америки с 3 марта по 25 ноября 2007 года, с 5 июня по 27 июля 2008 года на территории Канады и с 2 марта по 30 июля 2008 года на территории Сибири. Счет модели осуществлялся с шагом в 1 градус и начинался с первого дня каждого периода. Данные на выходе выводились через каждые три часа: 00, 03, 06, 12, 15, 18, 21, так как пролет спутника над территорией Северной Америки осуществляется в дневные часы, а над территорией Сибири в ночные часы UTC.

Пограничный слой атмосферы учитывает ряд метеорологических параметров, например, устойчивость атмосферы у земной поверхности,

температуру воздуха и скорость ветра, которые важны как фоновые характеристики при подъеме выбросов от лесного пожара.

Высота выбросов естественно зависит от характеристик самого пожара, получение которых с достаточной точностью практически невозможно. FRP – максимально доступная и физически обоснованная характеристика пожара, которая, скорее всего уже включает в себя все необходимые данные о пожаре. Исследования, проведенные Сухининым, показали, что FRP прямо пропорциональна количеству сгоревшего топлива за секунду. Также ряд исследований проведенных в этой области подтверждает, что лишь дым от мощных лесных пожаров, с большим значением FRP может достичь верхних слоев тропосферы.

Логично предположить, что выбросы, поднимающиеся значительно выше пограничного слоя атмосферы зависят от стратификации атмосферы на высоте выше пограничного слоя. Исследования в области пиро-конвекции показали, что такие высокие выбросы возможны лишь в случае благоприятных метеорологических условий, например, при прохождении фронта, характеризующегося крайне неустойчивой атмосферой и наличием конвективных токов.

Оценка подъема дымовой струи от лесного пожара может быть получена из предположения, что тепловая энергия пожара затрачивается на преодоление сил плавучести и трения. Данный подход игнорирует импульс поднимающегося факела, что резонно для большинства пожаров (вертикальные скорости в данном случае сравнительно невысоки). Исходя из выше обозначенного предположения, конец подъема дымовой струи наступает, когда энергия от пожара полностью растрачивается. Этот подход похож на тот, что используется при вычислении CAPE(ConvectiveAvailablePotentialEnergy) и полностью отличается от подхода для дымовых труб. CAPE часто используют для описания глубокой конвекции.

Для качественного анализа зависимостей, рассмотрим только два процесса: преодоление стратификации атмосферы и расширение дыма вследствие вовлечения окружающего воздуха.

Пусть энергия, выпущенная пожаром в воздух объемом  $V$  у поверхности, есть  $E_0$ . Тогда плотность избытка энергии в сравнении с невозмущенным окружающим воздухом  $e_0$  будет:

$$e_0 = \frac{E_0}{V} = \frac{E_0}{S_f w \tau} = \frac{P_f}{S_f w} \quad (3.1)$$

где  $w$  – начальная вертикальная скорость дыма,  $\tau$ - период времени, в течение которого объем воздуха взаимодействует с пламенем,  $S_f$ - площадь пожара, и  $P_f$ - энергия пожара, выделившаяся в воздух в форме явного и скрытого тепла.

Изменение избытка энергии  $e(z)$  во время подъема может быть записано в следующем виде:

$$\frac{de}{dz} = -c_p \rho \frac{d\theta}{dz} - \frac{E_0}{V^2} \frac{dV}{dz} \quad (3.2)$$

Первый член уравнения описывает работу против сил плавучести, в то время как второй отражает расширение дымовой струи. Предполагая постоянной горизонтальную диффузивность  $K_{hor}$ , получаем линейный рост  $S$  с высотой [52]:

$$\frac{de}{dz} = -\frac{c_p \rho \theta}{g} N^2 - \frac{6\pi K_{hor} / w}{(S_f + 6\pi z K_{hor} / w)^2} P_f \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) должно быть проинтегрировано со следующим граничным условием  $e(0)=e_0$ . Конечный подъем дымовой струи  $H_p$  определяется при  $e(H_p)=0$ .

Если все параметры уравнения (3.3) предположить постоянными, то замена переменной  $z \rightarrow \xi = S/S_f$  (нормированная площадь поперечного сечения дымовой струи) с последующим интегрированием даст нам квадратное уравнение для  $\xi_p(z=H_p)$ :

$$-\frac{C_p \rho_a \theta S_f w N^2}{6\pi g K_{hor}} \xi_p^2 + \frac{P_f}{w} \xi_p + \frac{P_f}{w} = 0 \quad (3.4)$$

$$\zeta_p = 1 + \frac{6\pi H_p K_{hor}}{S_f w} \quad (3.5)$$

Решением уравнения (3.4) будет:

$$\xi_p = \frac{P_f}{AN^2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2AN^2}{P_f}} \right), \quad A = \frac{c_p \rho_a \theta w^2 S_f^2}{3\pi g K_{hor}} \quad (3.6)$$

Уравнение (3.9) могут быть обращено в общую формулу для расчета высоты выбросов от лесного пожара  $H_p = f(P_f, N, \dots)$  с несколькими неизвестными константами, которые возможно определить эмпирически.

Во-первых, переменная  $A$  берется в качестве нормализующей константы. Она включает в себя все параметры, информация о которых не может быть доступной в реальном времени. Значение данной константы можно грубо оценить, принимая  $S_f \sim 10^3 \text{ м}^2$ ,  $w \sim 1 \text{ м с}^{-1}$ ,  $K_{hor} \sim 1 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . Тогда  $A \sim 4 \cdot 10^9 \text{ Дж с}$ . Эта нормализация формально может быть записана как отношение стандартной мощности огня  $P_{f0}$  и частоты Брента-Вяйсяла  $N_0$ :

$$A = \frac{P_{f0}}{N_0^2}, \quad P_{f0} = 10^6 \text{ W}, \quad N_0^2 = 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-2} \quad (3.7)$$

Во-вторых, энергия  $P_f$ , затрачиваемая на нагрев воздуха, и FRP, полученная из спутниковых наблюдений и линейно связанная с сожженной биомассой, следовательно, линейно связаны друг с другом. Таким образом, возможна замена  $P_f \rightarrow FRP$ .

В-третьих, для стандартных метеорологических величин и параметров пожара  $AN^2 / P_f$  меняется от 1 до 100. Отсюда, в большинстве случаев высота выбросов пропорциональна FRP в степени 0.5. Это верхний предел, так как дополнительные потери на трение и изменение атмосферных и пожарных параметров (например, постепенное замедление подъема и нелинейное расширение дымовой струи с высотой) приведут к меньшей степени  $\gamma < 0.5$ .

В-четвертых, частота Брента-Вяйсяла – внешний параметр относительно пожара и значительно меняется с высотой. Следовательно, единая переменная  $P_f / N^2$  в уравнении (3.6) не может оставаться

постоянной. Так же,  $1/N^2$  может вызвать проблемы, когда стратификация не является явно устойчивой и  $N^2 \sim 0$ . Поэтому следует рассматривать эти переменные отдельно. Во избежание проблем с  $N^2 \ll 0$  внутри пограничного слоя (ABL), возьмем значение Брента-Вяйсяла в свободной тропосфере  $N = N_{ft}(z \approx 2H_{abl})$ , но позволим преодолевать часть пограничного слой «свободно», добавив эту часть от высоты пограничного слоя  $H_{abl}$  к  $H_p$ . Вместо  $N_0^2/N^2$  будем использовать экспоненциальную функцию  $\exp(-N^2/N_0^2)$ , которая для небольших значений  $N^2$  ограничит рост  $H_p$  замещением  $1/N^2$  на  $1/(1+N^2/N_0^2)$ , и в тоже время для больших значений  $N^2$ , она быстро достигает нуля, что характерно в случае очень устойчивой стратификации.

Таким образом, конечный вид формулы сводится к следующему виду:

$$H_p = \alpha H_{abl} + \beta \left( \frac{FRP}{P_{f0}} \right)^\gamma \exp(-\delta N_{FT}^2/N_0^2) \quad (3.8)$$

где  $\alpha$  составляет ту часть пограничного слоя, которая преодолевается свободно,  $\beta$  - масштабирование относительно  $A$  в уравнении (3.7),  $\gamma$  вводится для оценки степенной зависимости от  $FRP$ ,  $\delta$  определяет зависимость от атмосферной стратификации в свободной тропосфере. Их примерный диапазон будет:

$$\alpha < 1; \quad \beta > 0; \quad \gamma < 0.5; \quad \delta \geq 0$$

Идентификация констант, используемых в уравнении (3.8), основывалась на рабочем комплекте данных, который был взят из спутниковых наблюдений MISR (всего 1913 пожарных случаев).

Для идентификации параметров применялся наиболее оптимальный метод (метод, который дает наиболее узкий точечный график и наиболее высокий коэффициент корреляции) - ранговый метод. Этот метод так же удобен в случае очень слабых предположениях об исходных данных:



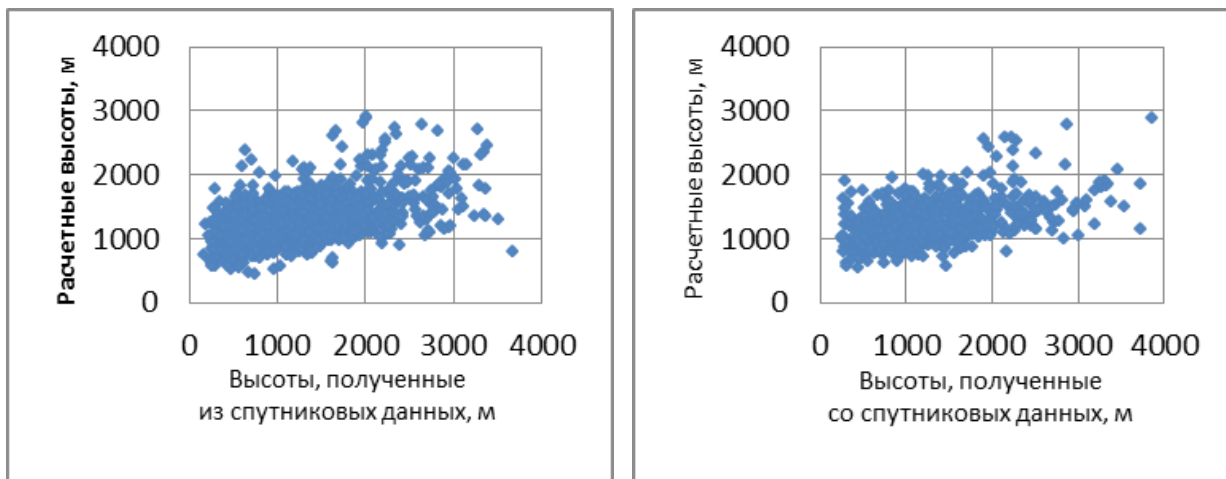
$$J_R = \sum_{i=1}^{N_{\text{пожаров}}} 1\left(\left|H_p^{\text{obs}}(i) - H_p^{\text{mdl}}(i) - \Delta h\right|\right), \quad (3.9)$$

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

Оптимальные параметры равны следующим значениям:

$$\alpha = 0.24; \quad \beta = 169; \quad \gamma = 0.35; \quad \delta = 254 \quad (3.10)$$

Результаты вычислений по формуле (3.8) с оптимальными параметрами (3.10) представлены на рис. 1.



а) б)  
Рис. 1 Соотношение между прогнозируемой высотой выбросов (ось ординат) и с высотой, полученной из спутниковых данных (ось абсцисс), для а) расчетного комплекта данных; б) контрольного комплекта данных

В **четвертой главе** проводится сравнение результатов вычислений высот выбросов, выполненных предложенным методом с высотами выбросов, рассчитанных по существующим методикам.

При проведении сравнения результатов расчетов высоты выбросов от лесных пожаров по существующим методикам с разработанной методикой, положительные тенденции говорят в пользу последней. Сравнение было проведено, как по ряду статистических параметров (Таблица 1), так и при помощи графиков для большей наглядности (рис.1). Физические процессы в случае с лесными пожарами и газовыми трубами существенно отличаются, в связи, с чем существующие методики были адаптированы, насколько это возможно к ситуациям с лесными пожарами.

Таблица 1. Суммарные статистические данные по всем рассмотренным методикам расчета

	<i>B6</i>	<i>B8</i>	<i>ОНД-86</i>	<i>BUOYANT</i>	<i>Предлож. Метод</i>
$F_{\text{good-500}}$ , %	36	30	19	51	65
$F_{\text{low-500}}$ , %	49	55	70	17	17
$F_{\text{high-500}}$ , %	7	7	9	14	18
Неудавшиеся расчеты, %	8	8	2	18	-
Коэффициент корреляции	0.15	0.03	0.11	0.44	0.45
Диапазон представления	1.7	5.3	3.34	0.54	0.48
RMSE, [m]	1337	3759	2542	604	646

Обозначения:

$F_{\text{good-500}}$ : процент спрогнозированных высот выбросов, которые отклоняются от высот, полученных из спутниковых данных менее, чем на 500 метров

$F_{\text{low-500}}$ : процент спрогнозированных высот выбросов, которые ниже высот, полученных из спутниковых данных более, чем на 500 метров

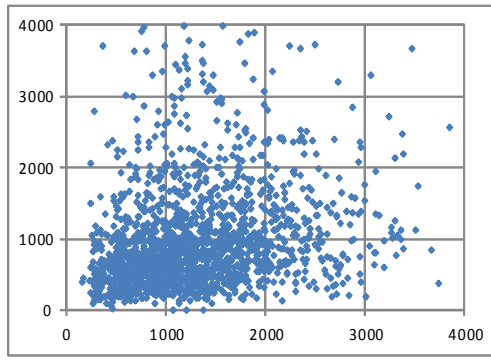
$F_{\text{high-500}}$ : процент спрогнозированных высот выбросов, которые выше высот, полученных из спутниковых данных более, чем на 500 метров

Неудавшиеся расчеты: процент случаев, когда проведение расчетов невозможно.

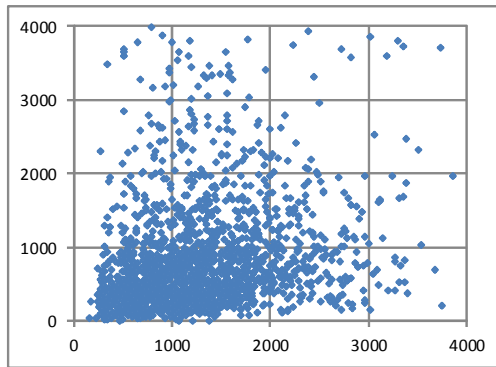
Коэффициент корреляции: коэффициент корреляции Пирсона

Диапазон представления: отношение стандартных отклонений спрогнозированных высот к наблюдаемым высотам:  $\sigma_{mdl} / \sigma_{obs}$ .

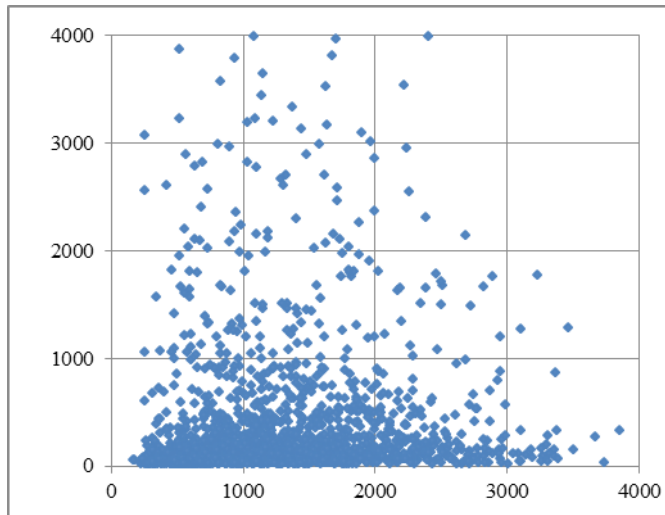
RMSE: среднеквадратическая ошибка спрогнозированных высот.



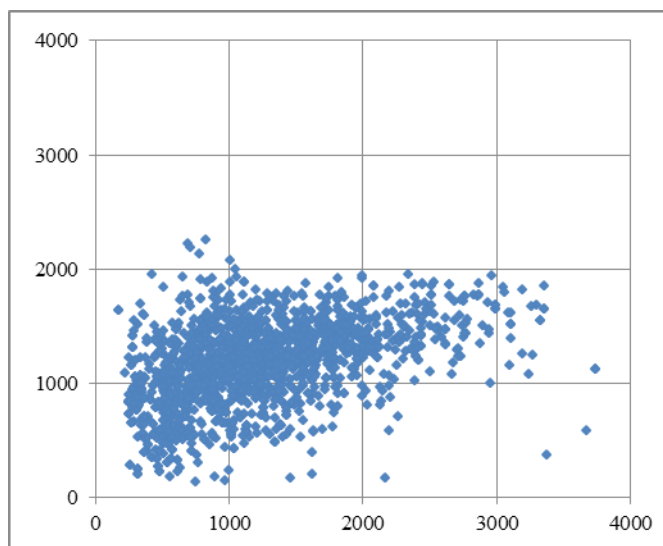
a)



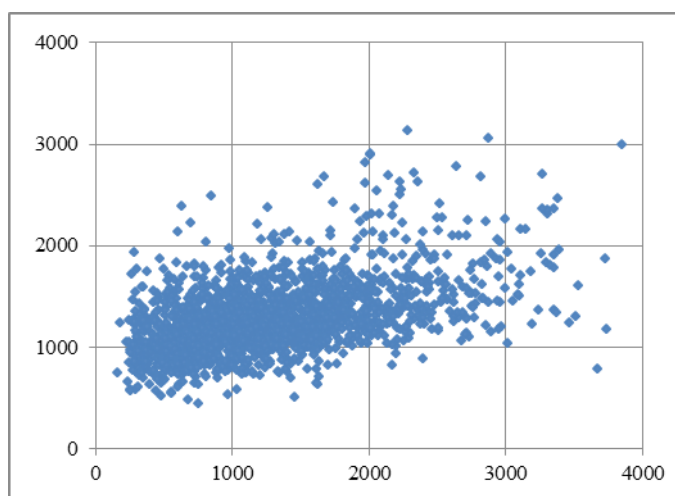
б)



В)



г)



д)

Рис. 2 Соотношение между прогнозируемой высотой выбросов (ось ординат) и высотой, полученной из спутниковых данных (ось абсцисс), для всех пожарных случаев, рассчитанных по а) Бр69; б) Бр84 в) ОНД-86 г) ВUОУАNT д) разработанной методике

Столь низкие показатели прогнозируемости у существующих методик обоснованы несколькими очевидными факторами. Большинство представленных методик разрабатывалось не для ситуаций с лесными пожарами, а для расчета высоты выбросов из заводских и фабричных труб в атмосферу. На рис. 1 г) хорошо видна тенденция модели ВUОУАNT к недооценке, она не позволяет ни одному выбросу достичь 2500 метров. Возможно, причина этого кроется в отсутствии в данной модели блока отвечающего за расчет фазовых переходов водяного пара, как следствие

отсутствие вклада теплоты скрытого парообразования. В тоже время добавление данного блока может привести к переоценке определенного числа случаев, вплоть до достижения ими свободной тропосферы. Следует отметить, что предложенная методика не нуждается в данном дополнении, так как влияние как явного так и скрытого тепла обозначено в параметрах формулы.

В пятой главе представлен расчет характерного вертикального профиля выбросов по земному шару за 2001 и 2008 годы. Целью исследования является получение оценки среднемесячного глобального распределения «е» выбросов от лесных пожаров по вертикали.

Расчет проводился для пожаров  $\{f_i, i=1..N_{ff}\}$ , данные об интенсивности которых доступны из спутниковых наблюдений во время пролета спутника над горящей территорией  $\{\tau_j, j=1..N_{\tau}\}$ . Из этих данных доступна FRP -  $P_f(\tau)$  для каждого пожара  $f_i$  время пролета над ним  $\tau$ . Комплект соответствующих месту и времени метеорологических характеристик: высота пограничного слоя  $H_{ABL}(x,y,t)$ , и частота Брента-Вейсяла  $N^2(x,y,z,t)$ , извлекается из метеорологической модели:

$$e(i, j, k, m), i=1..I, j=1..J, m=1..12, \sum_{k=1}^K e(i, j, k, m) = 1 \quad (5.0)$$

где  $I, J, K$  – x-, y-, z- направления,  $m$  порядковый номер месяца.

Предполагая линейную зависимость интенсивности пожара и общим объемом выбросов, можно записать плотность распределения продуктов горения во время активного горения следующим образом:

$$E_f(z) = \int_T P_f(t) s_e(x_f, y_f, P_f) \frac{\partial E}{\partial z}(H_p, z) dt \quad (5.0)$$

где  $s_e(x_f, y_f, P_f)$  – масштабирующий коэффициент выбросов, применяемый для конкретного очага горения с определенной скоростью

выбросов  $P_f$ ,  $\frac{\partial E}{\partial z}$  – плотность вертикального распределения удельной интенсивности выбросов и  $H_p$  максимальная высота выбросов.

Расчитав выбросы от конкретного единичного пожара (5.0), необходимое распределение в каждой ячейке сетки  $(i, j)$  может быть определено через суммирование всех пожаров, которые имеют место внутри каждой ячейки в течении месяца:

$$e(i, j, z, m) = \frac{\sum_f E_f(z)}{\int_0^\infty \sum_f E_f(z) dz} \quad (5.0)$$

Для определения конечной плотности внутри вертикального слоя  $k$ , который задается от  $z_{k-1/2}$  до  $z_{k+1/2}$ , получаем:

$$e(i, j, k, m) = \int_{z_{k-1/2}}^{z_{k+1/2}} e(i, j, z, m) dz \quad (5.4)$$

Следовательно, решение данной задачи сводится к определению трех переменных в уравнении (5.2).

Далее рассматривается простейший случай, когда распределение определяется для суммарного пожарного выброса. Энергия излучения пожара  $P_f$  линейно связана с сожженной биомассой и, следовательно, линейно связана с суммарным выбросом газовых примесей и аэрозолей. Из чего следует, что фактор эмиссии  $e$  постоянен и сократится при нормализации (5.0).

Единственный параметр вертикального распределения дымовых выбросов, который возможно оценить относительно непосредственно – это высота подъема дымовой струи  $H_p$ . В качестве грубой оценки, мы предположим, что 80% дымовой массы равномерно распределяется в слое от  $0.5H_p$  до  $H_p$ . Оставшиеся 20% располагаются в слое от 0 до  $0.5H_p$ .

Оценка суточного хода интенсивности пожара  $P_f$  с использованием редких наблюдений с низкоорбитальных спутников, таких как MODIS, становится трудной задачей. С другой стороны, суточный ход интенсивности пожара и, как следствие, его скорость и высота выбросов, могут изменяться на порядок величины, что необходимо учитывать.

Из анализа геостационарных спутниковых наблюдений за FRP (например, MGSSEVIRI), можно определить суточный ход радиационной

мощности пожара для каждого пикселя  $P_{pixel}$  с учетом интенсивности пожаров и времени наблюдения  $p(h)$ ,  $h=1..24$ . Пиксель данных инструментов достаточно велик (в зависимости от угла наблюдения, площадь пикселя может превышать  $100\text{км}^2$ ) и обычно дает информацию о большом количестве пожаров, так что интенсивность отдельных пожаров и их общее количество определяется одной переменной:

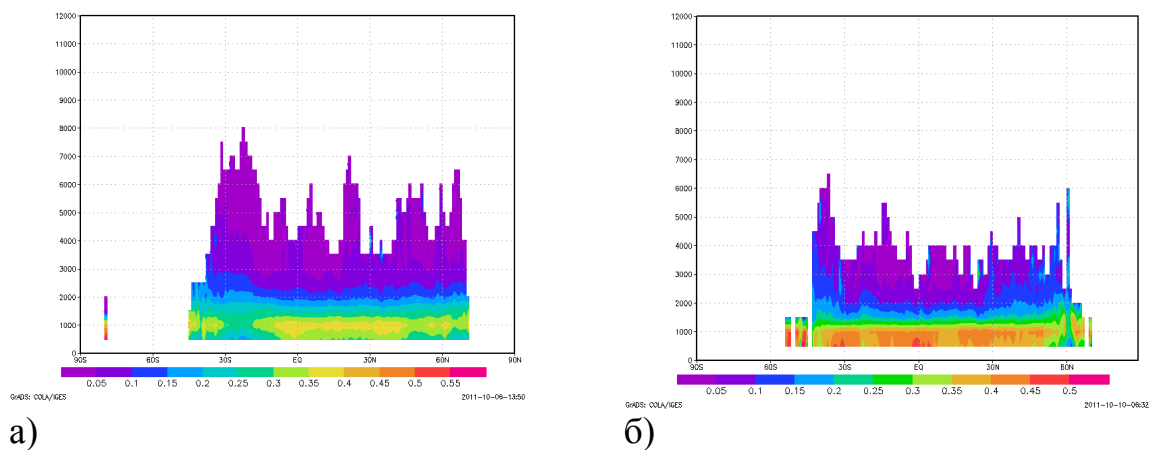
$$P_{pixel} = \sum_{i=1}^{N_{pix}} P_{fi}$$

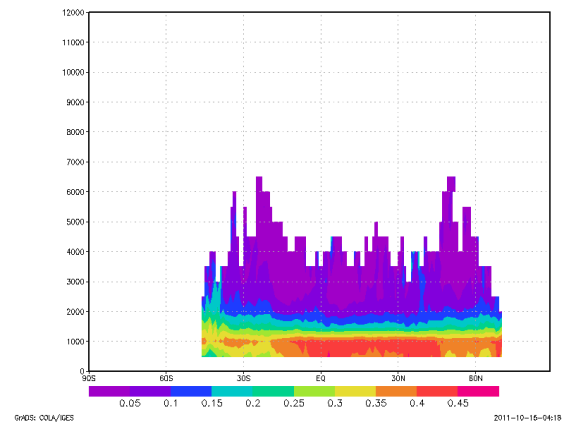
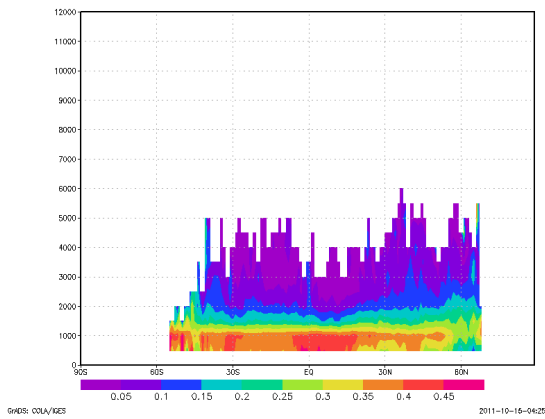
где  $P_{fi}$  — мощность  $i$ -того пожара, находящегося в области пикселя.

Взаимное влияние этих двух параметров на общий суточный ход мощности всех пожаров внутри конкретного пикселя может быть оценено используя информацию со спутника TRMM. Количество пожаров меняется в 2-10 раз в зависимости от времени суток, характера подстилающей поверхности и вегетации.

Предположим, что такой же суточный ход применим и для низкоорбитальных спутников со значительно меньшими размерами пикселей ( $1-5\text{ км}^2$ ), следовательно, возможно наложить этот ход на FRP наблюдения высокого разрешения..

Результаты вычислений распределения выбросов по высотам для западного и восточного полушария для 2001 и 2008 годов представлены на Рис. 3.





в)

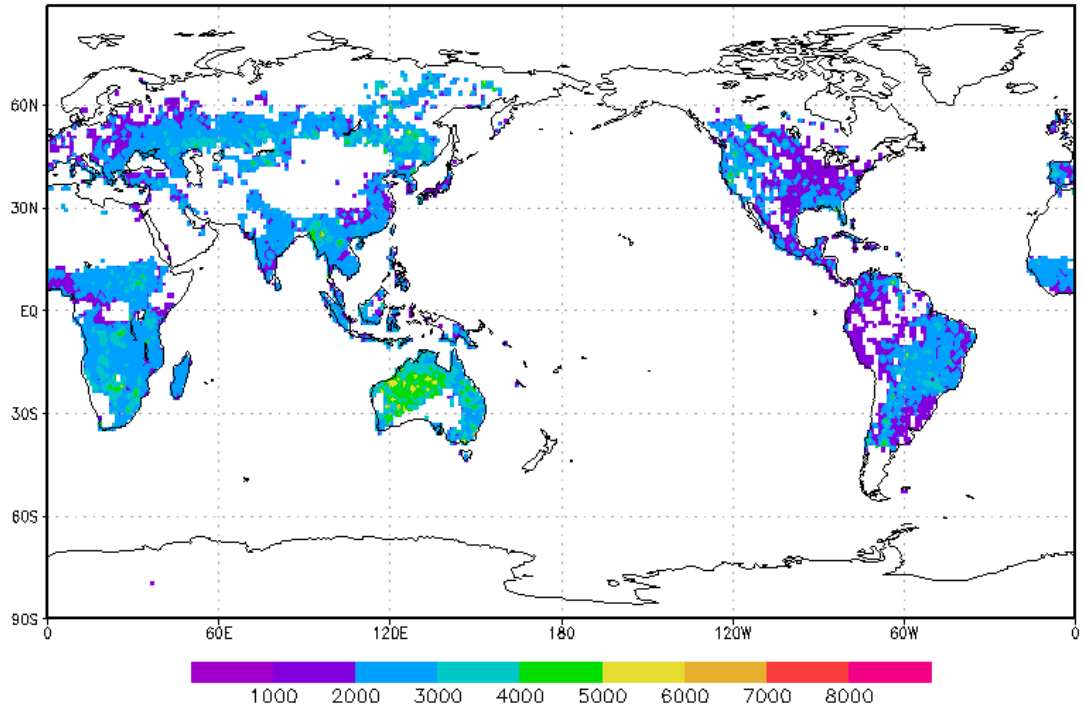
г)

Рис. 3 Безразмерный профиль распределения массы выбросов от лесных пожаров по высотам для а) западного б) восточного полушария 2001 год в) западного г) восточного полушария 2008 год

Подавляющий процент выбросов по массе остается внутри пограничного слоя атмосферы, что также подтверждается спутниковыми данными.

Распределение максимальных высот выбросов отличается для западного и восточного полушария. Максимально возможные высоты для умеренных широт в восточном полушарии до двух километров выше, что более наглядно представлено на рис. 4

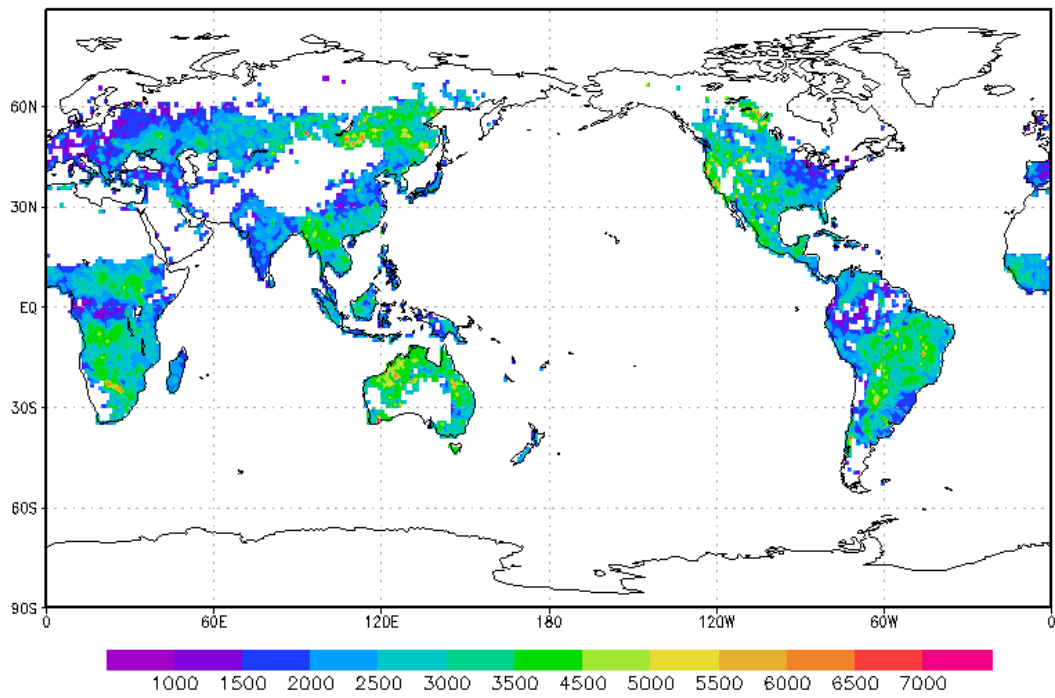




GRADS: COLA/IGES

2011-10-15-03:49

а)



GRADS: COLA/IGES

2011-10-15-02:23

б)

Рис. 4 Распределение 99 персентиля максимально возможных высот выбросов а) 2001  
б) 2008 год

Количество пожаров в 2008 году существенно больше по сравнению с 2001 годом, максимальная высота выбросов значительно выше на всех материках в 2008 году, что связано с разными погодными условиями в эти года.

## Заключение

Разработан новый метод оценки высоты выброса от лесного пожара, основанный на спутниковых характеристиках пожара и модельных оценках метеорологической ситуации. Эффективность данного метода позволяет применять его для оперативного мониторинга. К преимуществам разработанного метода можно отнести простоту и высокую скорость расчетов, а также возможность использования его как блока в системе ассимиляции пожарных данных, с последующим определением характерных вертикальных профилей аэрозоля.

Показана взаимосвязь нового метода с существующими подходами. Сравнение было проведено, как по ряду статистических параметров, так и при помощи графиков для большей наглядности. Физические процессы в случае с лесными пожарами и промышленными источниками существенно отличаются, в связи, с чем существующие методики были адаптированы, насколько это возможно к ситуациям с лесными пожарами.

Продемонстрирована более высокая оправдываемость расчетов высоты подъема дымовой струи новым методом в сравнении с другими подходами.

Продемонстрирована доминирующая роль интегральных параметров атмосферы и пожара, таких как высота пограничного слоя атмосферы, и мощность пожара, в определении высоты подъема дымовой струи.

Впервые получены оценки характерного профиля распределения выбросов от пожаров в глобальном масштабе.

### **Основные публикации по теме диссертации:**

1. Sofiev, M., R. Vankevich, M. Lotjonen, M. Prank, V. Petukhov, T. Ermakova, J. Koskinen, and J. Kukkonen (2009), An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air

quality modelling and forecasting, Atmospheric Chemistry and Physics, 9(18), 6833-6847.

2. Ванкевич Р.Е., Ермакова Т.С., Софиев М. А., Сравнение результатов вычисления высоты подъема струи дыма от лесных пожаров по полуэмпирическим формулам и одномерной модели BUOYANT, Ученые записки, 19, С. 61-70

3. Sofiev, M., Ermakova, T., Vankevich, R. Evaluation of injection height of smoke from wild-land fires using remote sensing data, Atmospheric Chemistry and Physics, 11, 27937-27966, 2011.