

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЭМИССИЙ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ И АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРАХ В РОССИИ

© 2015 г. В. Г. Бондур

Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга “АЭРОКОСМОС”, Москва

E-mail: [vgbondur@aerocosmos.info](mailto:vgbondur@aerocosmos.info)

Поступила в редакцию 01.07.2015 г.

Проанализированы особенности формирования эмиссий углеродосодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей в воздушную среду при природных пожарах. Описана методика и система оперативного космического мониторинга, используемые для оценки площадей выгоревших территорий и объемов эмиссий  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{PM}_{2.5}$  в процессе природных пожаров. Приводятся результаты космического мониторинга природных пожаров и оценены площади, пройденные огнем, а также объемы эмиссий углеводородсодержащих газов и аэрозолей на всей территории Российской Федерации и ее отдельных регионов в различные месяцы за период с 2010 по 2014 г. Выявлены особенности сезонной повторяемости природных пожаров и объемов эмиссий вредных газов и мелкодисперсных аэрозолей на исследуемых территориях.

**Ключевые слова:** космический мониторинг, дистанционное зондирование, эмиссия, малые газовые компоненты, аэрозоли, природные пожары

**DOI:** 10.7868/S0205961415060032

### ВВЕДЕНИЕ

Природные пожары – это стихийные бедствия, уничтожающие ценную древесину, мешающие лесовосстановлению, ухудшающие состояние водосборных бассейнов. При пожарах гибнут животные и птицы. Огонь может распространяться на населенные пункты, промышленные предприятия, угрожать людям, жилым домам, объектам энергетики, транспорта, стратегически важным объектам и др. (Воробьев и др., 2004). Природные пожары (лесные, торфяные, степные) задымляют большие пространства, изменяют химический состав атмосферного воздуха за счет эмиссии различных малых газовых компонентов и аэрозолей. Увеличение эмиссии моно- и двуокиси углерода ( $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ), а также других парниковых газов влияет на климат планеты (Исаев и др., 1995; Шведенко и др., 2011).

На земном шаре ежегодно возникает до 400 тыс. природных пожаров. Общая площадь, пройденная огнем, для всей территории Российской Федерации составляет от 2.0 до 16.0 млн га ежегодно. За сезон вегетации растений поток депонированного из атмосферы углерода за счет фотосинтеза может достигать величин 80–310 г/м<sup>2</sup> (Исаев и др., 199). Крупные природные пожары снижают стоки атмосферного углерода вследствие снижения биомассы. При этом из-за пожаров происходит трансформация лесов в источники углерода за

счет прямых выбросов при сгорании биомассы (от 40.0 до 130.0 Мт в год) и косвенных воздействий пожаров на тепловой и водный режимы, а также на структуру и функционирование экосистем (Шведенко и др., 2011).

История документально описанных природных пожаров на территории России насчитывает почти тысячу лет. Суздальская летопись сообщает, что в 1223 и 1298 гг. были засухи и бушевали сильные лесные и торфяные пожары. Никоновская и Новгородская летописи упоминают о засухах и лесных пожарах в XIV–XVII вв., сопровождавшихся голодом среди населения и большими потерями диких животных. Сведения о засухах и сильных лесных пожарах в XVIII–XIX вв. можно найти во многих исторических документах, в сохранившихся переписках известных людей и периодических журналах того времени. Многие из этих катастрофических пожаров описаны в работе (Борисенков, Лосицкий, 1988). Крупнейшие лесные пожары в Евразии бушевали в Сибири в 1915 г. Дым от этих пожаров вызвал заметное понижение температуры приземного воздуха, что в работе (Ginzburg, 1989) рассматривалось как один из природных аналогов так называемой “ядерной зимы”. За последние годы наиболее памятные пожары, происходившие в СССР и России в 1972, 2002 и 2010 гг. (Бондур 2010а, б). В 2010 г. на европейской территории России было побито множе-

ство температурных рекордов, а в отдельные дни температура воздуха приближалась к максимальной теоретически возможной температуре (Бондур 2010а, б; 2011а, б; Bondur, 2010).

Природные пожары – один из важнейших источников атмосферных эмиссий химически активных газов и аэрозолей. Эмиссионные шлейфы от крупных природных пожаров прослеживаются в подветренном направлении на расстояниях до нескольких тысяч километров.

Главными факторами, определяющие эффективность борьбы с природными пожарами являются: оперативность обнаружения и предупреждения; своевременность подавления их очагов, особенно на ранних стадиях. При этом необходимо проводить детальный анализ последствий природных пожаров, – прежде всего, оценку площадей выгоревших территорий, потерь лесного фонда, объемов эмиссий вредных примесей в воздушную среду, а также осуществлять поиск стратегии их оперативного мониторинга.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению этой проблемы является использование спутниковых систем мониторинга, оснащенных широким спектром современной аппаратуры дистанционного зондирования (ДЗ), а также методов обработки и хранения поступающей информации (Бондур и др., 2009; Савин, Бондур, 2000; Бондур и др., 1993; 2011а, б; Бондур 1995; 2010а, б; 2011а, б; 2013; 2014).

Настоящая работа посвящена применению современных методов и систем космического мониторинга для оперативного обнаружения природных пожаров, оценки площадей, пройденных огнем, а также объемов эмиссий углеродосодержащих газов и мелкодисперсных аэрозолей на территории России и ее отдельных регионов за последние годы.

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭМИССИЙ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВ И АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРАХ

Особенность лесных, степных и торфяных пожаров – высокие температуры горения (800–1000°C). Горение биомассы при природных пожарах является основным глобальным источником газовых и аэрозольных эмиссии в атмосферу и рассматривается как один из главных факторов экологического риска для окружающей среды (Воробьев и др., 2004). В результате сгорания органических материалов при природных пожарах в атмосферу поступает огромное количество малых газовых компонент, парниковых и химически активных газов, аэрозолей, органических соединений и других вредных для окружающей среды веществ, обладающих канцерогенными свойствами. В целом на планете в результате природных

пожаров в воздушную среду попадают 20% от глобальных эмиссий (Исаев и др., 1995).

Основную долю первичных продуктов выбросов при сгорании биомассы составляют двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ), моноокись углерода ( $\text{CO}$ ), окислы азота ( $\text{NO}_x$ ), летучие органические соединения (ЛОС), мелкодисперсный аэрозоль (PM), аммиак ( $\text{NH}_3$ ), двуокись серы ( $\text{SO}_2$ ) и метан ( $\text{CH}_4$ ). Только в форме окисей углерода в атмосферу, в результате природных пожаров, попадает от 15 до 25 Мт в год ([Andreas, Merlet, 2011). Попадая в атмосферу, первичные продукты горения вовлекаются в систему атмосферных движений, претерпевая дальнейшую трансформацию, которая приводит к высоким концентрациям токсичных соединений, оказывающих вредное влияние на человека. Наибольшее влияние на здоровье людей и состояние окружающей воздушной среды оказывают эмиссии углеродсодержащих газовых компонент ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ) и мелкодисперсного аэрозоля.

Значительная доля продуктов горения может переноситься конвективными течениями в свободную тропосферу до нижней границы стратосферы, что приводит к их быстрому распространению на значительные расстояния в крупномасштабных циркуляционных системах. Эмиссии долгоживущих соединений (семейство нечетного азота,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ ) определяют нелокальный характер воздействия их источников (региональный и планетарный масштабы). Это влияет на экологическое состояние воздушной среды в городах и населенных пунктах, на здоровье людей и на климат планеты (Бондур и др., 2004, 2009; Гинзбург и др., 2008).

Окись углерода ( $\text{CO}$ ) образуется при неполном сгорании биомассы, в основном при беспламенном горении лесных горючих материалов. Время его жизни в атмосфере составляет 2–4 мес. В среднем при лесных пожарах образуется 60 кг  $\text{CO}$  при сгорании 1 т горючих материалов (Воробьев и др., 2004). Концентрация  $\text{CO}$  падает при удалении от кромки пожара, так как в результате взаимодействия окиси углерода с кислородом воздуха образуется двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) (Ward, 1997).

Двуокись углерода является важнейшим источником климатических изменений. Увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере приводит к дисбалансу климатической системы, в том числе к повышению температуры поверхности планеты, что в свою очередь вызывает рост числа пожаров. Углекислый газ способствует проникновению к Земле коротковолнового излучения Солнца, при этом длинноволновое тепловое излучение Земли задерживается. В результате происходит длительный нагрев атмосферы, что вызывает парниковый эффект (Бондур и др., 2009; Гинзбург и др., 2008). Необходимо около 30 лет, чтобы

только 30% CO<sub>2</sub> было выведено из атмосферы под действием естественных процессов, еще 30% может быть удалено через несколько столетий, а 20% может оставаться в ней в течение многих тысяч лет (Andreas, Merlet, 2011).

Атмосферный аэрозоль представляет собой смесь твердых и жидких частиц в воздушной среде. Аэрозоли делятся на первичные и вторичные. К первичным относятся твердые и жидкие частицы, поступающие в атмосферу непосредственно в результате природного пожара, а вторичные аэрозоли (окисленные летучие органические соединения (ЛОС), сульфаты) формируются в атмосфере от предшествующих газообразных примесей (Zev Levin, 2009).

Аэрозольные эмиссии от лесных пожаров вызывают метеорологические и климатические эффекты, связанные как с прямым, так и с косвенным воздействием мелкодисперсных частиц на атмосферу Земли. Прямое воздействие заключается в том, что аэрозоли рассеивают и поглощают солнечное и тепловое излучения и изменяют радиационный баланс атмосферы и подстилающей поверхности. Косвенное воздействие состоит в том, что увеличение в воздухе концентрации аэрозольных ядер конденсации по-разному влияет на альbedo оптически тонких и оптически плотных облаков (Гинзбург и др., 2008). Облака с большой оптической толщиной в отсутствие аэрозольных частиц сами имеют высокое альbedo, поэтому добавление в облачную среду ядер конденсации (например сажевых), поглощающих солнечное излучение, уменьшает их отражательную способность. Тонкие полупрозрачные облака характеризуются относительно низким альbedo, поэтому добавление в них аэрозольных частиц может увеличивать их отражательную способность. Таким образом, “загрязнение” облаков аэрозолями делает оптически толстые облака темнее, а тонкие – ярче. Поэтому тонкие стратосферные облака, загрязненные ядрами конденсации, охлаждают стратосферу, а толстые нагревают приземный слой атмосферы (Гинзбург и др., 2008).

Учитывая пространственные масштабы распределения эмиссий углеродосодержащих газов и аэрозолей в атмосфере, для их мониторинга необходимо использовать методы, технологии и системы ДЗЗ.

Ниже рассмотрены космические методы и средства мониторинга состояния воздушной среды при природных пожарах.

#### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ДЛЯ ОЦЕНКИ ОБЪЕМОВ ЭМИССИЙ ГАЗОВЫХ КОМПОНЕНТ И АЭРОЗОЛЕЙ ПРИ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРАХ

Для анализа объемов эмиссий различных газовых компонент и аэрозолей, возникающих в ре-

зультате природных пожаров, используется ряд подходов, которые основаны, как правило, на методе Сейлера–Крутцена (Seiler, Crutzen, 1980). Они учитывают площади территорий, пройденных огнем, плотность пространственного распределения биомассы, полноту сгорания, а также эмиссионные коэффициенты, характеризующие отношение величины эмиссий к количеству сгоревшей биомассы (Вивчар и др., 2010). Плотность биомассы зависит от типа экосистемы и от яруса растительности в рамках экосистемы (Kasischke et al., 2005). Полнота сгорания варьируется в зависимости от яруса растительности и интенсивности пожара. Эмиссионные коэффициенты могут различаться для стадий горения и тления (Cahoon et al., 1994).

В соответствии с формулой Сейлера–Крутцена, общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу в результате пожара  $E$ , равна (Seiler, Crutzen, 1980)

$$E = ABCD, \quad (1)$$

где  $A$  – площадь пройденной огнем территории (м<sup>2</sup>);  $B$  – плотность биомассы на данной территории (кг/м<sup>2</sup>);  $C$  – полнота сгорания (%);  $D$  – количество вещества, выбрасываемого в атмосферу при сгорании 1 кг биомассы (г/кг).

Площадь пройденной огнем территории  $A$  может определяться по космическим данным. Коэффициенты  $B$ ,  $C$ ,  $D$  соответствуют каждому типу растительности и могут быть взяты из различных источников.

Основные отличия подходов, применяющих формулу (1), заключаются в использовании различных исходных данных для расчетов площадей пожаров, данных по запасу лесных горючих материалов и по полноте сгорания. В этих подходах при оценке эмиссий учитываются особенности и виды природных пожаров, характеристики используемых средств космического мониторинга, обеспечивающих получение информации о площадях природных пожаров, а также о составе и структуре экосистем. Применяется специальное программное обеспечение, необходимое для обработки полученной космической информации и конечных результатов. В используемых подходах учитывается также горение торфа на заболоченных территориях и выгорание органического слоя почвы в лесных экосистемах (Conard et al., 2002).

Для расчета полноты сгорания применяется индекс, характеризующий соотношение между полнотой сгорания и процентом зеленой растительности от общей биомассы (Ghang, Sung, 2009).

$$\text{PGREEN} = \frac{(\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min})}{(\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})}, \quad (2)$$

где NDVI – вегетационный индекс, значения которого получаются с помощью алгоритма

MOD13A3 обработки данных спутникового прибора MODIS (Бондур, Крапивин, 2014).

Для реализации описанных подходов необходимо использование эффективных методов, технологий и средств космического мониторинга, обеспечивающих возможность оперативного обнаружения лесных, степных и торфяных пожаров на больших площадях, достоверную оценку площадей, пройденных огнем, а также определение объемов эмиссий вредных примесей от них (прежде всего CO<sub>2</sub>, CO и мелкодисперсного аэрозоля PM<sub>2,5</sub>).

При решении этих задач были разработаны специальные методы, в том числе:

- метод обнаружения очагов возгорания по космическим мультиспектральным изображениям, состоящий в следующем: нахождении участков с аномально высокой температурой; исключении участков с аномальным естественным нагревом и искусственных тепловых источников (газовых факелов горячих производств и др.); фильтрации облаков, водных поверхностей, областей солнечного блика, ложных тепловых аномалий, отличающихся использованием пространственно-временного анализа тепловых аномалий для выявления и исключения недостоверных данных, подтверждением достоверности обнаружения пожаров на основе анализа серий космических изображений (Бондур, 2011а, б);

- метод расчета площадей, пройденных огнем, заключающийся в следующем: формировании и сохранении векторных данных об очагах возгорания в формате шейп-файлов; последующем объединении этих векторных данных для исследуемой области и заданного интервала времени; анализе растров обзорных космических изображений; использовании поправочных коэффициентов, полученных в результате анализа изображений высокого и среднего разрешения (спутники Landsat, Метеор-М, Канопус, IRS и др.); использовании вегетационных индексов для оценки состояния растительности (Бондур, 2011а, б; Бондур Чимитдоржиев, 2008);

- метод оперативного оценивания объемов эмиссий продуктов горения, отличающийся от известных: использованием более точных данных о площадях пожаров, получаемых на основе спутниковых изображений низкого, среднего и высокого пространственного разрешения; более точным определением класса горючих материалов; применением подробных карт растительности; привлечением дополнительных космических данных, в том числе данных спектрометры AIRS (спутник AQUA), OMI (спутник AURA) для оценки общего объема эмиссий, а также данных аппаратуры AVHRR (спутник NOAA) для получения информации о температуре земной поверхности на больших территориях.

Методика космического мониторинга природных пожаров заключалась в следующем:

- получение космических изображений в ИК- и видимом диапазонах спектра электромагнитных волн с различных космических аппаратов (Terra; Aqua; SuomiNPP; NOAA; Метеор-М; FY-3 и др.) путем приема на три наземные станции, расположенные в г. Москве, в Сибири и на Дальнем Востоке, с зонами покрытия, охватывающими всю территорию Российской Федерации и близлежащих стран (см. рис. 1), а также получение данных из долговременных архивов для других территорий (Бондур, 2010а, б; 2011а, б; Bondur, 2010);

- выявление очагов пожаров по космическим изображениям путем регистрации радиационной температуры в спектральном диапазоне 3.5...3.7 мкм, а также разности радиационных температур в этом канале и в спектральном канале ~11.0 мкм (Бондур 2010а, 2011а);

- векторизация масок пожаров и формирование атрибутивных таблиц шейп-файлов, содержащих информацию о каждом пожаре, с помощью специально разработанных программных средств;

- устранение ложных аномалий, связанных со стационарными источниками (газовыми факелами, горячими производствами, бликами на металлических крышах и водных поверхностях), а также обусловленными серебристыми облаками и т.п. (Бондур, 2011а, б);

- формирование синтезированных изображений с очагами пожаров путем использования многоспектральных спутниковых данных в видимом и ИК-диапазонах спектра (см. рис. 2);

- верификация очагов пожаров по сформированным синтезированным изображениям с выделенными очагами природных пожаров;

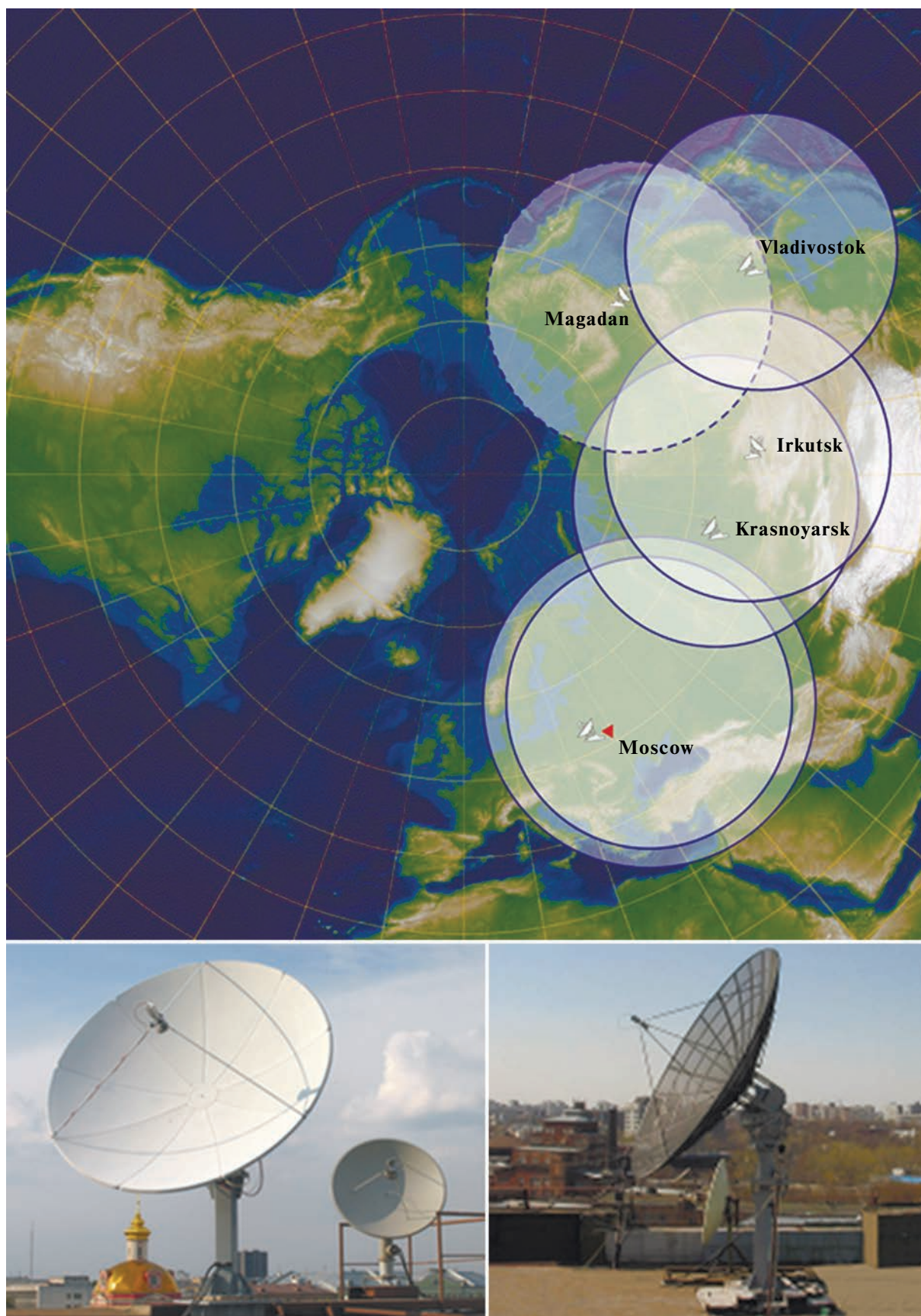
- расчет площадей пожаров по спутниковым данным низкого разрешения (Terra, Aqua, NOAA, Suomi-NPP, Метеор-М, FY-3 и др.);

- уточнение площадей пожаров по спутниковым данным среднего и высокого разрешения (Landsat, RapidEye, IRS, Канопус и др.);

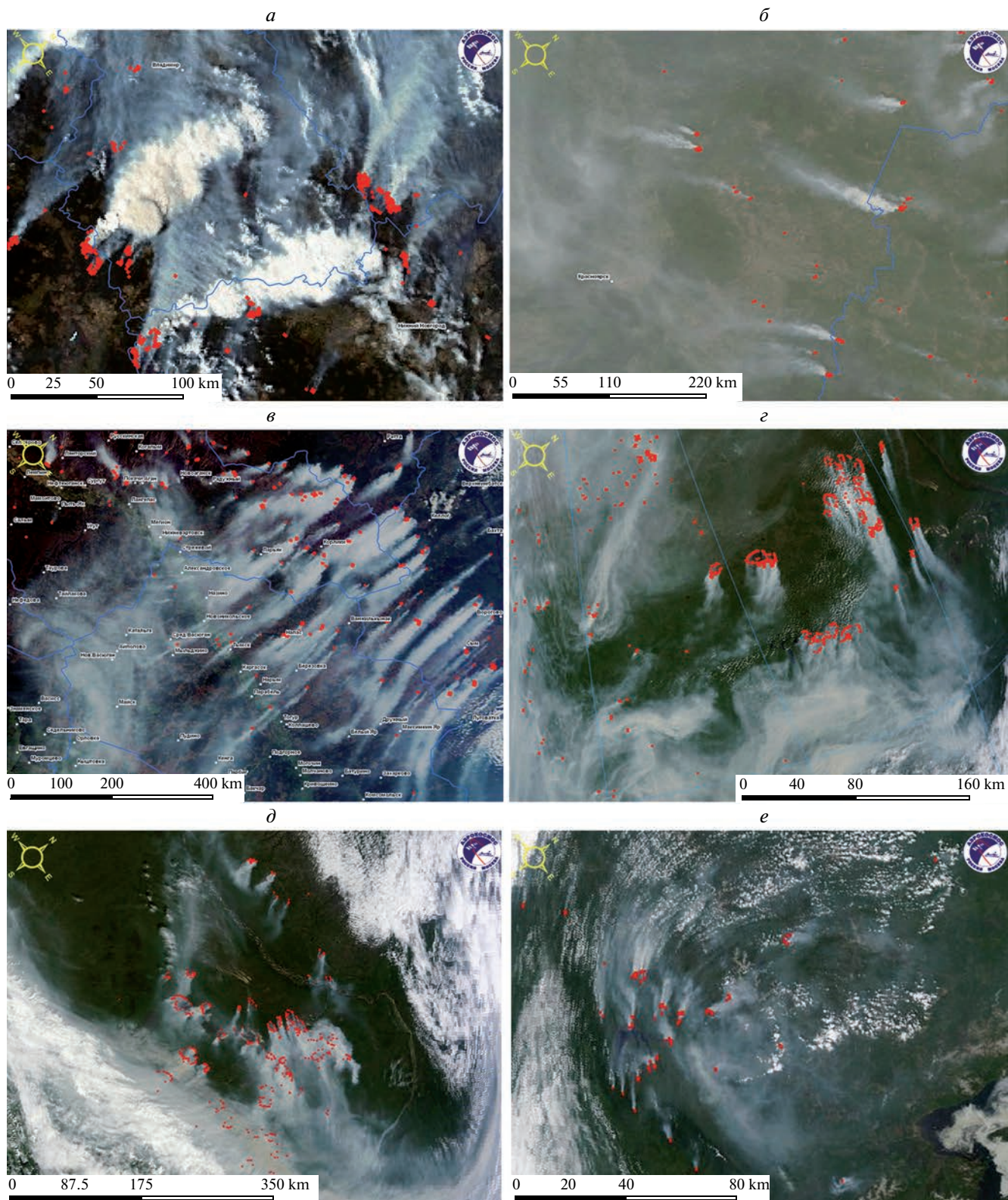
- расчет объемов эмиссий газов и аэрозолей с использованием полученных площадей пожаров, информации о типах растительности, плотности биомассы и их свойствах на выгоревших территориях и др.;

- построение карт глобальных распределений объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub> по данным, полученным с помощью аппаратуры AIRS (спутник AQUA) и OMI (спутник AURA);

- построение карт с распределениями тепловых аномалий по текущим и многолетним данным, полученным аппаратурой AVHRR спутников серии NOAA.



**Рис. 1.** Зоны приема космической информации антенными комплексами НИИ “АЭРОКОСМОС”.



**Рис. 2.** Примеры пожаров, обнаруженных из космоса: *а* – 29 июля 2010 г., Европейская часть России; *б* – 01 июля 2011 г., Красноярский край; *в* – 20 июня 2012 г., территория Западной Сибири; *г* – 05 августа 2013 г., территория Сибири; *д* – 27 июля 2014 г., республика Саха (Якутия); *е* – 23 июня 2015 г., Амурская область.

Основными отличительными особенностями используемых средств космического мониторинга являются: высокая частота обзора одного и того же района (до 35 раз в сутки); сочетание обзорной (разрешение 250...1000 м) и более детальной (разрешение 2...30 м) космической информации; высокая скорость обработки данных и передачи информационных продуктов об обнаруженных пожарах (10 мин с момента приема данных); высокая точность регистрации очагов пожаров (минимальный радиус очагов 5.5 м) и достоверность обнаружения (0.8–0.96).

### РЕЗУЛЬТАТЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 2 приведены примеры синтезированных изображений с обнаруженными из космоса очагами пожаров и дымовыми шлейфами, полученные с помощью системы космического мониторинга НИИ “АЭРОКОСМОС” в различных районах территории России в различные дни 2010–2015 гг.: *a* – на территории Европейской части России (Владимирская, Рязанская, Московская и Нижегородская области) 29 июля 2010 г.; *б* – в Красноярском крае 1 июля 2011 г.; *в* – на территории Западной Сибири 20 июня 2012 г.; *г* – на территории Сибири 5 августа 2013 г.; *д* – в республике Саха (Якутия) 27 июля 2014 г.; *е* – в Амурской области 23 июня 2015 г. Как показывают приведенные изображения, наиболее интенсивные пожары и наиболее сильное задымление обширных территорий происходили летом 2010 г. на территории Европейской части России (см. рис. 2*a*) и в июне 2012 г. на территории Западной Сибири.

Важным аспектом для анализа последствий природных пожаров и оценки объемов эмиссий газовых компонент и аэрозолей в атмосферу является точное определение площадей территорий, пройденных огнем. Для решения этой задачи использовались космические изображения среднего (~30 м) и высокого (~2.5–5 м) пространственного разрешения. Однако в этом случае снижается оперативность получения информации о площадях пожаров и объемах эмиссий в воздушную среду на больших пространствах, так как космические изображения высокого и среднего разрешения имеют сравнительно малые поля захвата и формируются через значительные интервалы времени (более суток).

Для повышения оперативности решения задачи достоверного определения площадей, пройденных огнем, осуществлялась верификация данных, полученных по космическим изображениям низкого (~1 км) пространственного разрешения (аппаратура типа MODIS спутников Terra, Aqua, Suomi-NPP), путем сопоставления с данными, полученными по изображениям более высокого (30 м) пространственного разрешения (тематиче-

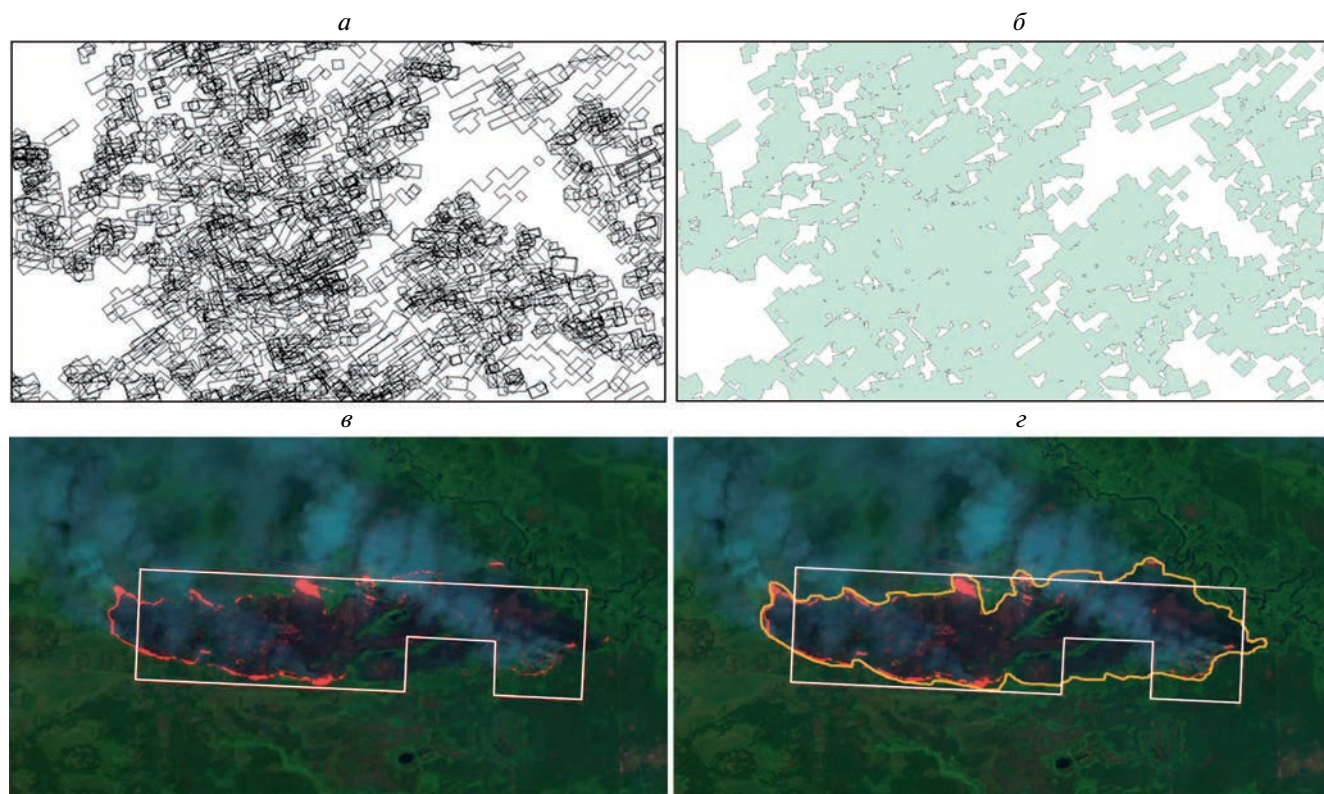
ский картограф ТМ спутника Landsat). Для этого выбирался тестовый участок на территории Якутии с интенсивными пожарами, происходившими в апреле–мае 2011 г., для которого было собрано 462 изображения, полученных с помощью аппаратуры MODIS спутников Terra и Aqua. В процессе обработки собранных изображений с помощью специально разработанного программного обеспечения было выявлено 11554 очага природных пожаров.

На рис. 3*a* показаны накопленные полигоны (с перекрытиями), отображающие территории, пройденные огнем, для всех выявленных очагов природных пожаров на выбранном тестовом участке. На рис. 3*б* показаны агрегированные (без перекрытий) полигоны с территориями, пройденными огнем. Процесс агрегации заключался в объединении пересекающихся полигонов, пройденных огнем, что исключало дублирование площадей и увеличивало точность их оценки. Выявленная общая агрегированная площадь территории, пройденной огнем, для анализируемого тестового участка по данным аппаратуры MODIS составила 39884 км<sup>2</sup>.

Аналогичным образом для выбранного тестового участка собирались космические изображения, полученные с помощью тематического картографа (ТМ) спутника Landsat-5 (пространственное разрешение 30 м). На рис. 3*в*, *г* представлен фрагмент космического изображения, полученного аппаратурой ТМ спутника Landsat-5, с отображением территории, пройденной огнем, и контурами, выделенными для этой выгоревшей территории, по данным низкого разрешения, полученным с помощью аппаратуры MODIS (прямые линии) (см. рис. 3*в*, *г*) и по данным среднего разрешения, полученным аппаратурой ТМ (см. рис. 3*г*). Как видно из анализа рис. 3*в*, *г*, площади, пройденные огнем, определяемые по оконтуренным областям, выделенным по данным низкого и среднего разрешения, отличаются. Площадь агрегированных полигонов, пройденных огнем, выделенных по изображениям среднего пространственного разрешения, полученным со спутника Landsat, составила 35416 км<sup>2</sup>.

Исходя из общих агрегированных площадей, пройденных огнем, вычисленных по данным аппаратуры низкого (~1 км) и среднего (30 м) пространственного разрешения, поправочный коэффициент для данных, полученных с помощью аппаратуры MODIS, составляет 0.889. Этот коэффициент использовался для последующих оценок.

На рис. 4–7 приведены распределения по месяцам площадей, пройденных огнем, а также объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и мелкодисперсного аэрозоля PM<sub>2.5</sub>, полученные на основании результатов обработки данных космического мониторинга, проведенной в соответствии с описанной выше



**Рис. 3.** Верификация площадей, пройденных огнем, определяемых по космическим изображениям низкого (1 км) разрешения (аппаратура MODIS спутников Terra, Aqua) с использованием изображений среднего (30 м) пространственного разрешения (аппаратура ТМ спутника Landsat-5): *а* – накопленные полигоны, пройденные огнем; *б* – агрегированные полигоны (с учетом перекрытий); *в*, *г* – области, пройденные огнем, выделенные по изображениям тематического картографа (спутник Landsat) с контурами этой области, выделенными по изображению MODIS (прямые линии) (*в*, *г*) и по изображению ТМ спутника Landsat – *г*.

методикой, за период с 2010 по 2014 гг. для всей территории Российской Федерации (см. рис. 4) и ее отдельных регионов: Европейской части территории страны (рис. 5); Сибирского (рис. 6) и Дальневосточного (рис. 7) Федеральных округов.

Общий анализ приведенных рисунков свидетельствует о том, что распределение площадей, пройденных огнем, на всей территории России за исследуемый период имеет, как правило, два характерных максимума (см. рис. 4*а*) – в весенний (апрель–май) и летний (июль–август) периоды. Причем максимальные площади, пройденные огнем, выше в апреле и мае для всех проанализированных лет. Максимальные площади, пройденные огнем, на всей территории России были зарегистрированы в апреле 2012 г. (40.55 тыс. км<sup>2</sup>) и в июле 2012 г. (31.24 тыс. км<sup>2</sup>). Хотя достаточно большие площади, пройденные огнем, были выявлены также в 2011 г. – в апреле (26.10 тыс. км<sup>2</sup>) и в мае (27.31 тыс. км<sup>2</sup>).

Распределения по месяцам площадей, пройденных огнем, для отдельных регионов также имеют характерные максимумы. Так, для территории Европейской части России эти максимумы

проявляются в апреле и в самые жаркие летние месяцы (июль–август) (см. рис. 5*а*). Исключение составляет 2012 г., когда максимум выгоревших территорий сместился на сентябрь. Максимальные площади, пройденных огнем, для этого региона были зарегистрированы в августе 2010 г. (10.93 тыс. км<sup>2</sup>), когда здесь бушевали катастрофические пожары (Бондур, 2010*а*, *б*; 2011*а*, *б*; Bondur 2010).

На территории Сибирского Федерального округа распределения площадей пожаров по месяцам также имеют два характерных максимума (см. рис. 6*а*): в весенние (апрель–май) и в летние (в основном июль–июль) месяцы. Максимальные площади пожаров были выявлены в июле 2012 г. (25.44 тыс. км<sup>2</sup>), хотя достаточно большие площади, пройденные огнем, были зарегистрированы также в апреле и мае 2012 г. (23.19 и 21.83 тыс. км<sup>2</sup> соответственно).

Для территории Дальневосточного Федерального округа распределение площадей природных пожаров с апреля по август более равномерно (см. рис. 7*а*). Максимальные площади, пройденные огнем в этом регионе, были в летние месяцы



2012 г. (в июле 20.62, в июне – 17.49 тыс. км<sup>2</sup>), а также в мае и июле 2011 г. (15.42 и 14.54 тыс. км<sup>2</sup> соответственно).

Характер площадей, пройденных огнем, свидетельствует об интенсивности природных пожаров на исследуемых территориях. Как известно, пожарная опасность, а, следовательно, и интерактивность возникающих пожаров, определяется влажностью напочвенного и растительного покрова и температурой воздуха. При влажосодержании отмершей растительности, мхов, лишайников и других проводников горения менее 25% создаются благоприятные условия для возникновения и распространения низовых пожаров. При влажности крон деревьев от 25 до 80% возникает угроза перехода низовых пожаров в верховые, наиболее опасные как с точки зрения скорости распространения (от 3-х до 100 м/мин и более), так и с точки зрения уничтожения лесной флоры и фауны (Воробьев и др., 2004). Интенсивность пожаров зависит от температуры окружающей среды. При возникновении достаточно длительных периодов повышенной температуры воздуха (тепловых аномалий), приводящих также к снижению влажности растительности, повышается интенсивность природных пожаров.

На рис. 8 приведены некоторые характерные примеры возникающих тепловых аномалий для территории Северной Евразии. На этом рисунке представлены распределения относительных средних температур для отдельных месяцев различных лет по сравнению со средними температурами для этих месяцев за предыдущие 10 лет

$$\Delta \bar{t}_j^{(i)} = \bar{t}_j^{(i)} - 0.1 \sum_{j=1}^{j-11} \bar{t}_j^{(i)}, \quad (3)$$

где  $\bar{t}_j^{(i)}$  – средняя температура для  $i$ -го месяца за  $j$ -й год.

Температурные аномалии, приведенные на рис. 8, построены по результатам обработки данных, полученных радиометрами AVHRR, установленными на спутниках серии NOAA (Бондур, Крапивин, 2014).

Анализ тепловых карт, приведенных на рис. 8, свидетельствует о том, что наиболее интенсивные температурные аномалии возникали: в июне 2010 г. ( $\Delta \bar{t} = 5-9^\circ\text{C}$ ) – на территории Европейской части России (см. рис. 8а); в апреле 2011 г. ( $\Delta \bar{t} = 4-8^\circ\text{C}$ ) – на территории Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов (см. рис. 8б); в июле 2011 г. – на Европейской части территории России ( $\Delta \bar{t} = 3-5^\circ\text{C}$ ) и на территории Дальневосточного Федерального округа ( $\Delta \bar{t} = 4-6^\circ\text{C}$ ) (см. рис. 8в); в апреле 2012 г. ( $\Delta \bar{t} = 5-11^\circ\text{C}$ ) – на Европейской части территории страны и в Западной Сибири (см. рис. 8г); в июне 2012 г. ( $\Delta \bar{t} = 5-10^\circ\text{C}$ ) на тер-

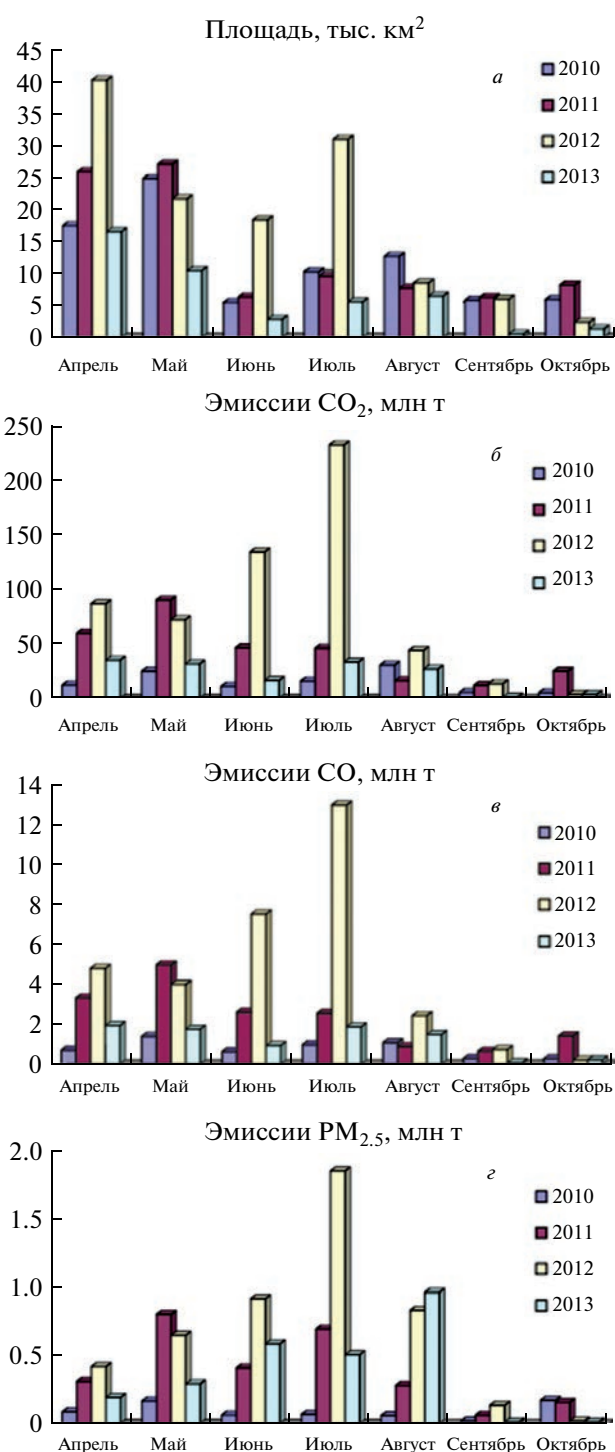
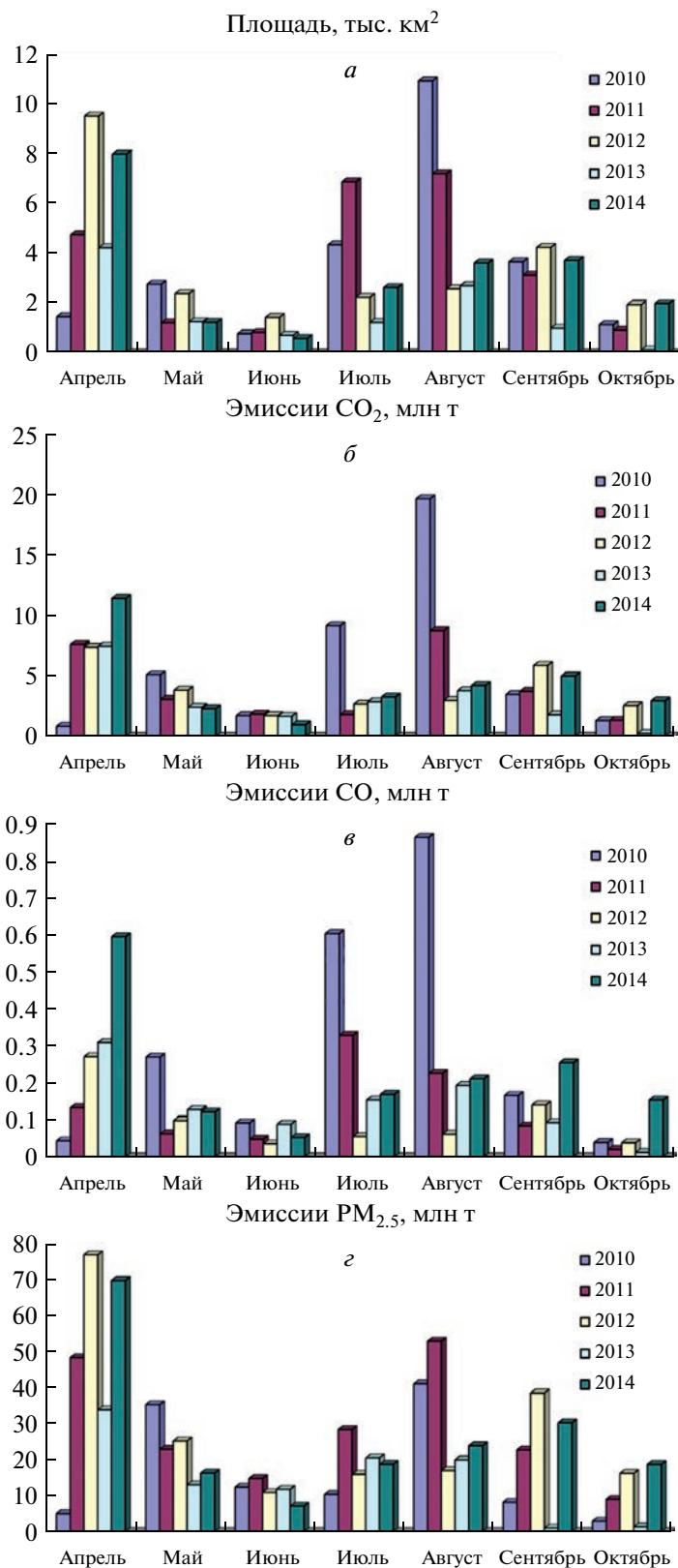


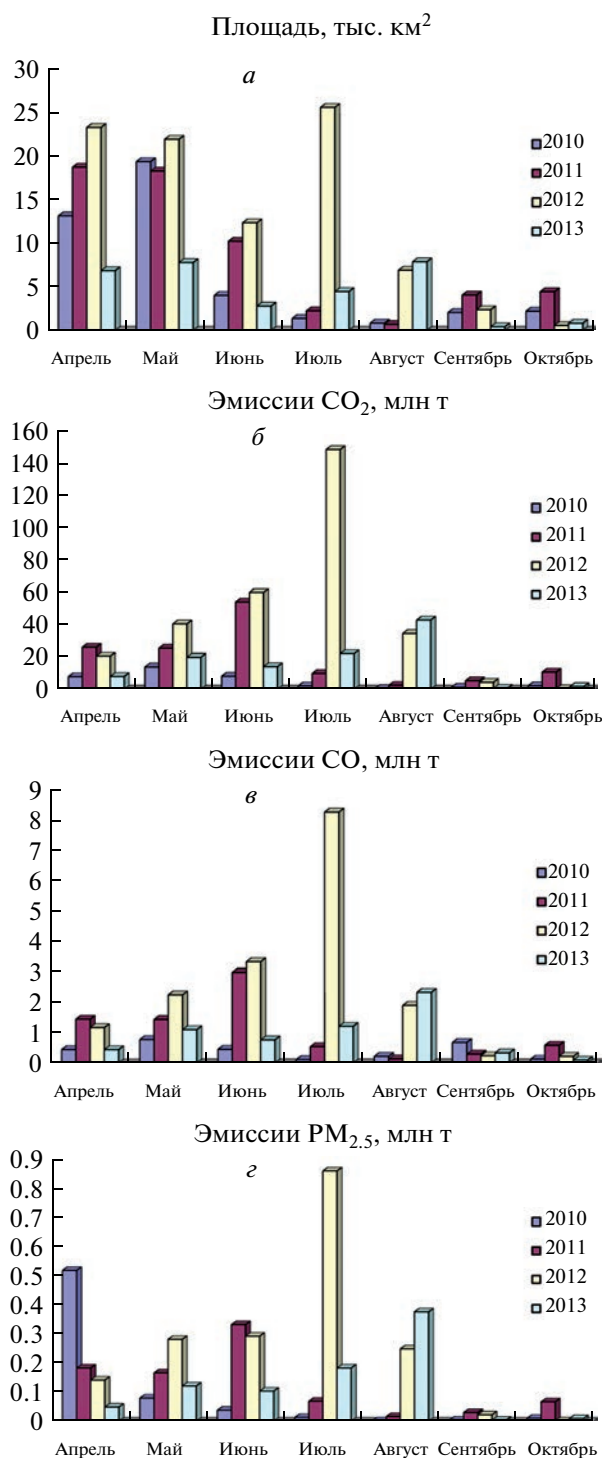
Рис. 4. Распределение по месяцам площадей, пройденных огнем (а), объемов эмиссий CO<sub>2</sub> (б), CO (в) и мелкодисперсных аэрозолей PM<sub>2.5</sub> на всей территории России для различных лет.

ритории Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов (см. рис. 8д).

Выявленным на тепловых картах зонах повышенных температур (положительным тепловым аномалиям) соответствуют максимальные значе-

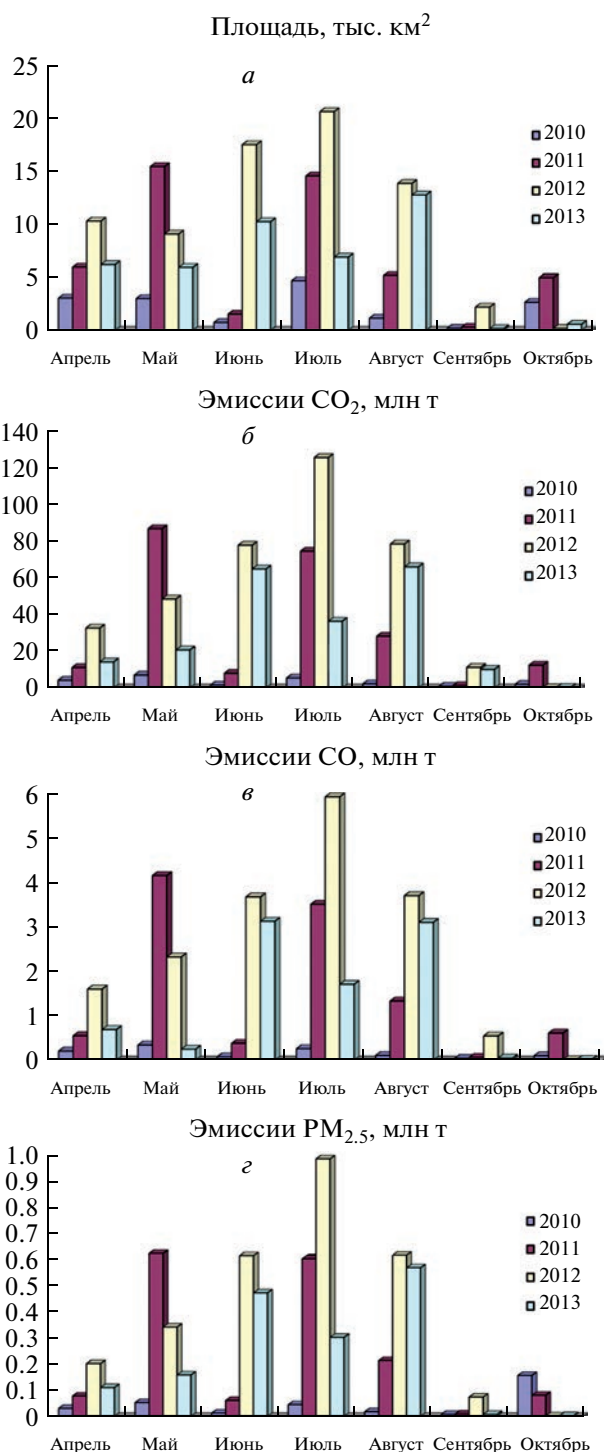


**Рис. 5.** Распределение по месяцам площадей, пройденных огнем (*a*), объемов эмиссий CO<sub>2</sub> (*б*), CO (*в*) и мелкодисперсных аэрозолей PM<sub>2,5</sub> на территории Европейской части России для различных лет.



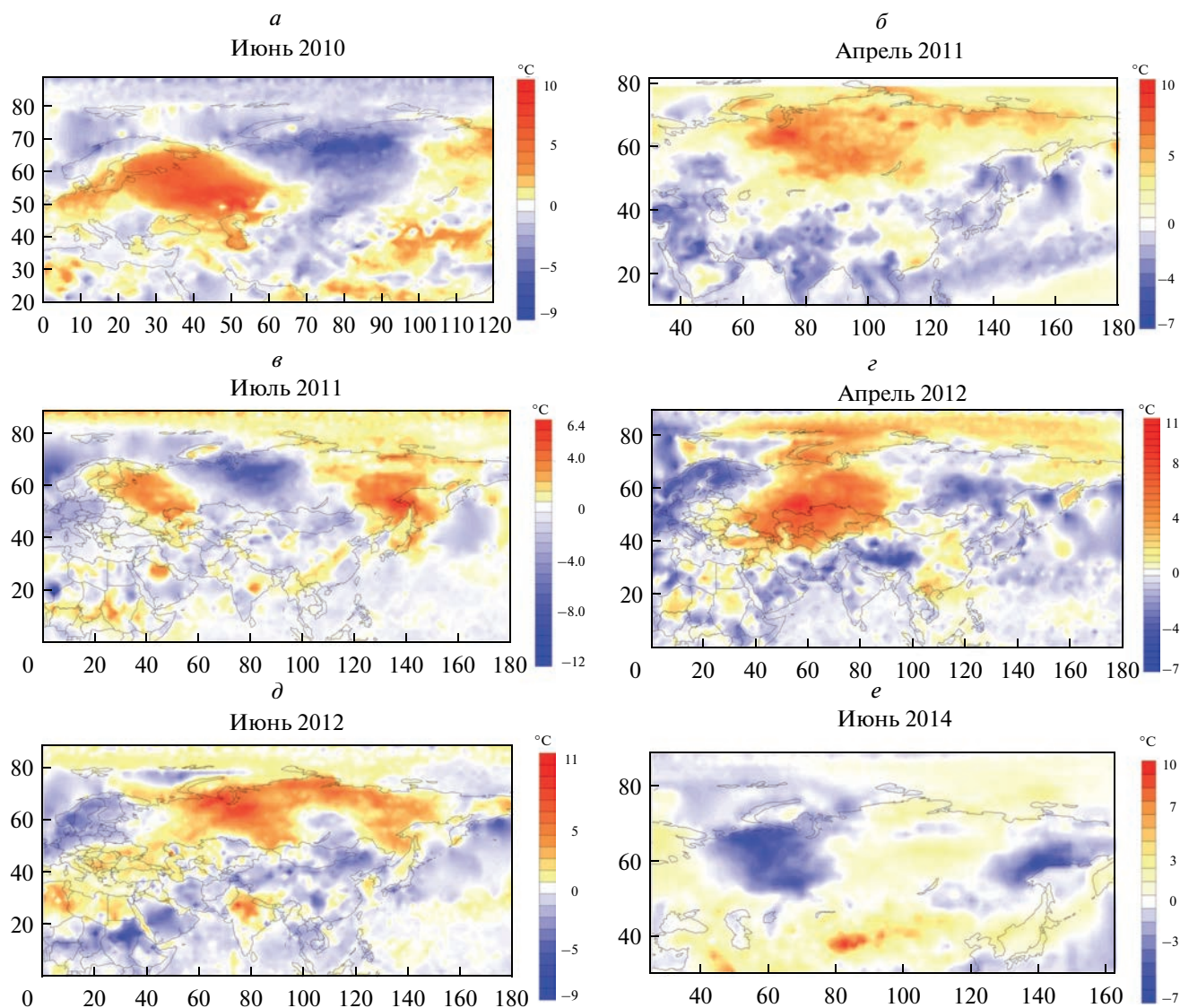
**Рис. 6.** Распределение по месяцам площадей, пройденных огнем (а), объемов эмиссий CO<sub>2</sub> (б), CO (в) и мелкодисперсных аэрозолей PM<sub>2.5</sub> на территории Сибирского Федерального округа для различных лет.

ния площадей пожаров и высокие значения объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub>, полученным для соответствующих регионов по результатам космического мониторинга (см. рис. 5–7).



**Рис. 7.** Распределение по месяцам площадей, пройденных огнем (а), объемов эмиссий CO<sub>2</sub> (б), CO (в) и мелкодисперсных аэрозолей PM<sub>2.5</sub> на территории Дальневосточного Федерального округа для различных лет.

На рис. 8е показана зона отрицательной температурной аномалии ( $\Delta \bar{t} = -3...-7^{\circ}\text{C}$ ), сформировавшейся в июне 2014 г. над территорией Европейской части России. Анализ рис. 5а показыва-



**Рис. 8.** Распределение относительных температур в отдельные месяцы различных лет по сравнению со средними температурами для этих месяцев за предыдущие 10 лет: *а* – июнь 2010 г.; *б* – апрель 2011 г.; *в* – июль 2011 г.; *г* – апрель 2012 г.; *д* – июнь 2012 г.; *е* – июнь 2014 г.

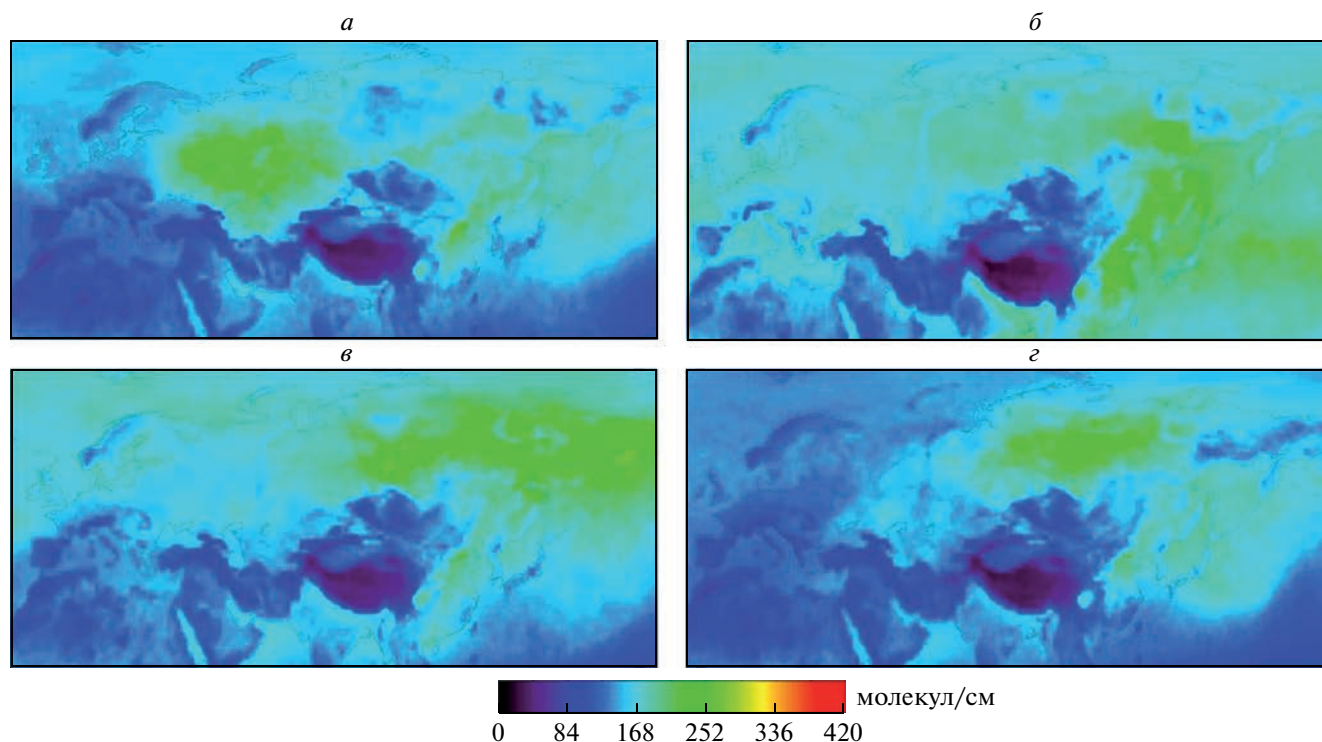
ет, что именно в этом месяце была выявлена минимальная площадь территорий, пройденных огнем (0.58 тыс. км<sup>2</sup>) и минимальные объемы эмиссий (см. рис. 5б, в, г).

Результаты оценок объемов эмиссий углеродосодержащих парниковых газов CO<sub>2</sub> (б), CO (в) и мелкодисперсного аэрозоля PM<sub>2.5</sub> (г) на всей территории России, территории Европейской части России, Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов приведены на рис. 4б, в, г, 5б, в, г, 6б, в, г и 7б, в, г.

Анализ рис. 5 и 7 свидетельствует о том, что на территории Европейской части России, а также Дальневосточного Федерального округа распределения объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> обыч-

но повторяют ход графиков распределения площадей пожаров. В то же время объемы выбросов не всегда пропорциональны площадям, пройденным огнем. Так, например, в июле 2010 г. площадь пожаров на Европейской части территории России составляла 4.346 тыс. км<sup>2</sup>, что было меньше по сравнению с июлем 2011 (6.878 тыс. км<sup>2</sup>), в то время, как объемы эмиссий CO<sub>2</sub>, CO в июле 2010 г. (93.123 млн т и 0.598 млн т соответственно) были больше, чем в июле 2011 г. (1.789 и 0.327 млн т соответственно) (см. рис. 5а, б, в). При этом выбросы PM<sub>2.5</sub> были примерно пропорциональны площадям пожаров (см. рис. 5а, г).

В Сибирском Федеральном округе при относительно больших площадях, пройденных огнем



**Рис. 9.** Карты с распределением общего содержания угарного газа (CO) на территории Северной Евразии, построенные по данным спектрометра AIRS (спутник AURA): *а* – в августе 2010 г.; *б* – в мае 2011 г.; *в* – в августе 2012 г.; *г* – в августе 2013 г.

(от 6.847 до 23.19 тыс. км<sup>2</sup>), в апреле–мае 2010–2014 гг. (см. рис. 6а), объемы газовых и аэрозольных эмиссий в эти месяцы были незначительными (см. рис. 6б, в). В то время как летом (июль–август 2010–2014 гг.) объемы эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> были приблизительно пропорциональны площадям пожаров (см. рис. 6). Это может быть связано с тем, что весной большинство пожаров возникает на юге данного региона, где преобладает редколесье с нераспустившейся листвой, для которых характерны относительно низкие значения эмиссионных коэффициентов.

Характер распределений по месяцам площадей, пройденных огнем, а также объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub>, полученных по данным космического мониторинга на всей территории Российской Федерации, наиболее схож с аналогичными распределениями для Сибирского Федерального округа (сравнить рис. 4 и рис. 6). Это свидетельствует о том, что определяющую роль во вкладе в общие объемы эмиссий углеродосодержащих газов и мелкодисперсного аэрозоля вносят boreальные леса, являющиеся наиболее характерным видом растительности в Сибирском Федеральном округе.

На рис. 9 в качестве примеров приведены карты с пространственными распределениями общего содержания угарного газа (CO) над территорией Северной Евразии в августе 2010 г. (*а*), в мае

2011 г. (*б*), в августе 2012 г. (*в*) и в августе 2013 г. (*г*), полученные по данным спектрометра AIRS, установленного на спутнике AURA (Бондур, Крапивин, 2014). Эти карты построены на основании информации, содержащейся в базе данных NASA ([www.disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/ogc\\_wms/wxs\\_ogc.shtml](http://www.disc.sci.gsfc.nasa.gov/services/ogc_wms/wxs_ogc.shtml)).

Анализ карт, приведенных на рис. 9, показывает, что области максимальных концентраций общего содержания CO соответствуют регионам, в которых в соответствующие периоды времени происходили наиболее интенсивные пожары, а следовательно, и максимальные объемы эмиссий CO от них. В августе 2010 г. наиболее интенсивные пожары происходили в Европейской части территории России. Для этого месяца, по результатам космического мониторинга, обнаружены максимальные площади, пройденные огнем (см. рис. 5а), и значительные объемы эмиссий CO от природных пожаров (см. рис. 5б), а также большое общее содержание угарного газа, выявленное по данным аппаратуры AIRS. Подобным образом области максимальных распределений общего содержания CO, выявленных по данным этого прибора для территорий Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов (см. рис. 9б, в, г), хорошо соответствует большим площадям, пройденным огнем, и существенным объемам эмиссий CO от природных пожаров, полученным по ре-

зультатам космического мониторинга (см. рис. 6а, в и рис. 7а, в).

На основании результатов обработки данных, полученных при космическом мониторинге, установлено, что для всей территории России общая площадь природных пожаров составила: 86.9 тыс. км<sup>2</sup> в 2010 г.; 92.4 тыс. км<sup>2</sup> в 2011 г.; 129.6 тыс. км<sup>2</sup> в 2012 г.; 44.5 тыс. км<sup>2</sup> в 2013 г.; 99.7 тыс. км<sup>2</sup> в 2014 г. Объемы эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> составили соответственно: 156.1, 10.9 и 0.64 млн т в 2010 г.; 299.5, 16.45 и 2.75 млн т в 2011 г.; 591.9, 32.8 и 4.89 млн т в 2012 г.; 150.5, 8.32 и 2.57 млн т в 2013 г.; 280.5, 17.7 и 2.0 млн т в 2014 г. Для всей территории страны максимальные площади пожаров и максимальные значения объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и аэрозолей PM<sub>2.5</sub> за исследуемый период были обнаружены в 2012 г.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы особенности формирования эмиссий вредных газов (прежде всего двуокиси CO<sub>2</sub> и монооксида СО углерода), а также мелкодисперсных аэрозолей (PM<sub>2.5</sub>) в атмосферу Земли в процессе природных (лесных, торфяных, степных) пожаров.

Описаны методика и средства космического мониторинга для оперативного обнаружения природных пожаров, оценки площадей выгоревших территорий и объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и аэрозолей в воздушную среду. Для проведения мониторинга использовались средства космической системы НИИ «АЭРОКОСМОС», основными отличительными особенностями которой являются: высокая частота обзора одного и того же района на всей территории Российской Федерации и близлежащих стран (30–35 раз в сутки); высокая скорость обработки поступающей информации (~10 м); высокая точность и достоверность обнаружения источников возгорания при минимальных значениях ложных тревог; возможность совместного использования обзорной (с пространственным разрешением ~1 км) и детальной (разрешение 2.5...30 м) космической информации; возможность анализа пожароопасности территорий за счет формирования карт распределения температурных аномалий; обеспечение достоверных оценок объемов эмиссий вредных газов и аэрозолей, поступающих в атмосферу в процессе природных пожаров.

На основании обработки результатов космического мониторинга природных пожаров получены распределения по месяцам площадей, пройденных огнем, и объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> на всей территории Российской Федерации, а также на территориях Европейской части России, Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов за период с 2010 по 2014 г. Ана-

лиз этих результатов показал, что распределения по месяцам площадей пожаров, а также объемов эмиссий углеродосодержащих газов и аэрозолей, как правило, имеют два характерных максимума: в весенние месяцы (апрель–май) и в самые жаркие летние месяцы (июль–август). Хотя для территории Дальневосточного Федерального округа эти распределения с апреля по август более равномерны.

Распределения объемов эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> далеко не всегда пропорциональны площадям, пройденным огнем. Так, в Сибирском Федеральном округе при относительно больших площадях, пройденных огнем в апреле–мае 2010–2014 гг., объемы газовых и аэрозольных эмиссий в эти месяцы были незначительными. В то время как летом (июль–август) объемы эмиссий CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> приблизительно пропорциональны площадям выгоревших территорий. Это может быть связано с тем, что весной большинство пожаров возникает на юге данного региона, где преобладает редколесье с нераспустившейся листвой, для которых характерны относительно низкие значения эмиссионных коэффициентов.

Характер распределений по месяцам площадей пожаров, а также объемов эмиссий углеродосодержащих газов и аэрозолей на всей территории Российской Федерации наиболее схож с характером аналогичных распределений для Сибирского Федерального округа, где преобладают бореальные леса. Это свидетельствует о максимальном вкладе такого типа растительности в эмиссии CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> при природных пожарах.

За период 2010–2014 гг. наибольшие площади, пройденные огнем, (129.6 тыс. км<sup>2</sup>) и максимальные объемы эмиссий CO<sub>2</sub> (591.9 млн т), CO (32.8 млн т) и PM<sub>2.5</sub> (4.89) для всей территории Российской Федерации были зарегистрированы в 2012 г.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности методов, технологий и средств космического мониторинга для оперативного обнаружения природных пожаров и оценки объемов вызываемых ими эмиссий углеродосодержащих газов и аэрозолей в воздушную среду.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58614X0004).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011а. № 3. С. 3–13.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг природных пожаров // Вестн. РФФИ. 2011б. № 2–3. С. 78–94.
- Бондур В.Г.* Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестн. Отд. наук о Земле РАН. 2010а. Т. 2. NZ11001
- Бондур В.Г.* Спутники в борьбе с огнем // Российский космос. 2010. № 12. С. 2–8.

- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исслед. Земли их космоса. 2014. № 1. С. 4–17.
- Бондур В.Г.* Современные подходы к обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений // Мат. науч.-техн. конф. “Гиперспектральные приборы и технологии”. 17–18 января 2013. Красногорск, 2013. С. 14–18.
- Бондур В.Г.* Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. высш. уч. завед. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. № 2. С. 14–38.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф.* Космический мониторинг тропических циклонов. М: Научный мир, 2014. 508 с.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. высш. уч. завед. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Лонский И.И., Остапенко Е.А.* Модель видеобазы для обеспечения экологического мониторинга // Изв. высш. уч. завед. Геодезия и аэрофотосъемка. 1993. № 1–2. С. 147–159.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Кондратьев К.Я., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и предсказание природных катастроф // Пробл. окруж. среды и прир. ресурсов. 2004. № 9. С. 2–15.
- Борисенков Е.Л., Пасецкий В.М.* Тысячелетняя летопись необычайных явлений природы. М.: Мысль, 1988. 522 с.
- Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В.* // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 1–11.
- Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.Н.* Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
- Гинзбург А.С., Губанова Д.П., Минашкин В.М.* Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат // Рос. хим. журн. 2008. Т. LIІ. № 5. С. 113–117, URL: <http://www.chem.msu.su/rus/jvho/2008-5/112.pdf>
- Исаев А.С., Коровин Г.Н., Сухих В.И.* Экологические проблемы поглощения углекислого газа посредством лесовосстановления и лесоразведения в России: Аналитический обзор. М.: Центр экологической политики России, 1995. 155 с.
- Савин А.И., Бондур В.Г.* Научные основы создания и диверсификации глобальных аэрокосмических систем // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 1. С. 46–62.
- Шведенко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКалум И., Лакида И.П.* Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. РАН. 2011. Т. 441. № 4. С. 544–548.
- Andreae M.O., Merlet P.* Emission of trace gases and aerosols from biomass burning // Glob. Biogeochem. Cycles. 2001. V. 15. № 4. P. 955–966.
- Bondur V.G.* Importance of Aerospace Remote Sensing Approach to the Monitoring of Nature Fire in Russia // Int. Forest Fire News (IFFN). № 40 (July-December 2010). P. 43–57.
- Cahoon Jr. D.R., Stocks B.J., Levine J.S. et al.* Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. № D9. P. 18627–18638.
- Chang D., Song Y.* Estimates of biomass burning emissions in tropical Asia based on satellite-derived data // Atm. Chem. and Phys. 2009. V. 9. P. 19599–19640.
- Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J. et al.* Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // Clim. Change. 2002. V. 55. № 1–2. P. 197–211.
- Ginzburg A.S.* Some Atmospheric and Climatic. Effects of Nuclear War // Ambio XVIII. 1989. № 7. P. 384–390.
- Kasischke E.S. et al.* Influences of boreal fire emissions on Northern Hemisphere atmospheric carbon and carbon monoxide // Glob. Biogeochem. Cycles. 2005. V. 19. GB1012. doi:10.1029/2004GB002300.
- Seiler W., Crutzen P.J.* Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from biomass burning // Clim. Change. 1980. V. 2. № 3. P. 207–247.
- Ward D.E.* Review of smoke components // Health hazards of smoke: recommendations of the April 1997 Consensus Conf. / Ed. Brian Sharkey. Tech. Rep. 9751-2836-MTDC. Missoula, MT: U.S. Dep. of Agriculture, Forest Service, Missoula Technol. and Developm. Center. 1997. P. 17–28.
- Zev Levin, William R. Cotton* (eds.), 2009. Aerosol Pollution Impact on Precipitation: A Scientific Rev. Springer Science. Business Media B.V. 2009. C. 3. P. 47.

## Space-Borne Monitoring of Trace Gas and Aerosol Emissions During Wildfires in Russia

V. G. Bondur

*AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow*

The aspects of the formation of carbon-containing gas and fine aerosol emissions into the atmosphere during wildfires are analyzed. On-line space-borne monitoring system and methods used for assessment of burned areas and volumes of CO<sub>2</sub>, CO и PM<sub>2.5</sub> emissions during wildfires are described. The results of space-borne monitoring of wildfires are given; burned areas and volumes of carbon-containing gas and aerosol emissions throughout the entire territory of the Russian Federation and its regions for different months over a period covering 2010–2014 are assessed. The aspects of seasonal frequencies of wildfires and volumes of harmful gas and fine aerosol emissions across studied areas are identified.

**Keywords:** space-borne monitoring, remote sensing, emission, trace gases, aerosols, wildfires