

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ¹

Бондур В.Г.²

Обоснована актуальность и необходимость использования космических методов и технологий для оперативного обнаружения природных пожаров и оценки их негативных последствий. Проанализированы причины возникновения этих опасных природных явлений. Рассмотрены существующие спутниковые системы обнаружения пожаров и особенности космической системы оперативного мониторинга, созданной в НИИ «АЭРОКОСМОС». Продемонстрированы возможности космических методов для оперативного обнаружения очагов возгораний, определения площадей, пройденных огнем, и оценки эмиссии вредных газов в атмосфере. Приведены примеры, обнаружения из космоса природных пожаров на территории Российской Федерации. Показано, что их интенсивность зависит от высокой температуры окружающей среды. Установлено, что в первую декаду августа 2010 г. ежедневные эмиссии угарного газа от природных пожаров достигали 15–27 тыс. тонн для Европейской части России и 3–7,5 тыс. тонн для Московской области.

Ключевые слова: космический мониторинг, дистанционное зондирование, природные пожары, спутниковые системы, эмиссии угарного газа.

На территории Российской Федерации ежегодно возникает от 10 до 40 тысяч природных пожаров (лесных, степных, торфяных). Площади, пройденные огнем, ежегодно составляют от 2 до 11 млн. гектаров [Бондур 2010а, б, 2011]. Высокая

There have been based the urgency and necessity of the satellite methods and technologies for operating detection of wildfires and their aftermath estimation. Origins of such dangerous natural events have been analyzed. Existing satellite systems were described here, particular qualities «AEROCOSMOS» satellite system for online fire monitoring have been given. The satellite method potentialities for operating detection of inflaming focus, burned areas and emissions of hazardous gases to atmosphere have been showed. The examples of wildfires on the territory of Russian Federation detected by satellite system are given. It is shown that intensity of wildfires depends on the atmosphere temperature. There have been determined that in the first decade in August 2010 daily emissions of carbon monoxide achieved 15–27 thousand tons for the European part of Russia and 3–7.5 thousand tons for Moscow region.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, wildfires, satellite systems, emissions of carbon monoxide.

интенсивность природных пожаров, во многом зависящая от погодных условий, характерна не только для различных регионов нашей страны, но и других стран. Это наглядно продемонстрировали события летом 2010 г., когда когда летом

¹Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Госконтракты №16.515.11.5028 и №02.527.12.0007).



²

Бондур Валерий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, академик РАН, директор Научно-исследовательского института аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», e-mail: vgbondur@aerocosmos.info.

в Европейской части России происходили чрезвычайно сильные пожары, которые привели к крайне негативным последствиям. От природных пожаров погибло 60 человек. Сгорело 2.5 тыс. домов в почти 150 населенных пунктах. Свыше 3.5 тыс. человек осталось без кровла. Летом 2010 г. в течение нескольких дней были задымлены многие города и населенные пункты, в том числе столица России г. Москва. Пожары парализовали работу аэропортов, автомобильных дорог, приводили к отключению линий электро-передач и электрических подстанций, угрожали стратегически важным объектам, в том числе Российскому Федеральному ядерному центру в г. Сарове. Они нанесли серьезный ущерб лесному фонду и сельскому хозяйству. Огромное количество вредных газовых компонент и аэрозолей, выделившихся в процессе горения лесов, травы и торфяников, попали в воздушную среду, нанося ущерб здоровью людей и загрязняя атмосферу [Бондур 2010а, б, 2011]. Аналогичные ситуации складывались на Европейской части нашей страны в 2002 и 1972 гг. и в другие годы.

Из-за особенностей пространственного распределения температурных аномалий летом 2011 г. большое количество природных пожаров происходило в Сибири и на Дальнем Востоке нашей страны, в то время как в Европейской части страны в 2011 г. пожаров было значительно меньше, по сравнению с 2010 г.

Для эффективной борьбы с этими опасными природными явлениями необходимо получение и предоставление оперативной информации об очагах пожаров и площадях, пройденных огнем, а также оценка их негативных последствий, в том числе определение эмиссий в атмосферу вредных газов воздействующих на окружающую среду и здоровье людей. Для этого должны использоваться самые современные методы и технические средства, важное место среди которых занимают инновационные космические методы, технологии и системы мониторинга.

Причины возникновения и последствия природных пожаров

Пожарная опасность территорий определяется влажностью напочвенного и растительного покрова, которая зависит от температуры окружающей среды. При влагосодержании отмершей растительности, мхов, лишайников

и других проводников горения менее 25% создаются благоприятные условия для возникновения и распространения низовых пожаров. Одновременно при влажности крон деревьев менее 80% возникает серьезная угроза перехода низовых пожаров в верховые, которые являются наиболее опасными как с точки зрения скорости распространения пожара (от 3 до 100 м/мин и более), так и с точки зрения уничтожения лесной флоры и фауны [Воробьев и др. 2004; Исаев и др. 1995; Бондур 2011].

В жаркие, засушливые периоды частота возникновения пожаров значительно возрастает. Связь аномальной жары и засух с большим количеством природных пожаров подтверждают известные современным поколениям события, произошедшие в 1972, 2002 и 2010 гг. Это подтверждают и исторические факты. Сведения о засухах и сильных лесных пожарах в XVIII и XIX веках содержится во многих исторических документах, в сохранившихся переписках известных людей и периодических журналах того времени. Из сохранившихся летописных сведений следует, что вспышки интенсивностей пожаров в прошлом приходились на периоды засух. Например, Сузdalская летопись сообщает, что в 1223 и 1298 гг. на территории России были засухи и бушевали сильные лесные и торфяные пожары. Никоновская и Новгородская летописи упоминают о засухах и лесных пожарах в XIV-XVII веках, сопровождавшихся голодом среди населения и большими потерями среди диких животных.

Основными причинами возникновения природных пожаров является деятельность человека (более 79 %), причем главным виновником (~70 %) является само население. От сельхоззапалов, по вине лесозаготовителей, от сжигания порубочных остатков, по вине экспедиций и транспортных систем возникает ~9.1% пожаров. От природных факторов (молнии) возникает чуть более 13 % пожара. Остальная часть пожаров возникает по невыясненным причинам [Бондур 2010 а, б. 2011; Воробьев и др. 2004].

Природные пожары представляют собой опасные стихийные бедствия, так как они уничтожают большие материальные ценности (лесной фонд), в них гибнут животные и птицы, огонь может распространяться на населенные пункты, промышленные предприятия,

угрожать людям, жилым домам, объектам энергетики, транспорта, стратегически важным объектам и др. Лесные, степные и торфяные пожары задымляют большие пространства, изменяют химический состав атмосферного воздуха за счет эмиссий различных малых газовых компонентов, что приводит также к изменению концентрации озона. Увеличение эмиссии CO, CO₂ и других парниковых газов влияет на климат планеты [Бондур и др. 2009; Бондур 2010 а, б. 2011; Воробьев и др. 2004]. Крупные лесные пожары снижают стоки атмосферного углерода. За сезон вегетации растений поток депонированного из атмосферы углерода за счет фотосинтеза может достигать величин 80—130 ГС/м² [Исаев и др. 1995; Бондур и др. 2009]. Снижение биомассы вследствие пожаров приводит к снижению аккумулирования углерода из атмосферы. При этом из-за пожаров происходит трансформация лесов в источники углерода за счет прямых выбросов при сгорании биомассы и косвенных воздействий пожаров на тепловой и водный режимы, а также на структуру и функционирование экосистем [Исаев и др. 1995].

Пожары приводят к частичной ликвидации растительного покрова и к понижению альбедо поверхности почвы (последнее обуславливает повышение температуры поверхности и усиление скорости разложения остатков растительности). Они прерывают процессы накопления органического вещества почвы и изменяют баланс между поступлением детрита и гетеротрофным дыханием. Пожары порождают изменения сукцессии растительности и состава ее видов, а также качества подстилки [Исаев и др. 1995].

В то же время лесные пожары играют значимую роль в формировании лесных экосистем. Они являются неотъемлемым элементом их развития. Известно, что возобновление сосновых лесов после пожаров осуществляется более легко и быстро по сравнению с местами вырубок. Кроме того, обнаружено возрастание продуктивности лесных экосистем после пожаров. Восстановление лесных сообществ зависит от частоты и интенсивности пожаров. В таежных лесах Сибири относительно частые пожары невысокой интенсивности вызывают изменения возраста и качества древостоев. Установлено, что пожары являются необходимым элементом для поддержания биоразнообразия. Регенерация лесных

экосистем после пожаров зависит от многих факторов (климатических, почвенных, состава горных пород, рельефа и т.д.). В лиственничных лесах Сибири, там, где развита вечная мерзлота, кустарниковый и травяно-кустарниковый ярусы восстанавливаются после пожара через 4—5 лет, а мхи и лишайники значительно медленнее [Исаев и др. 1995; Бондур и др. 2009; Бондур 2011].

Таким образом, проблема природных пожаров имеет две стороны — отрицательную и положительную. Отрицательная сторона связана с экономическими потерями для человека, угрозами для его жизни, объектам техносферы, явным ущербом лесному фонду, снижением способности к депонированию углерода и возрастанием эмиссий газовых и аэрозольных продуктов горения и др. Положительный аспект связан с эволюционной ролью лесных пожаров. Следует отметить, что потери лесного хозяйства от пожаров значительно превышают расходы на охрану и восстановление лесных ресурсов.

Это свидетельствует о том, что необходимо проводить детальный анализ последствий природных пожаров и осуществлять поиск стратегии их контроля.

Основными факторами, определяющими эффективность борьбы с природными пожарами, являются оперативность обнаружения и своевременность подавления их очагов, особенно на ранних стадиях [Воробьев 2004; Бондур 2010а, б; 2011]. Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование космических систем мониторинга, оснащенных широким спектром современной аппаратуры дистанционного зондирования [Бондур 1995, Бондур и др. 2009; Бондур 2010а, б, 2011; Савин, Бондур 2000].

Спутниковые системы мониторинга пожаров

Актуальность и целесообразность применения инновационных космических методов, технологий и средств мониторинга природных пожаров обусловлена необходимостью представления оперативной информации об этих опасных явлениях, угрожающих жизни людей, лесному и сельскому хозяйству, жилому фонду, объектам техносферы и приводящим к негативным воздействиям на воздушную среду городов, населенных пунктов, отдельных регионов и планеты в целом. Современные методы, технологии

и средства космического мониторинга обладают большой обзорностью, возможностью работы в любых труднодоступных районах, обеспечивают получение информации в широком диапазоне пространственных масштабов с высоким временным разрешением, обладают высокой оперативностью и достоверностью получения данных, а также относительной дешевизной информации (особенно при работе на больших площадях) [Бондур 1995; Бондур и др. 2009].

Для слежения за пожарами спутниковую информацию используют различные высоко развитые страны, прежде всего, США, Канада, страны ЕС. Для Российской Федерации, имеющей огромную площадь (~ 17.1 млн. км 2), множество труднодоступных территорий и большие площади лесных массивов, использование космической информации для раннего обнаружения и оценки последствий природных пожаров особенно актуально.

В настоящее время в Российской Федерации и за рубежом существует ряд космических систем, используемых для мониторинга природных пожаров. За рубежом применяются: система FIRMS (США); европейская информационная система лесных пожаров (EFFIS); канадские системы мониторинга пожаров (CWFIS и Fire M3). В России используется: Информационная система дистанционного мониторинга пожарной опасности ИСДМ-Рослесхоз, созданная ФГУ «Авиалесоохрана» совместно с Институтом космических исследований РАН и НИЦ «Планета», средства космического мониторинга МЧС России и Инженерно-технического центра «Сканекс», а также Система космического мониторинга пожаров (СКМ) «АЭРОКОСМОС», созданная в НИИ «АЭРОКОСМОС» [Бондур и др. 2009; Бондур 2010 а, б, 2011].

Обнаружение очагов пожаров обычно осуществляется с помощью ИК-радиометров, входящих в состав бортовых комплексов ряда спутниковых систем. Алгоритмы обнаружения основаны на регистрации радиационной температуры в спектральном диапазоне 3,5...3,7 мкм и разности радиационных температур в этом канале и в спектральном канале $\sim 11,0$ мкм [Бондур 2011; Бондур и др. 2009].

В космических системах обнаружения пожаров используются, как правило, спутники серий NOAA, оборудованные радиометрами AVHRR

с пространственным разрешением ~ 1 км и полосой обзора – 3 000 км (канадские системы SWFIS и Fire M3), а также спутники TERRA и AQUA космической системы EOS с установленными на них радиометрами MODIS с пространственным разрешением 250, 500, 1 000 м и полосой обзора 2 330 км [Roy et al. 2008] (американская система FIRMS, европейская система EFFIS, а также средства МЧС России и «Сканекс»).

Космические системы ИСДМ-Рослесхоз и СКМ «АЭРОКОСМОС» используют группировки этих спутников совместно [Щетинский и др. 2008; Бондур 2010 а, б, 2011]. При этом в космической системе «АЭРОКОСМОС» кроме данных, поступающих со спутников NOAA, TERRA и AQUA, используются также данные, поступающие со спутника Метеор-М, а также со спутников среднего и высокого разрешения LANDSAT, SPOT-5, RapidEye и др. Все перечисленные спутниковые системы, кроме системы «АЭРОКОСМОС» регистрируют все тепловые аномалии, не отделяя природные пожары от других «горячих» источников сигналов. В системе «АЭРОКОСМОС» осуществляется селекция природных пожаров от других тепловых аномалий.

Поэтому из всех перечисленных космических систем наиболее предпочтительной для оперативного обнаружения и анализа последствий природных пожаров является система «АЭРОКОСМОС». С помощью этой системы проводится оперативный космический мониторинг для раннего обнаружения, верификации, прогноза динамики развития и оценки последствий природных пожаров, а так же для оперативного формирования и передачи заказчикам различной информации об этих природных катализмах.

Главные преимущества системы «АЭРОКОСМОС» связаны с [Бондур 2010 а, б, 2011]:

- комплексным использованием большего числа космических аппаратов, оборудованных как обзорной аппаратурой с разрешением (250 м – 1 км), так и приборами среднего (15 – 90 м) и высокого (2...6,0 м) пространственного разрешения, функционирующими в различных участках видимого и ИК-диапазонов спектра;

- использованием специально разработанных методов и технологий оперативного автоматического сбора, обработки и анализа космических и других данных, для обнаружения и оценки масштабов и последствий природных

пожаров;

- обеспечением возможности прогноза их развития;
- устранением многочисленных ложных источников тепловых аномалий (газовые факелы, «горячие» производства, блики от металлических крыш, воды серебристых облаков и т.п.);
- возможностью оперативного представления информации о пожарах различным потребителям в виде тематических слоев геоинформационных систем (ГИС).

Применяемые в этой системе методы и технологии разработаны НИИ «АЭРОКОСМОС» в процессе выполнения ряда специальных научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в рамках Федеральных целевых программ по заказу Минобрнауки России.

На рис. 1 приведена структурная схема проведения космического мониторинга природных пожаров, а на рис. 2 – блок-схема системы космического мониторинга НИИ «АЭРОКОСМОС».

В отличие от существующих космических



Рис. 1. Структурная схема проведения космического мониторинга природных пожаров

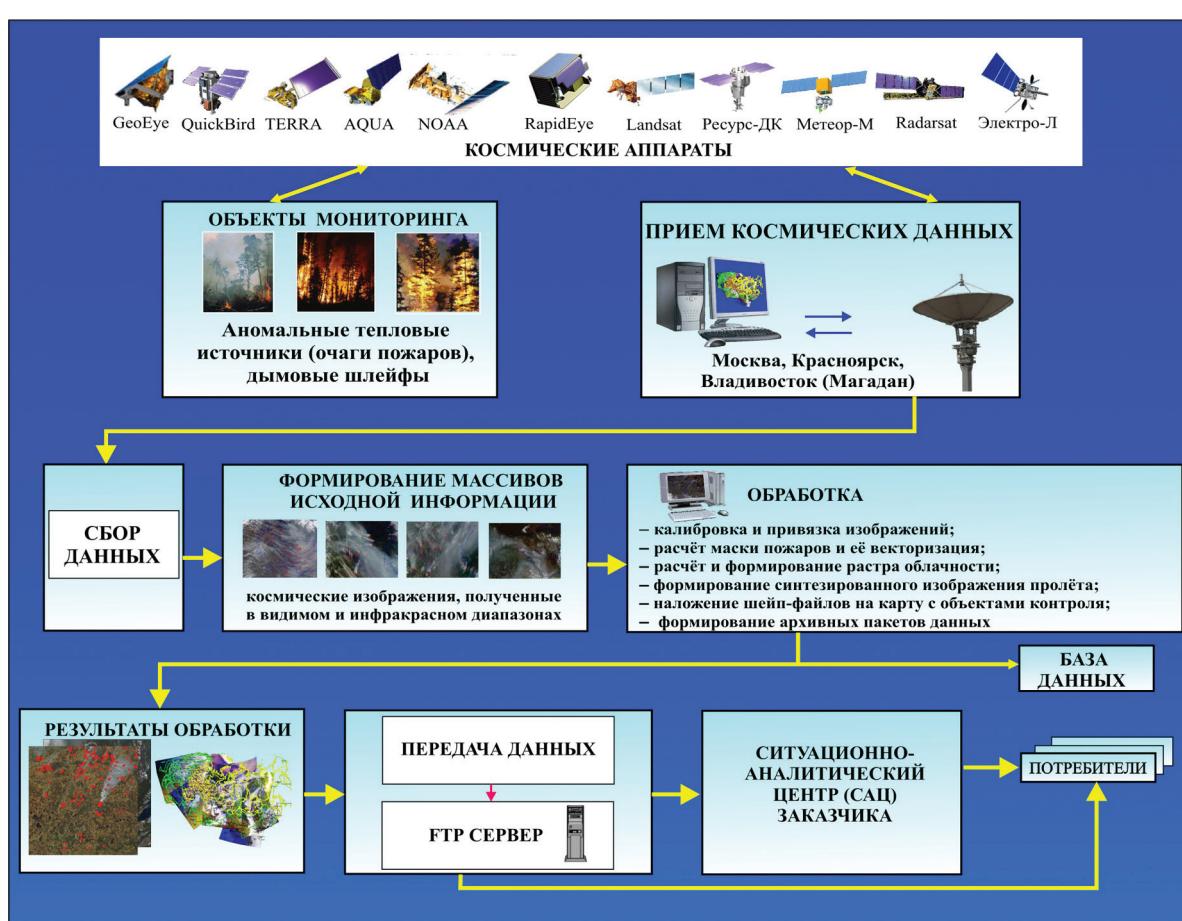


Рис. 2. Блок-схема системы космического мониторинга НИИ «АЭРОКОСМОС»

средств дистанционного обнаружения пожаров система оперативного космического мониторинга СКМ «АЭРОКОСМОС» обеспечивает:

- возможность оперативного непрерывного контроля всей территории Российской Федерации;
- высокую частоту обзора одного и того же района – 25 раз в сутки;
- полностью автоматическую работу в режиме оперативного обнаружения пожаров;
- сочетание обзорной (250...1000 м) и детальной (2...90 м) космической информации при обнаружении и оценке последствий пожаров;
- наиболее высокую из всех существующих космических систем точность и достоверность обнаружения пожаров (минимальный радиус регистрируемых очагов пожаров $\sim 5,5$ м, вероятность обнаружения: 0,95...1,0 в простых метеоусловиях и 0,7...0,8 в сложных метеоусловиях);
- минимальный уровень ложных тревог за счет использования специальных методов и технологий, позволяющих регистрировать верифицированные очаги природных пожаров;
- возможность оперативного (через 10 минут после приема космических данных) предоставления потребителям информации о пожарах и их последствиях;
- возможность прогнозирования развития пожаров;
- возможность быстрой адаптации предоставляемых данных к информационным ресурсам потребителей;
- разработку рекомендаций для принятия управлеченческих решений.

В состав системы космического мониторинга «АЭРОКОСМОС» входят:

- главный (в г. Москве) и два региональных (в Сибири и на Дальнем Востоке) Центра приема космической информации, поступающей с группировок спутников, оборудованных инфракрасной и многоспектральной оптической аппаратурой дистанционного зондирования;
- информационно-аналитический центр системы космического мониторинга (ИАЦ СКМ), расположенный в НИИ «АЭРОКОСМОС»;
- специальное программное обеспечение для оперативного автоматического сбора, обработки и хранения информации, а также формирования информационных продуктов и передачи данных.

Геоинформационное обеспечение

Средства связи, обеспечивающие оперативную передачу данных с региональных станций приема в ИАЦ СКМ, а также предоставление результатов мониторинга в Ситуационно-аналитические центры Заказчиков и локальным потребителям.

Система удовлетворяет фундаментальным принципам открытых систем: функциональная расширяемость, модернизируемость, интегрируемость информационных ресурсов. Она построена по территориально-распределенному принципу с размещением идентичных аппаратно-программных средств в трех наземных Центрах для обеспечения обзора всей территории страны [Бондар 1995, 2010 а, б, 2011; Савин, Бондар 2000].

Благодаря открытому принципу системного построения, СКМ «АЭРОКОСМОС» позволяет расширять свои функциональные возможности за счет привлечения других спутников и применения новых методов и технологий дистанционного зондирования (радиотепловые, радиолокационные, много и гиперспектральные методы), новые методы обработки данных для повышения надежности обнаружения при любых метеоусловиях, а также обеспечивать увеличение спектра решаемых задач.

На каждой наземной станции приема «сырые» космические данные поступают на вычислительные средства предварительной обработки, где происходит их радиометрическая коррекция, калибровка, пространственная привязка, полученных изображений и другие операции. После предварительной обработки информация передается на сервер хранения оперативных данных. В процессе работы СКМ с использованием алгоритмов и программного обеспечения, реализующих специальные технологии, разработанные в НИИ «АЭРОКОСМОС», производится тематическая обработка космических изображений, сформированных в ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн, выделяются тепловые аномалии, с использованием специальных методов устраняются ложные тепловые аномалии (блики, детерминированные тепловые источники и др.), верифицируются очаги природных пожаров на контролируемых территориях. Получаемые маски пожаров векторизуются. При этом на основании результатов обнаружения

очагов пожаров формируются атрибутивные таблицы шейп-файлов пожаров. Путем анализа многоспектральных космических данных создаются синтезированные изображения, позволяющие проводить оценку состояния облачного покрова, выявлять наличие и направления распространения дымовых шлейфов пожаров [Бондур 2010 а, б, 2011].

В ИАЦ СКМ формируются мозаики космических данных, принятых на всех трех наземных центров приема. Эти данные отображаются с использованием геобраузера Google Earth. При этом учитывается, что распределения яркости с различных проходов группировки спутников имеют различия. Поэтому они подвергаются специальному «яркостному выравниванию» для того, чтобы отдельные фрагменты мозаик имели минимальные отличия. Это позволяет обеспечить совместное отображение информации как с одного, так и с разных витков различных спутников [Бондур 2010 а, 2011].

Система оперативного космического мониторинга функционирует в различных режимах, определяемых регламентом. В процессе работы СКМ формируется следующая оперативная информация об очагах пожаров и облачных полях в пределах контролируемых территорий [Бондур 2010 а, 2011]:

- данные об обнаруженных очагах пожаров (координаты, вероятность правильного обнаружения, интенсивность, предварительная площадь выгорания и др.);
- синтезированные изображения земной поверхности в формате графических файлов JPEG с привязкой файлов (файл привязки JGW для JPG и в формате ESRI world file JGW) в проекции Albers Conical Equal Area;
- информация об облачности (маски облачности);
- информация о метеопараметрах;
- прогнозная информация о направлении распространения очагов пожаров в зависимости от метеоусловий;
- карты местности с наложенными шейп-файлами об очагах возгорания;
- файлы для отображения результатов мониторинга в геобраузере (формат KML);
- рекомендации для принятия решений.

Кроме того, формируются тематические слои ГИС, содержащие информацию об очагах пожаров в районе контролируемых объектов,

(например, ЛЭП, электрических подстанций, нефтепроводов, железных дорог, стратегических объектов, АЭС и др.), а также о площадях, пройденных огнем и проч.

Формируется также неоперативная информация с использованием космических изображений высокого разрешения и других спутниковых и наземных данных (относительное расположение полей температуры для контролируемых территорий, метеоданные, уточненные площади, пройденные огнем, объемы эмиссий газов, статистические и другие данные).

Результаты применения системы космического мониторинга «АЭРОКОСМОС»

На рис. 3 приведены примеры пожаров, обнаруженных из космоса на территории республики Якутии (Саха) 22 мая 2011 г. в 13ч.20мин. по московскому времени (а) и 24 мая 2011 г. в 12 часов 55 мин. (б). Эти примеры иллюстрируют высокую плотность и значительное задымление территории этого региона в конце мая 2011 г.

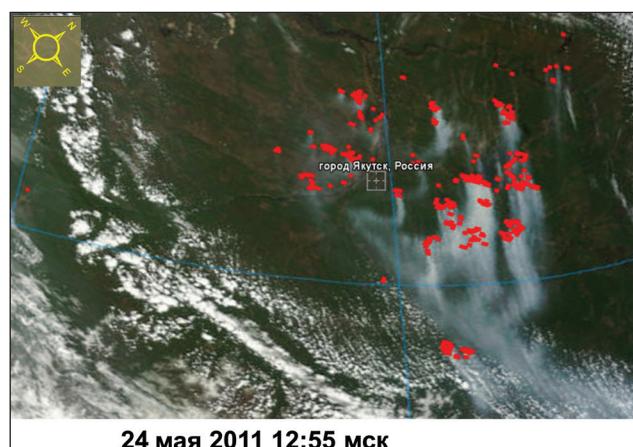
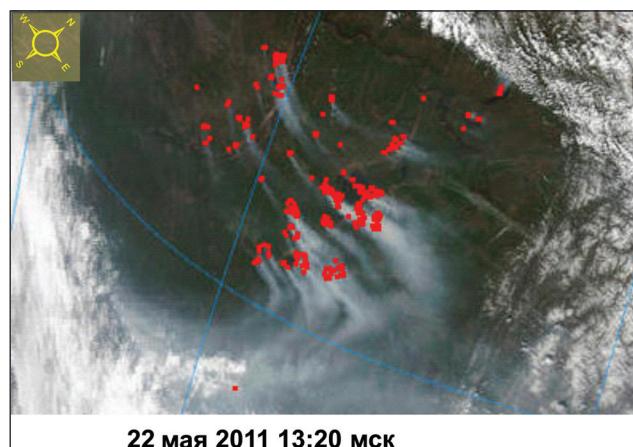


Рис. 3. Примеры пожаров, обнаруженных из космоса в Якутии в конце мая 2011 года

На рис. 4 и 5 в качестве примеров приведены мозаики космических изображений, сформированные 29 июля 2010 г., а также 25 и 26 июля 2011 г., с использованием геобраузера Google

Earth. На этих рисунках представлены также увеличенные фрагменты космических изображений с обнаруженными очагами пожаров и дымовыми шлейфами.

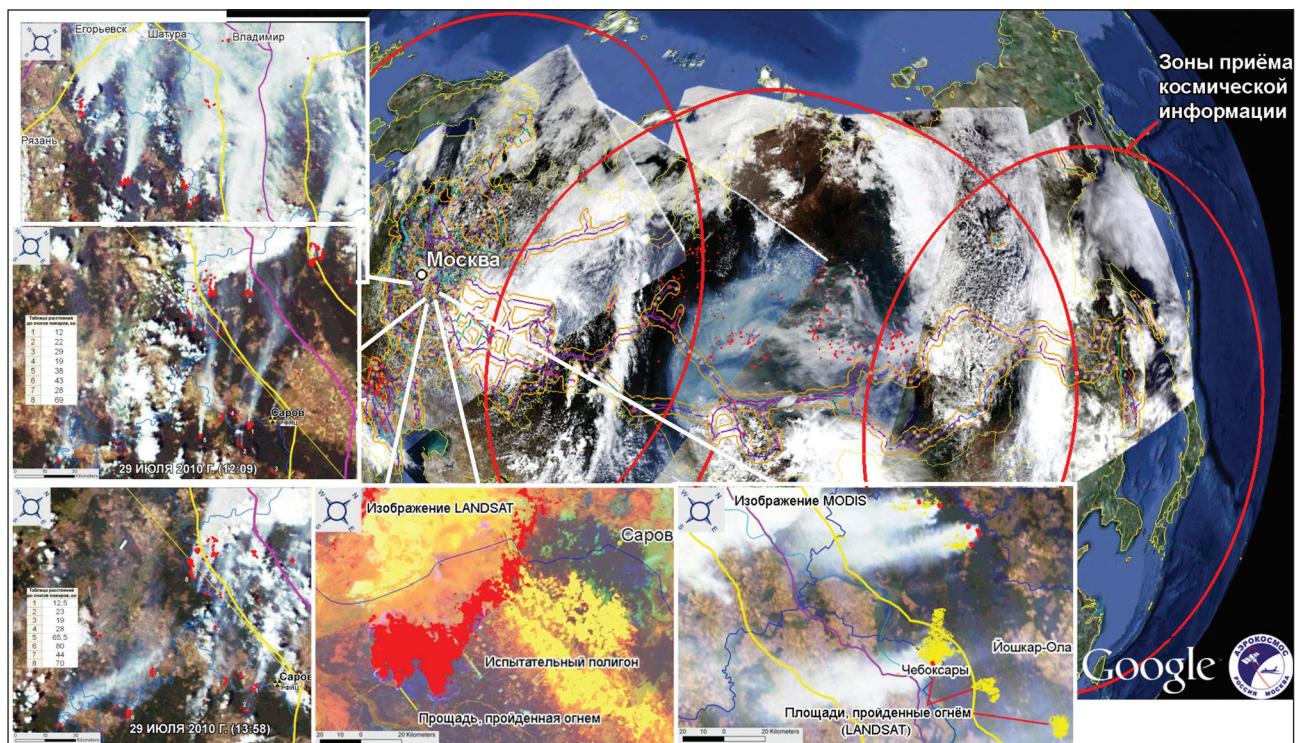


Рис. 4. Результаты оперативного космического мониторинга природных пожаров системой «АЭРОКОСМОС» в июле 2010 г.

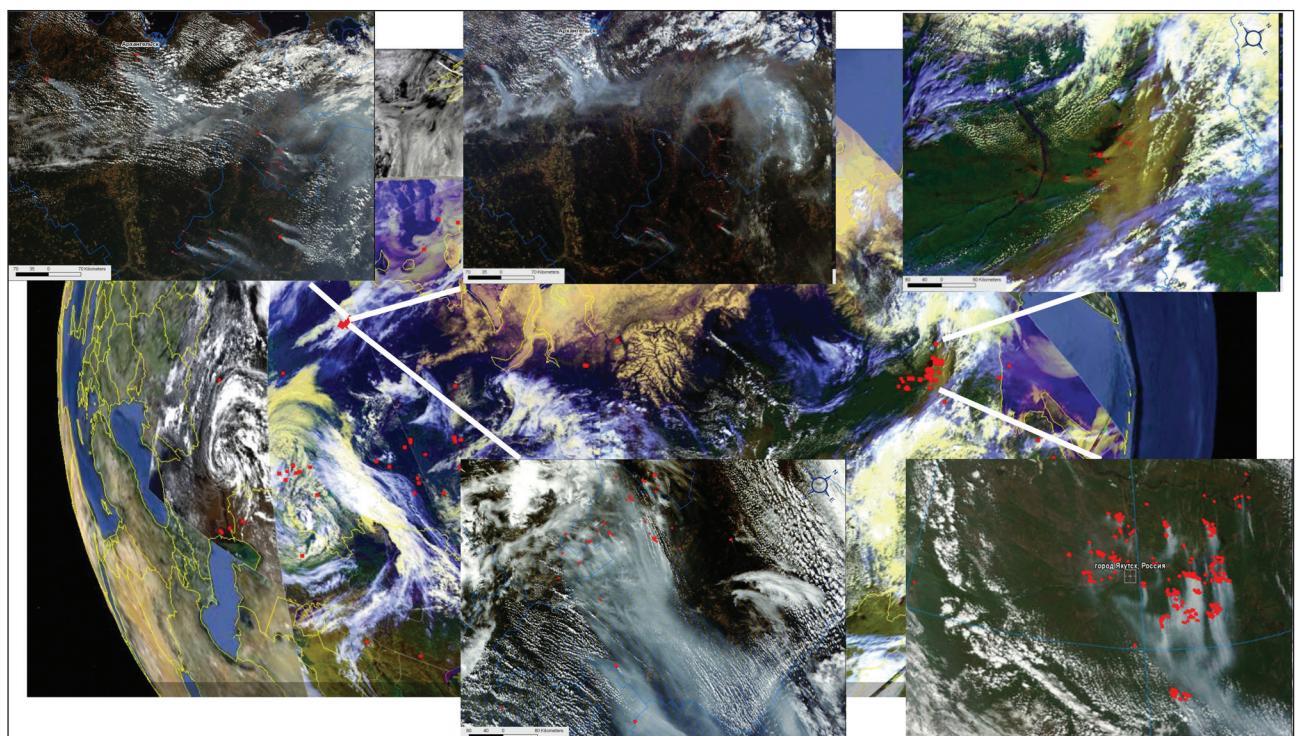


Рис. 5. Результаты оперативного космического мониторинга природных пожаров системой «АЭРОКОСМОС» 25 и 26 июля 2011 г.

На рис. 4 слева приведены увеличенные фрагменты, иллюстрирующие интенсивные пожары, происходившие в середине дня 29 июля 2010 г. во Владимирской, Рязанской, Московской и Нижегородской областях, а также показаны зоны приема космической информации тремя наземными станциями. Кроме того, на этом рисунке представлены фрагменты космических изображений среднего пространственного разрешения, полученные со спутника LANDSAT, на которых выделены площади, пройденные огнем в районе г. Саров и г. Чебоксары.

На рис. 6 иллюстрируется пример прогноза развития пожаров вблизи аэропорта г. Воронежа с учетом метеоусловий, в том числе скорости и направления ветра. Красными линиями выделены зоны возможных направлений развития пожаров, а желтыми – действительные траектории их распространения. Указаны также расстояния от действительных и прогнозируемых очагов пожаров до аэропорта.

На рис. 7 и 8 приведены результаты визуализации очагов пожаров, обнаруженных системой «АЭРОКОСМОС», которые регулярно де-

монстрируются на сайте <http://www.aerocosmos.info>. На рис. 7 приведен пример отображения очагов природных пожаров обнаруженных из космоса 25 мая 2011 г. для всей территории Российской Федерации и близлежащих стран.

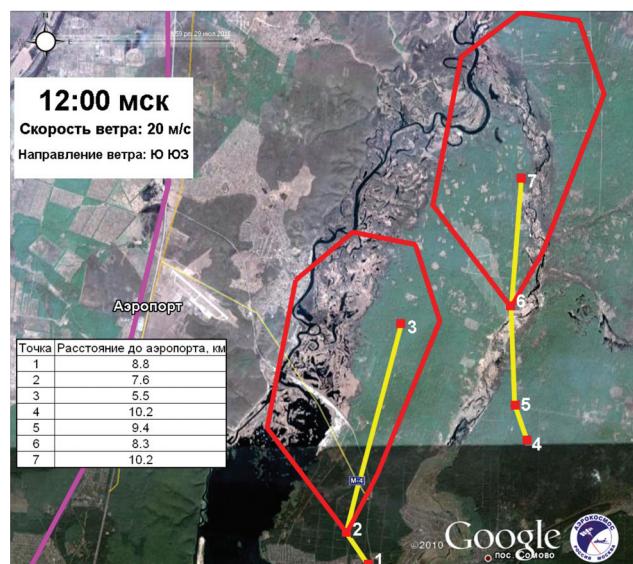


Рис. 6. Прогнозирование распространения пожаров в районе аэропорта г. Воронеж в зависимости от метеоусловий

ЛЭП

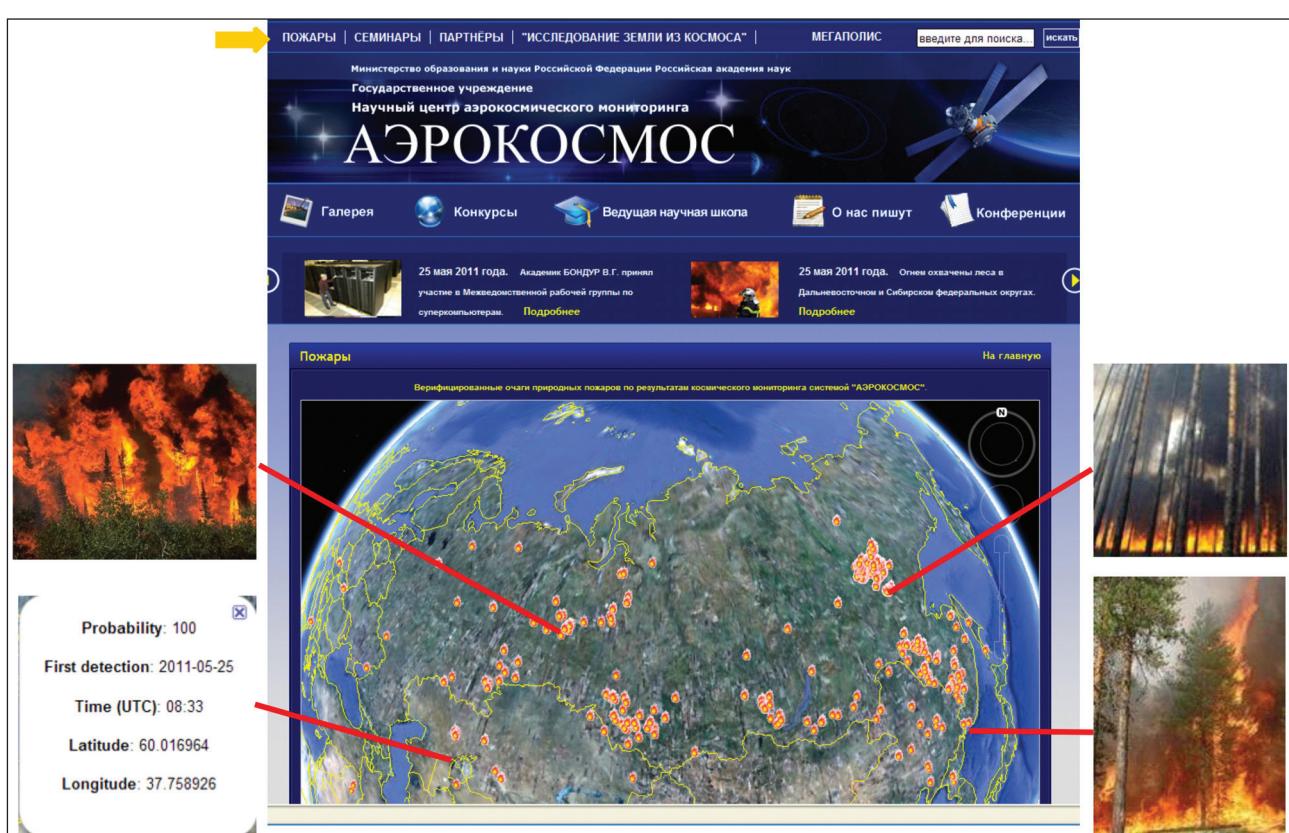


Рис. 7. Визуализация очагов пожаров, обнаруженных из космоса на всей территории России и представление их на сайте «АЭРОКОСМОС» (<http://www.aerocosmos.info/>)

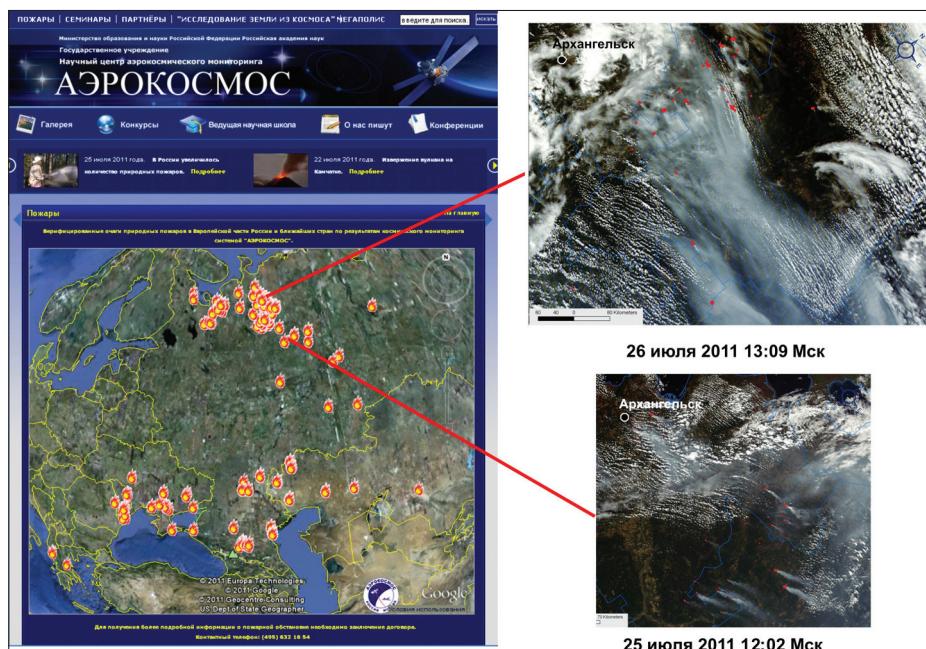


Рис. 8. Визуализация очагов пожаров, обнаруженных из космоса, на Европейской части территории России 25 и 26 июля 2011 года и представление их на сайте «АЭРОКОСМОС» (<http://www.aerocosmos.info/>)

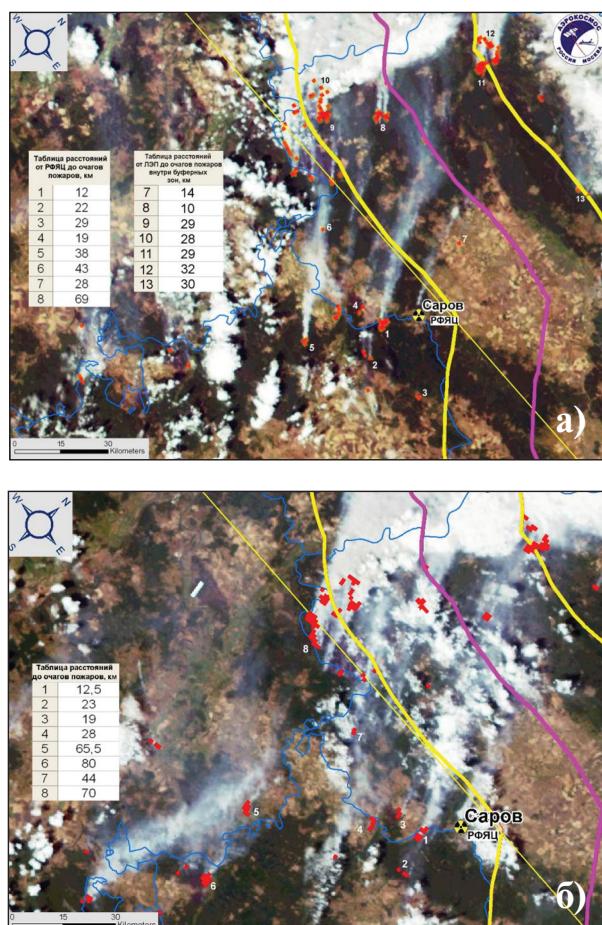


Рис. 9. Динамика развития пожаров, обнаруженных из космоса в районе г. Саров 29 июля 2010 г.
а) в 12 ч. 09 мин.; б) в 13 ч. 53 мин.

На этом рисунке в качестве примера представлен паспорт для одного из очагов пожаров, содержащий вероятность, дату обнаружения и время, а также координаты очага пожара. На рис. 8 приведен подобный пример визуализации очагов природных пожаров, обнаруженных из космоса 25 и 26 июля 2011 г. для Европейской части России и близлежащих стран, которые отображаются на сайте <http://www.aerocosmos.info/>.

На рис. 9 а, б представлена динамика развития пожаров, обнаруженных из космоса в районе г. Саров 29 июля 2010 г. в 12 часов 09 мин. (а) и в 13 часов 53 мин. (б) по московскому времени. На рис. 9 а приведены таблицы с указанием расстояний от очагов пожаров до магистральной линии передач (ЛЭП) и до Российского федерального ядерного центра (РФЯЦ). На рис. 9 б приведена таблица расстояний от очагов пожаров до ЛЭП. На этих рисунках показаны также буферные зоны ЛЭП. Анализ рис. 9 а, б показывает, что через 1 час 44 мин. обстановка с очагами пожаров и дымовыми шлейфами значительно изменилась, что свидетельствует о необходимости частого обновления данных о пожарах (в системе «АЭРОКОСМОС» это обеспечивается 25 раз в сутки).

На рис. 10 приведен фрагмент обзорного космического изображения, полученного (аппаратуру MODIS) 11 августа 2010 г. (2 ч. 27 мин.),

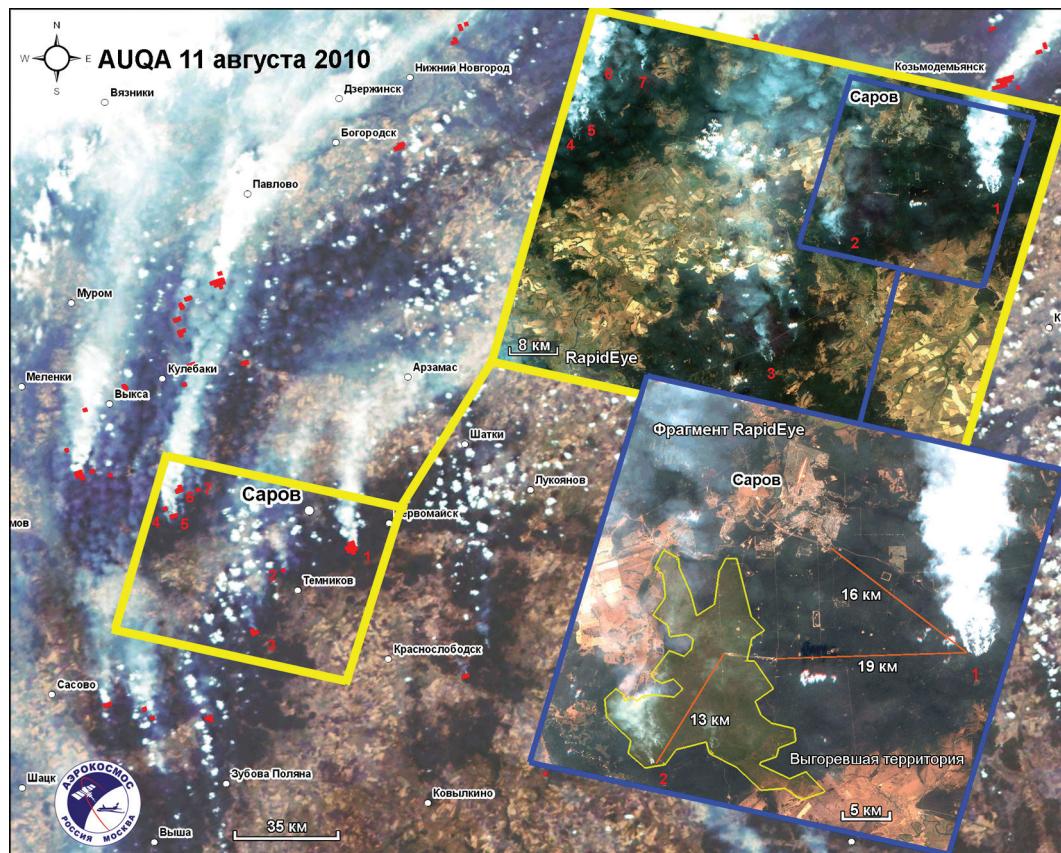


Рис. 10. Мониторинг пожаров вблизи Российского федерального ядерного центра (г. Саров) 11 августа 2010 г.

с выделенными очагами пожаров вблизи г. Саров. На рис. 10 иллюстрируются также фрагменты детальных космических изображений, полученных 11 августа 2010 г. вблизи г. Саров с борта спутника RapidEye (разрешение 6.5 м). На исходном изображении, полученном с борта этого спутника в видимом диапазоне, и на его увеличенных фрагментах отчетливо проявляются дымовые шлейфы от пожаров, обнаруженных и по обзорному ИК-изображению сформированному аппаратурой MODIS. На увеличенных фрагментах изображения, полученного спутником RapidEye, показана зона, пройденная огнем при пожарах, происходящих в предыдущие дни, а также расстояния от трех действующих пожаров до г. Саров и до экспериментального полигона РФЯЦ.

Природные пожары представляют реальную опасность объектам техносферы: линиям электропередач, электрическим подстанциям, трубопроводам, аэропортам, железным и автомобильным дорогам и др. На рис. 11 в качестве примера представлены результаты космического мониторинга, демонстрирующие динамику развития пожаров в Новгородской области

вблизи магистральных линий электропередач с 27 июня по 11 июля 2010 г. На этом рисунке показаны сами ЛЭП, а также стокилометровые буферные зоны в местах их расположения. По космическим данным внутри этих буферных зон отчетливо выявляются очаги природных пожаров и мощные дымовые шлейфы.

На рис. 12 иллюстрируются очаги пожаров и дымовые шлейфы, обнаруженные из космоса 30 июня 2010 г. (12 ч. 39 мин) в Нижегородской области и Республике Марий Эл. На этом рисунке показаны магистральные ЛЭП, магистральные нефтепроводы, а также их буферные зоны.

Анализ рис. 11 и 12 показывает, что очаги сильных природных пожаров, обнаруженных из космоса, расположены вблизи этих объектов техносферы и представляют для них реальную опасность.

На рис. 13 демонстрируются результаты обнаружения из космоса природных пожаров в Центральной части Европейской территории России 26 июля 2010 г. (в 11 час. 38 мин). Анализ этого рисунка показывает, что огромная территория была подвергнута в этот период времени интенсивному задымлению. Именно в этот день впервые за лето 2010 г. была задымлена столица России г. Москва.

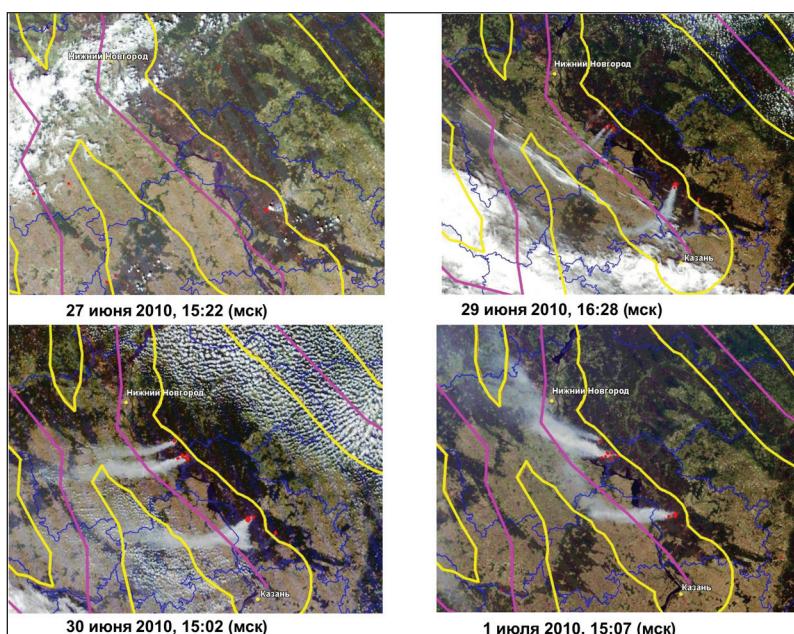


Рис. 11. Динамика развития пожаров в Новгородской области с 27 июня по 1 июля 2010 г., выявленных системой «АЭРОКОСМОС»

ЛЭП

Буферные зоны ЛЭП

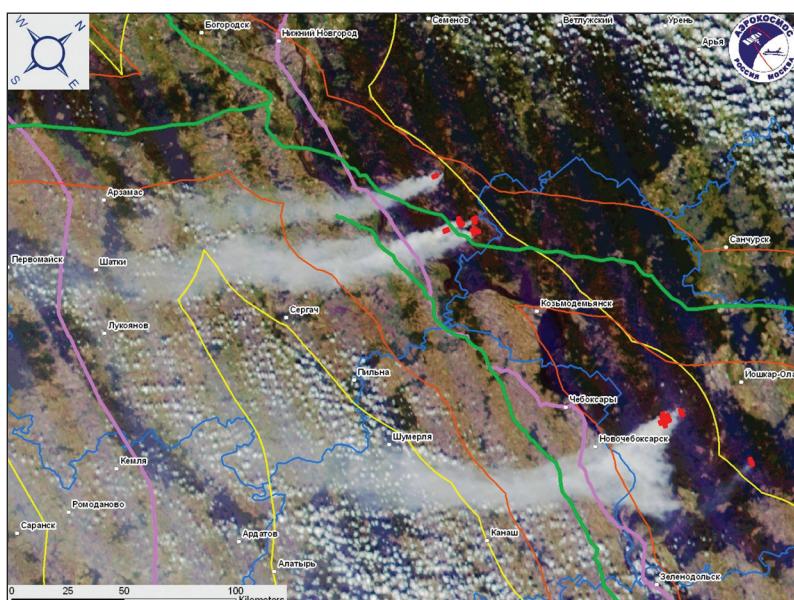


Рис. 12. Пожары, обнаруженные из космоса 30 июня 2010 г.

(12 ч. 39 мин.) в районе ЛЭП и нефтепроводов

- Магистральные ЛЭП
- Буферные зоны ЛЭП
- Магистральные нефтепроводы
- Буферные зоны нефтепроводов

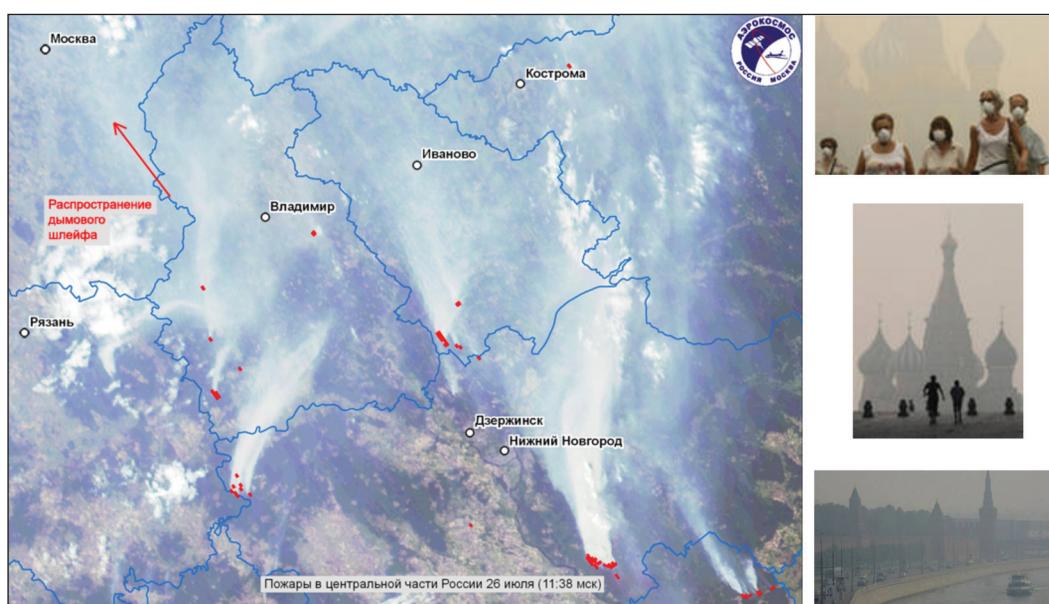


Рис. 13. Пожары, обнаруженные из космоса 26 июля 2010 г. (11 ч. 38 мин.) в Центральной части Европейской территории России, вызвавшие сильное задымление

Обобщение и анализ результатов космического мониторинга

Как уже отмечалось выше, интенсивные природные пожары возникают, как правило, в периоды сильной жары и засух. На рисунке 14 в качестве примеров приведены карты с пространственными распределениями тепловых аномалий, характеризующих изменения полей температуры в июле и августе 2010 г. (а, б) и 2011 г. (в, г) по сравнению со средними температурами за соответствующие месяцы предыдущих 8 лет. Эти карты построены по данным прибора AIRS спутника AQUA [<http://mirador.gsfc.nasa.gov>]. Теплыми цветами на приведенных картах показаны превышения, а холодными цветами – понижения средних температур в июле и августе 2010 г. и 2011 г. по сравнению со средними значениями температур для этих месяцев в 2002 – 2009 г. и 2003–2010 гг. соответственно.

Из рис. 14 видно, что в летние месяцы 2010 г. (особенно в июле) в Европейской части России была сформирована тепловая аномалия с превышением на 5°–9° средней июльской температуры за 2002 – 2009 г. Подобная тепловая аномалия была и в августе 2010 г. В этот период времени над Европейской частью территории

России сформировались два длительных блокирующих антициклона. Это привело к возникновению аномальных погодных условий, способствующих интенсивным природным пожарам в данном регионе. В то же время на территории Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации в августе 2010 г. температура была ниже, чем средняя температура в летние месяцы за 2002–2009 гг. (см. рис. 14 б). Вследствие этого пожаров в этих регионах было меньше, чем обычно.

Иная картина характерна для 2011 г., когда в летние месяцы в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке температура была выше, чем средние температуры в эти месяцы за 2003–2010 гг. (см. рис. 14 в, г). Именно поэтому в этом регионе в 2011 г. было много природных пожаров. Особенно сильные пожары бушевали в 2011 г. на территории Якутии (см. рис. 3). В июле 2011 г. относительно высокие температуры были характерны и для Европейской части территории России. Это вызвало достаточно интенсивные пожары на Европейской части страны в июле 2011 г. В то же время в августе температура в этом регионе была ниже средней за последние 8 лет (см. рис 14 г), что привело к снижению частоты и интенсивности природных пожаров.

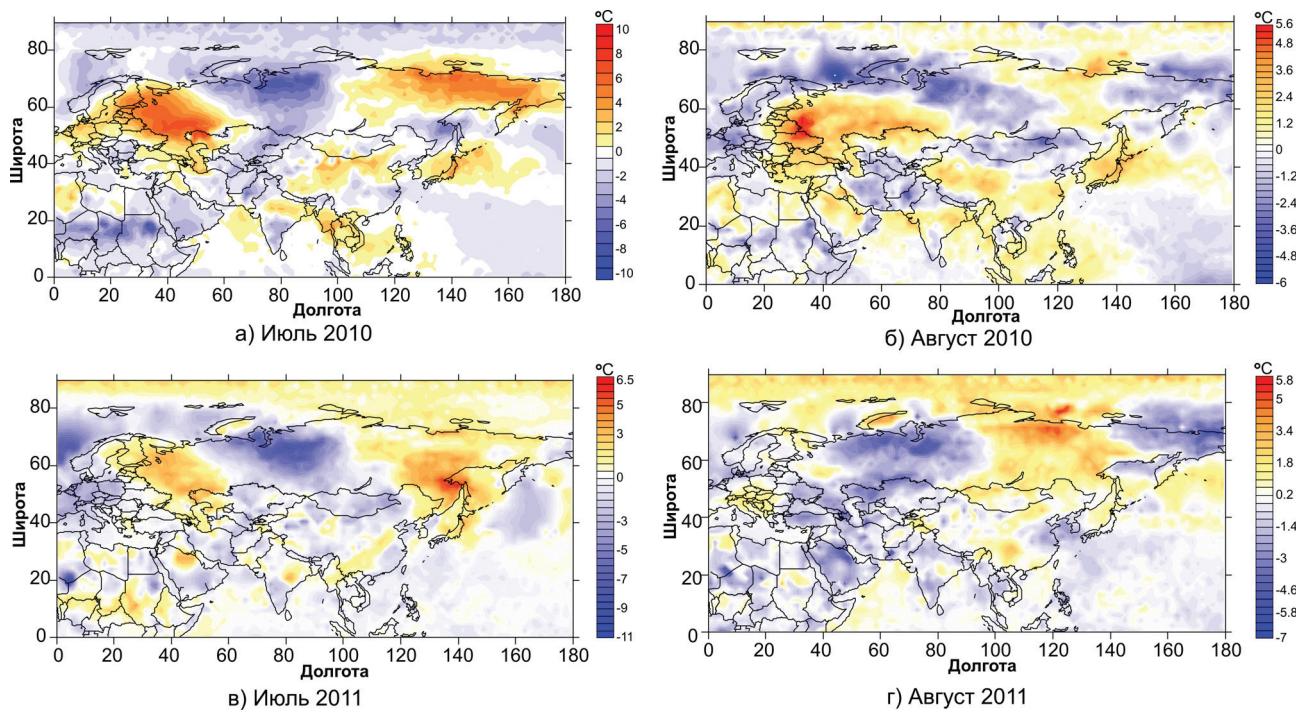


Рис. 14. Температурные аномалии, иллюстрирующие изменения температур в июле и августе 2010 г. (а, б) и 2011 г. (в, г) по сравнению со средними температурами для этих месяцев за предыдущие 8 лет

В результате обработки данных космического мониторинга, проведенного НИИ «АЭРОКОСМОС» с марта по ноябрь 2010 г., установлено, что общее количество пожаров на всей территории России превысило 33 тыс., а в Европейской части России оно достигло около 14 тыс. В то время как, например, в 2009 г. эти числа составили ~25 тыс. и ~8.5 тыс. соответственно. Максимальное количество пожаров в Европейской части территории России в 2010 г. было зафиксировано в наиболее жаркие месяцы – июль и август, когда над этим регионом сформировались два блокирующих антициклона [Бондур 2010 а, б, 2011].

Для определения площадей, пройденных огнем, использовались данные, полученные путем обработки серий обзорных космических изображений (спутники TERRA, AQUA, NOAA). Эти площади затем уточнялись на основании анализа космических изображений среднего разрешения (30....50 м), полученных с борта спутников LANDSAT и Метеор-М, а также высокого разрешения (~6м), полученных с борта спутника RapidEye [Бондур 2010 а, 2011].

На рис. 15 приведены площади, ежедневно пройденные огнем в летние месяцы 2010 г. для территории Европейской части России (а) и для территории Московской области (б), полученные с использованием данных космической обзорной аппаратуры MODIS и AVHRR (спутники TERRA, AQUA, NOAA) и их валидации по данным тематического картографа спутника Landsat (разрешение 30 м), а также аппаратуры спутников Rapid Eye (разрешение ~6.5 м). Для Европейской части России общая

площадь, пройденная огнем, с марта по ноябрь 2010 г. составила — 2.2 млн. га, а для всей территории России — ~11.1 млн. га., что близко к данным Глобального центра мониторинга пожаров г.Фрайбург, Германия и Института леса им. В.Н.Сукачева СО РАН (~10.8 млн. га) (<http://www.fire.uni-freiburg.de/current/globalfire.htm>) [Бондур 2010 а, 2011]. Наибольшие площади, пройденные огнем в 2010 г. для Европейской части России и для территории Московской области, были зафиксированы с 1 по 15 августа (см. рис. 15 а , б).

Как уже отмечалось ранее, природные пожары (лесные, торфяные, степные) приводят к интенсивным эмиссиям различных газовых компонент и мелкодисперсных частиц в атмосферу. Для оценки эмиссий продуктов горения применяется ряд методов [Вивчар и др., 2010; Seiler, Crutzen, 1980; Wiedinmyer et al, 2006]. Все эти методы учитывают площади, пройденные огнем, плотность пространственного распределения биомассы и содержания углерода в ней, а также полноту сгорания. Кроме этого используются эмиссионные коэффициенты, характеризующие отношение величины эмиссий и количеству сгоревшей биомассы. Плотность биомассы зависит от типов продуктов сгорания (типов растительности, травы, торфа) [Hoelzemann et al, 2004]. Для оценок объемов эмиссий углекислого газа (CO) в настоящей работе использовалась эмиссионная модель из работы [Seiler, Crutzen, 1980]:

$$E = A * B * C * D,$$

где E – общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу [т];

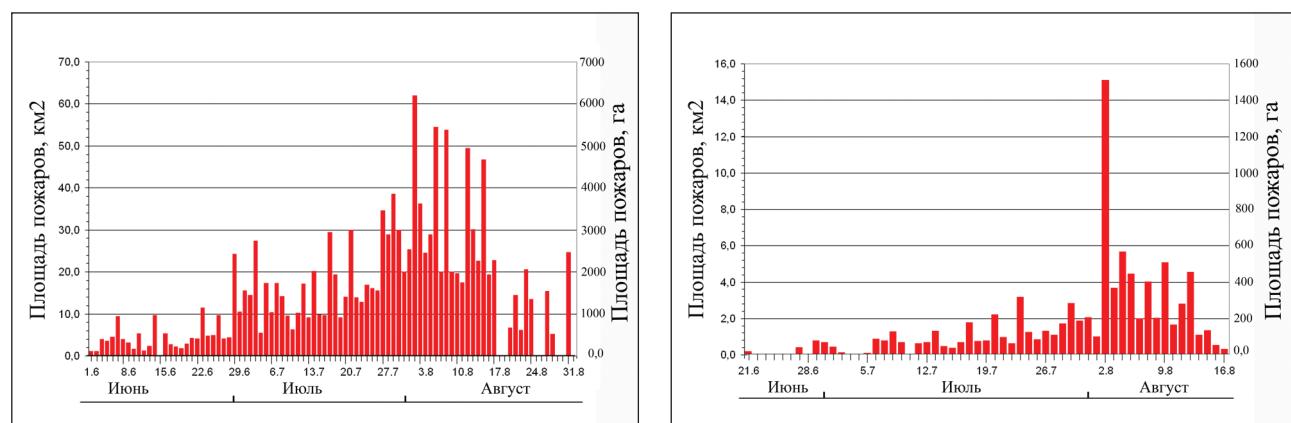


Рис. 15. Площади, пройденные огнем с июня по август 2010 г., выявленные по космическим данным.
а) для территории Европейской части России б) для территории Московской области

А – площадь, пройденная огнем [м^2];
 В – плотность биомассы [$\text{кг}/\text{м}^2$];
 С – доля сгоревшей биомассы [%];
 Д – масса вещества, выбрасываемого в атмосферу при сгорании 1 кг биомассы [г/кг].

Площади, пройденные огнем, определялись по космическим данным, как описывалось выше (см. рис. 15). Коэффициенты В, С, и Д определялись для каждого типа экосистемы с использованием карт растительности и землепользования [Вивчар и др., 2010; Seiler, Crutzen, 1980; Wiedinmyer et al, 2006].

В результате природных пожаров летом 2010 г. происходило сильное задымление населенных пунктов и городов, в том числе Московского мегаполиса (см. рис. 13). На рис. 16 в качестве примеров приведены результаты оценок ежедневных эмиссий СО в летние месяцы 2010 г. для территории Европейской части России (а) и для территории Московской области (б), получен-

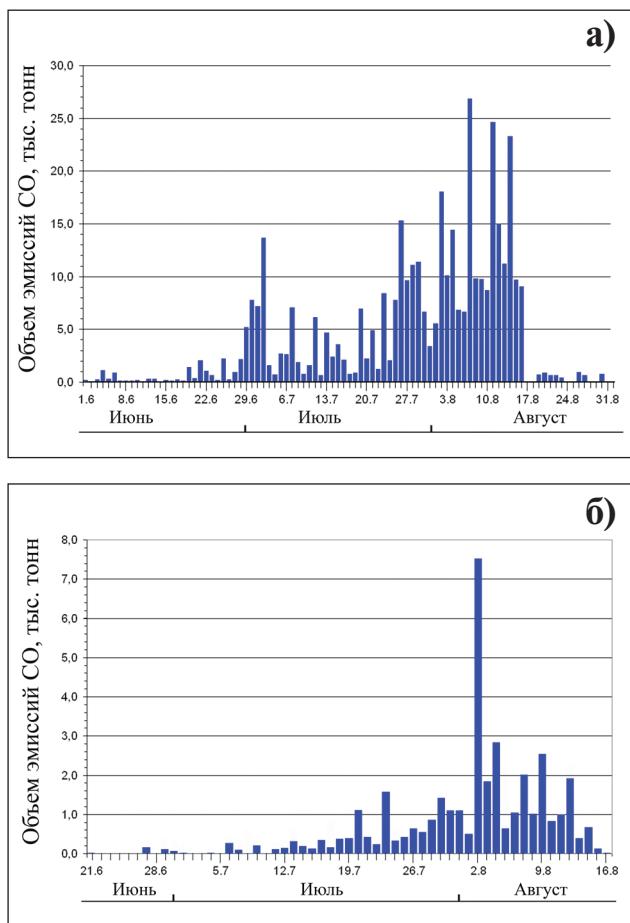


Рис. 16. Объемы эмиссий СО с 1 июня по 31 августа 2010 г. по космическим данным, полученным НИИ «АЭРОКОСМОС».
 а) для территории Европейской части России;
 б) для территории Московской области

ных по описанной методике на основе космических данных НИИ «АЭРОКОСМОС» [Бондур 2010 а, б; 2011]. Анализ рис. 16 показывает, что максимальные объемы эмиссий угарного газа были выявлены 2–14 августа 2010 г. и составляли 14–27 тыс. тонн в день для территории Европейской части России и 3–7,5 тыс. тонн в день для территории Московской области.

Наиболее сильное воздействие задымления от ближайших к Москве и удаленных пожаров, выявленное по космическим и наземным данным происходило 6–9 августа 2010 г., когда был очень слабый ветер, а 7 и 8 августа 2010 г. вообще был полный штиль. В эти дни по данным наземных станций значения концентраций токсических соединений существенно превосходили не только суточные, но и разовые предельно-допустимые концентрации.

На рис. 17 приведены значения среднесуточной концентрации СО, CO_2 , NO, NO_2 , CH_4 , NMHC, SO_2 и среднесуточных предельно допустимых концентраций этих газов летом 2010 г. по данным измерений на наземной станции Института физики атмосферы РАН и Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Результаты измерений на этой станции показывают, что с 6 до 9 августа 2010 г. концентрация углекислого газа (CO_2) в Москве превышала 1000 $\text{мг}/\text{м}^3$, угарного газа (СО) ~20 $\text{мг}/\text{м}^3$, озона (O_3) ~320 $\text{мкг}/\text{м}^3$, метана (CH_4) ~3 $\text{мг}/\text{м}^3$. Наиболее сильные загрязнения были выявлены по аэрозолям.

На рис. 18 приведено распределение концентрации СО для 15 августа 2010 г. на высотах от 2 до 10 км над территорией Восточной и Центральной Европы, построенное по данным спутника AQUA, полученным с помощью инфракрасной аппаратуры AIRS (http://airs.jpl.nasa.gov/maps/satellite_feed/) [Бондур 2010 а, б; 2011]. Из этого рисунка видно, что наиболее сильные эмиссии СО происходили над Европейской частью России, где в это время бушевали природные пожары, а с учетом переноса воздушных масс на данных высотах облако распространилось на значительную часть Восточной Европы.

Заключение

Приведенные примеры обнаружения из космоса очагов природных пожаров и результаты анализа их последствий подтвердили актуаль-

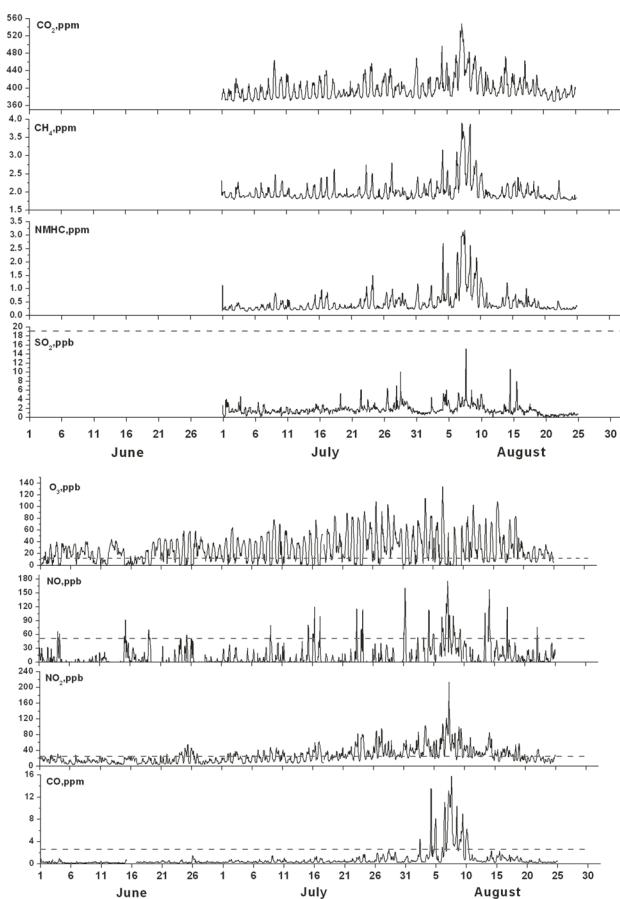


Рис. 17. Средние суточные концентрации CO, CO₂, O₃, NO, NO², CH₄, NMHC, SO₂ и среднесуточные ПДКс летом 2010 года в Москве по данным наземных измерений на станциях Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова

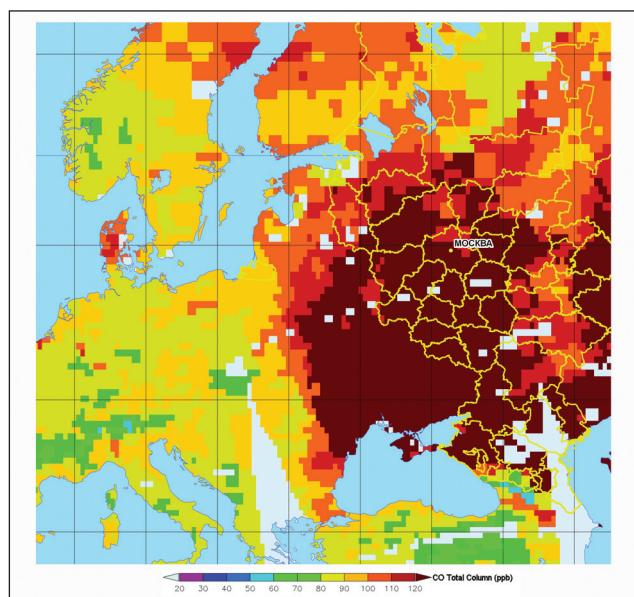


Рис. 18. Пространственное распределение концентрации CO для 15 августа 2010 г. по данным спутника AQUA (аппаратура AIRS)

ность и эффективность использования методов, технологий и средств космического мониторинга для борьбы с этими опасными природными явлениями. Космические системы мониторинга обеспечивают высокую оперативность обнаружения и предоставления информации об источниках возгорания, а также их последствиях, объективность и достоверность получаемых данных.

На основании проведенного анализа космической информации, полученной в 2010 и 2011 гг., показано, что число и интенсивность природных пожаров зависит от температуры окружающей среды. Это особенно наглядно подтверждается событиями, произошедшими летом 2010 г., когда в условиях сильной жары (среднемесячная температура в летние месяцы превышала на 5°—9° аналогичные температуры за последние 8 лет) и сформировавшихся блокирующих антициклонов над Европейской частью территории России происходили аномально сильные природные пожары. Максимальные объемы эмиссии угарного газа от природных пожаров, рассчитанные по космическим данным, достигали 2—14 августа 2010 г. и составляли для Европейской части России 15—27 тысяч тонн в день, а для Московской области — 3—7,5 тыс. тонн. Из-за сильного задымления Московского мегаполиса 6—9 августа 2010 г. значение концентрации токсических соединений в столице России существенно превышало не только суточные, но и разовые нормы ПДК. В частности, по результатам измерений, выполненных в эти дни на наземной станции ИФА РАН и МГУ им. М.В. Ломоносова, концентрации O₃ достигали 320 мкг/m³, CO — 20 мг/m³, CO₂ — 1020 мг/m³, CH₄ — 2,9 мг/m³.

Явная зависимость числа и интенсивности природных пожаров от температуры окружающей среды подтверждается также и результатами космического мониторинга, выполненного в 2011 г. В летние месяцы 2011 г. на территории Восточной Сибири и Дальнего Востока Российской Федерации среднемесячные температуры превышали средние температуры соответствующих месяцев за предыдущие 8 лет. Это привело к большому количеству сильных природных пожаров в этом регионе, что особенно наглядно проявилось на территории республики Якутия (Саха).

Перспективы развития космических систем оперативного мониторинга природных пожаров связаны со следующими факторами: более

широким использованием различных космических данных, поступающих с существующих и перспективных космических аппаратов, оборудованных различными приборами, в том числе радиолокаторами, СВЧ-радиометрами и др.; развитием методов и технологий мониторинга и обработки космических и других данных; получением большего количества информационных продуктов; повышением их достоверности, точности и оперативности при обнаружении очагов пожаров. Это обеспечит принятие своевременных мер по ликвидации и снижению ущерба от этих природных катастроф.

Для повышения эффективности борьбы с природными пожарами различным Федеральным и региональным органам исполнительной власти, а также заинтересованным компаниям и организациям необходимо более широко, чем в настоящее время, использовать результаты космического мониторинга, прежде всего, оперативного.

Крайне важно, как можно скорее сформировать отечественную группировку спутников ДЗЗ, оборудованных самыми современными типами аппаратуры и обеспечить оперативный доступ к информации, получаемой ими.

Литература

1. Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары 2010г. // Исследование Земли из космоса №3, 2011. С. 3—13.
2. Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестник ОНЗ РАН, Том 2, NZ11001, 2010 (а).
3. Бондур В.Г. Спутники в борьбе согнем // Российский космос, №12, 2010. С. 24—30 (б).
4. Бондур В.Г. Принципы построения космической системы мониторинга Земли в экологических и природно-ресурсных целях // Изв. Вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 1995. №2. С. 14—38.
5. Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с., 22 цв. ил.
6. Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в Северной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2010. Т. 46, №3. С. 1—11.
7. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.Н. Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
8. 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.
9. 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.
10. Щетинский В.Е., Котельников Р.В., Сементин В.Л., Лупян Е.А., Флитман Е.В., Щербенко Е.В., Галеев А.А., Ефремов В.Ю., Толчин В.А., Мазаров А.А., Крашенинникова Ю.С., Ершов Д.В. Применение информационной системы дистанционного мониторинга «ИСДМ Рослесхоз» для определения пожарной опасности в лесах Российской Федерации (Издание второе) // ФГУ «Авиалесоохрана» г. Пушкино (МО). 2008. 87 с.
11. Hoelzemann J.J., Schultz M.G., Brasseur G.P. et al. Global Wildland Fire Emission Model (GWEM): Evaluating the use of global area burnt satellite data // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. N D14SO4, doi: 10.1029/2003JD003666.
12. Roy D. P., Boschetti L., Justice C.O. et al. The collection 5 MODIS burned area product – Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product // Rem. Sens. Environ. 2008. V. 112. N 9. P. 3690—3707.
13. Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from bio-mass burning // Climate Change. 1980. V.2. P.207—247.
14. Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C. et al. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // Atmos. Environ. 2006. V.40. N 19. P.3419—3432.