
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНОЙ ЖАРЫ 2010 г.

© 2011 г. В. Г. Бондур

ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” Минобрнауки России и РАН, Москва

E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

Поступила в редакцию 27.01.2011 г.

Описаны особенности экстремальных условий, сложившихся летом 2010 г. в Европейской части территории Российской Федерации, когда из-за аномальной жары (среднемесячные температуры в летние месяцы на 5° – 9° С превышали средние температуры этих месяцев за 2002–2009 гг.) и длительных блокирующих антициклонов возникали сильные природные пожары. Проанализированы причины возникновения и последствия природных пожаров. Представлены особенности космической системы оперативного мониторинга пожаров, созданной в ГУ “Аэрокосмос”, и примеры ее применения летом 2010 г. На основании результатов обработки космических изображений низкого (250...1000 м), среднего (~30–50 м) и высокого (~6 м) разрешения установлено, что суммарные площади, пройденные огнем с марта по ноябрь 2010 г., для всей территории страны составили ~10.9 млн. га, а для ее Европейской части ~2.2 млн. га. Построены гистограммы площадей, ежедневно пройденных огнем в летние месяцы 2010 г. С использованием этих данных и эмпирических моделей оценены ежедневные эмиссии угарного газа (СО) от природных пожаров в летние месяцы 2010 г. для территорий Европейской части России и Московской обл. В отдельные дни августа 2010 г. эти эмиссии достигали 15–27 тыс. т для Европейской части России и 3–7.5 тыс. т для Московской обл. На основании результатов обработки данных спектрометра AIRS (спутник Aqua) получено пространственное распределение концентрации СО на высотах от 2 до 10 км над Восточной и Центральной Европой. Показано, что наиболее сильное задымление г. Москвы от природных пожаров происходило 6–9 августа 2010 г., когда концентрации вредных газов (СО₂, СО, СН₄, О₃) и аэрозолей в воздухе существенно превышали не только суточные, но и разовые предельно допустимые нормы.

Ключевые слова: космический мониторинг природных пожаров, аномальная жара, Европейская часть России

ВВЕДЕНИЕ

Лето 2010 г. в России отличалось необычайной жарой, засухой и сильными природными пожарами (лесными, степными, торфяными), прежде всего, в Европейской части страны. В ряде регионов от таких пожаров погибло 60 человек. Сгорело 2.5 тыс. домов в почти 150 населенных пунктах. Свыше 3.5 тыс. человек остались без крова. В течение нескольких дней были задымлены многие города и населенные пункты, в том числе такой мегаполис, как Москва. Пожары парализовали работу аэропортов, автомобильных дорог, приводили к отключениям линий электропередач и электрических подстанций, угрожали стратегически важным объектам. 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, загрязняя атмосферу и угрожая здоровью людей.

По официальным данным Федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз), на территории России ежегодно возникает от 10 до 40 тыс. природных пожаров, которые охватывают площади от 0.5 до 2.5 млн. га. Статистические данные о природных пожарах предоставляет также Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий (МЧС России). При этом данные МЧС и лесного ведомства различаются. Например, по данным Рослесхоза, в 2009 г. общая площадь, пройденная огнем, составила 2.4 млн. га при количестве лесных пожаров 22.54 тыс. В то время как по официальным данным МЧС России в 2009 г. площадь, пройденная огнем, составила 1.14 млн. га (т.е. более чем в 2 раза меньше, чем по данным Рослесхоза), при числе очагов пожаров 21.9 тыс. (Бондур, 2010). Однако эта статистика относится только к охраняемым территориям. С учетом того, что природные пожары происходят также на неохраняемых и эпизодических охраняемых территориях (в основ-

ном в Сибири и на Дальнем Востоке), общая площадь, пройденная огнем, для всей Российской Федерации составляет от 2 до 6,0 млн. га ежегодно (Исаев и др., 1995; Воробьев и др., 2004). На Земном шаре в целом ежегодно возникает до 400 тыс. природных пожаров (Воробьев и др., 2004).

Для получения объективной информации о количестве пожаров и площадях, пройденных огнем, необходимо использовать современные технические средства, и прежде всего — космические. В настоящей работе приводятся результаты мониторинга природных пожаров, происходивших на территории России в 2010 г., с помощью космической системы Научного центра аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос”.

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ ПРИРОДНЫХ ПОЖАРОВ

Основной причиной возникновения природных пожаров является деятельность человека (~79%). При этом главным виновником пожаров (~70%) является само население. От сельхоззапалов, от сжигания порубочных остатков, по вине лесозаготовителей, экспедиций, а также транспортных систем возникает ~9,1% природных пожаров. От природных факторов (молнии) возникает чуть более 13% пожаров. Остальная часть пожаров возникает по невыясненным причинам (Воробьев и др., 2004).

Пожарная опасность территорий определяется влажностью напочвенного и растительного покрова и температурой воздуха. 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 (от 3 до 100 м/мин и более), так и с точки зрения уничтожения лесной флоры и фауны (Воробьев и др., 2004; Бондур и др., 2009; Бондур, 2010). В связи с этим в жаркие, засушливые периоды частота возникновения пожаров значительно возрастает. Это подтверждают и исторические факты, и современные данные. Как следует из сохранившихся летописных сведений, вспышки интенсивностей пожаров в прошлом приходились на периоды засух. Например, Суздальская 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 вв., сопровождавшихся голодом среди населения и большими потерями среди 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. Количество упомянутых в русских летописях засух и лесных пожаров не превышает 50 случаев. В прошлом и начале этого века учет природных пожаров приобрел регулярный характер, а сама проблема получила научное развитие. Связь аномальной жары и засух с большим количеством природных пожаров подтверждают и события, произошедшие в СССР и России в 1972, 2002 и 2010 гг. (Бондур, 2010).

Природные пожары представляют собой опасные стихийные бедствия, так как они уничтожают ценную древесину. Частые пожары мешают лесовосстановлению, ухудшают 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. (Бондур и др., 2009; Воробьев и др., 2004).

Лесные пожары задымляют большие пространства, изменяют химический состав атмосферного воздуха за счет эмиссии различных малых газовых компонентов, что приводит также к изменению концентрации озона. Увеличение эмиссии монооксида и двуоксида углерода, а также других парниковых газов влияет на климат планеты. За сезон вегетации растений поток депонированного из атмосферы углерода за счет фотосинтеза может достигать величин 80—310 гС/м² (Исаев и др., 1995). Крупные лесные пожары снижают стоки атмосферного углерода вследствие снижения объема биомассы. При этом из-за пожаров происходит трансформация лесов в источники углерода за счет прямых выбросов при сгорании биомассы (от 14,0 до 40,0 Мт/г) и косвенных воздействий пожаров на тепловую и водную режимы, а также на структуру и функционирование экосистем (Бондур и др., 2009; Воробьев и др., 2004).

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 в почве 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., 1991; Бондур и др., 2009).

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 легче и быстрее по сравнению с местами вырубок. Более того, обнаружено возрастание продуктивности лесных экосистем после пожаров. Восстановление лесных сообществ зависит от частоты и интенсивности пожаров. В таеж-

ных 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 лиственных 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 (Бондур и др., 2009).

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

В связи с этим необходимо проводить детальный анализ последствий природных пожаров и осуществлять поиск стратегии их контроля. Главными факторами, определяющими эффективность борьбы с природными пожарами, являются оперативность обнаружения и своевременность подавления их очагов, особенно на ранних стадиях (Воробьев и др., 2004). Одним из перспективных подходов к решению этой проблемы является использование спутниковых систем мониторинга, оснащенных широким спектром современной аппаратуры дистанционного зондирования (ДЗ) (Бондур и др., 2009; Бондур, 2010).

ИСПОЛЬЗУЕМАЯ СИСТЕМА КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

В настоящее время для контроля и предупреждения природных пожаров успешно применяются спутниковые системы. Обнаружение очагов пожаров обычно осуществляется с помощью ИК-радиометров, входящих в состав бортовых космических комплексов. Алгоритмы обнаружения очагов основаны на регистрации радиационной температуры в спектральном диапазоне 3.5...3.7 мкм и разности радиационных температур в этом канале и в спектральном канале ~11.0 мкм (Бондур и др., 2009; Бондур, 2010). Одними из наиболее часто используемых приборов для обнаружения пожаров являются радиометр MODIS спутников Terra и Aqua системы наблюдения Земли EOS (Roy et al., 2008; Бондур и др., 2009), а также аппаратура AVHRR космической системы NOAA.

Спутниковую информацию для слежения за пожарами используют в США и некоторых странах ЕС (например, Германия). Для Российской Федерации, имеющей огромную площадь (~17.1 млн. км²), множество труднодоступных территорий и большие площади лесных массивов, применение космических средств для раннего обнаружения и оценки последствий природных пожаров особенно актуально. В Рослесхозе существует Информационная система дистанционного мониторинга (ИСДМ–Рослесхоз), созданная с участием ФГУ “Авиалесоохрана”, Института космических исследований РАН, НИЦ “Планета” и других организаций (Щетинский и др., 2008). Спутниковые данные для контроля пожаров используются и в МЧС России. Космическим мониторингом пожаров занимается Инженерно-технологический центр “СканЭкс”. Современная система оперативного космического мониторинга природных пожаров (СКМ) создана и успешно эксплуатируется в ГУ Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” (Бондур, 2010; Бондур и др., 2009). Эта система позволяет проводить раннее обнаружение, прогноз динамики развития и оценку последствий природных пожаров, а также оперативное формирование и передачу заказчикам различной информации об этих природных катаклизмах.

На рис. 1 приведена структурная схема мониторинга природных пожаров, на рис. 2 — блок-схема функционирования СКМ ГУ “Аэрокосмос”, а на рис. 3 — зоны устойчивого приема космической информации наземными станциями этой системы.

В отличие от существующих средств дистанционного обнаружения пожаров СКМ ГУ “Аэрокосмос” имеет ряд особенностей, основными из которых являются:

- возможность оперативного контроля всей территории Российской Федерации и приграничных стран;
- высокая частота обзора одного и того же района — 25 раз в сутки;
- высокая скорость обработки данных и передачи информационных продуктов потребителями (10 мин с момента приема космических данных);
- полностью автоматическая работа системы в режиме оперативного обнаружения пожаров;
- высокая точность и достоверность получаемых данных;
- сочетание обзорной и детальной космической информации при обнаружении и оценке последствий пожаров;
- возможность прогнозирования развития пожаров;
- возможность оперативного предоставления информации о пожарах и их последствиях в зонах ответственности сложных технических систем



Рис. 1. Структурная схема мониторинга природных пожаров.

(объекты энергетики, ЛЭП, нефте-, газо- и продуктопроводы, стратегически важные объекты и др.);

- формирование широкого спектра информационных продуктов в формате ГИС;

- разработка рекомендаций для принятия управленческих решений.

Главные преимущества этой системы связаны с использованием специальных методов и технологий автоматического оперативного сбора и обработки космических и других данных, а также определения масштабов и последствий природных пожаров, которые разработаны в процессе выполнения ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в рамках Федеральных целевых программ Минобрнауки России.

Система удовлетворяет фундаментальным принципам открытых систем: функциональная расширяемость, модернизируемость, интегрируемость информационных ресурсов (Бондур, 1995;

Савин, Бондур, 2000). Она является территориально-распределенной системой с размещением идентичных аппаратно-программных средств в трех наземных Центрах для обеспечения обзора всей территории страны.

В состав СКМ ГУ “Аэрокосмос” входят:

1. Главный (в г. Москве) и два региональных (в Сибири и на Дальнем Востоке) Центра приема космической информации, поступающей с группировок спутников, оборудованных ИК и многоспектральной оптической аппаратурой ДЗ.

2. Специальное программное обеспечение для оперативного автоматического сбора, обработки и хранения информации, а также формирования информационных пакетов и передачи данных.

3. Геоинформационное обеспечение.

4. Средства связи, обеспечивающие оперативную передачу данных с региональных станций приема в Информационно-аналитический центр

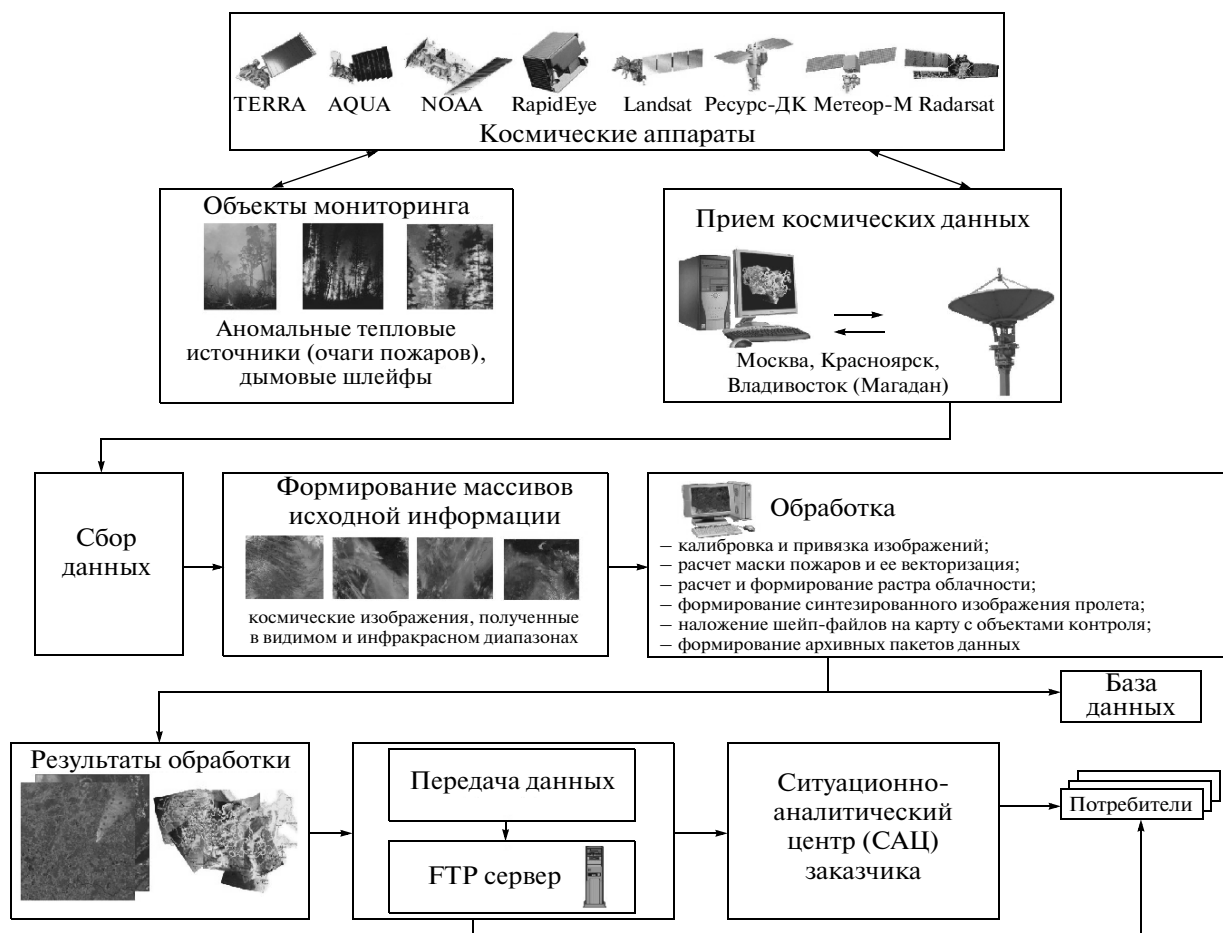


Рис. 2. Блок-схема функционирования СКМ ГУ «Аэрокосмос».

(ИАЦ) СКМ, и предоставление результатов мониторинга в Ситуационно-аналитические центры Заказчиков и локальным потребителям.

На каждой наземной станции «сырые» космические данные поступают на вычислительные средства предварительной обработки, где происходят их радиометрическая коррекция, калибровка, пространственная привязка и другие операции. После предварительной обработки информация передается на сервер хранения оперативных данных. В процессе работы СКМ с использованием алгоритмов и программного обеспечения, разработанные в ГУ «Аэрокосмос», производится тематическая обработка космических изображений, сформированных в ИК-диапазоне спектра электромагнитных волн для выделения тепловых аномалий, обусловленных очагами пожаров на контролируемых территориях. Получаемые маски пожаров векторизуются. На основании результатов расчетов параметров очагов пожаров формируются атрибутивные таблицы шейп-файлов пожаров. С использованием специальных методов отсеиваются ложные тепловые аномалии (блики, детерминиро-

ванные тепловые источники и др.). Путем обработки многоспектральных космических данных создаются синтезированные изображения, позволяющие проводить оценку состояния облачного покрова и выявлять наличие дымовых шлейфов пожаров.

В ИАЦ СКМ формируются мозаики космических данных, полученных со всех трех наземных центров приема, которые отображаются с использованием геобраузеров. При формировании мозаик учитывается, что распределения яркости с различных проходов группировки спутников имеют различия. Поэтому они подвергаются специальному «яркостному выравниванию» для того, чтобы отдельные фрагменты мозаики имели минимальные отличия. Это позволяет обеспечить совместное отображение информации как с одного, так и с разных витков различных спутников.

Система оперативного космического мониторинга функционирует в различных режимах, определяемых регламентом. В процессе работы СКМ на основании обзорных космических изображений, поступающих со спутников Terra, Aqua, NOAA, «Метеор-М» и др., формируется следующая опера-

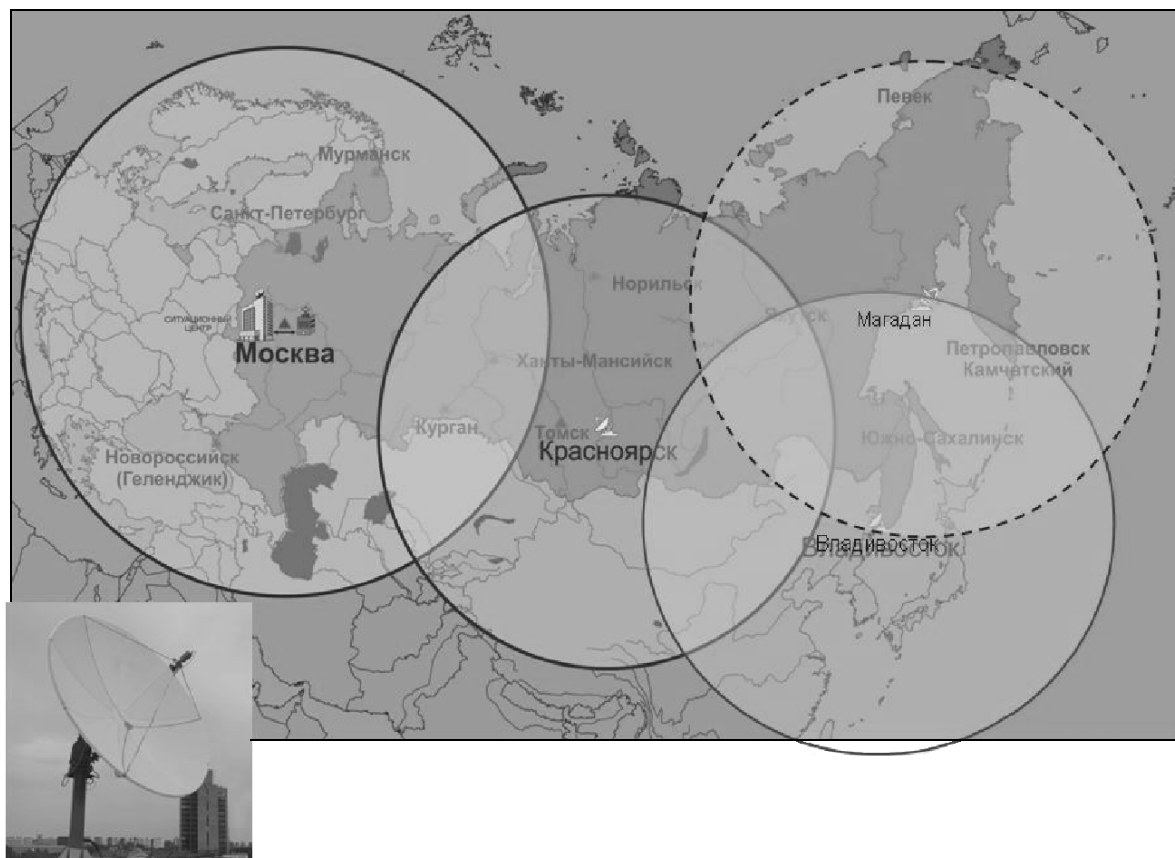


Рис. 3. Зоны приема космической информации наземными станциями СКМ ГУ “Аэрокосмос”.

тивная информация об очагах пожаров и облачных полях в пределах контролируемых территорий:

- данные об обнаруженных тепловых аномалиях (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) в проекции Albers Conical Equal Area;
- информация об облачности (маска облачности);
- информация о метеопараметрах;
- прогнозная информация о направлениях распространения очагов пожаров в зависимости от метеоусловий;
- расстояния от очагов пожаров до различных объектов;
- карты с наложенными шейп-файлами об очагах возгорания, дымовых шлейфах, прогнозируемой и другой информацией;
- файлы для отображения результатов мониторинга в геообразере (формат KML);
- рекомендации для принятия решений.

Кроме того, формируются тематические слои ГИС, содержащие информацию об очагах пожаров в районе контролируемых объектов, например, линий электропередач (ЛЭП); электрических подстанций; нефтепроводов; стратегических объектов; атомных электростанций (АЭС); площадей, пройденных огнем и др.

С использованием космических изображений среднего и высокого разрешения, полученных со спутников Landsat, RapidEye и др., а также наземных данных формируется неоперативная информация (уточненные площади, пройденные огнем (см. рис. 9 на цв. вклейках), объемы эмиссий газов, статистические и другие данные).

ПРИМЕРЫ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ

На рис. 4 (на цв. вклейках) в качестве примера приведена мозаика космических изображений, сформированных 29 июля 2010 г. СКМ ГУ “Аэрокосмос” с отображением геообразером Google Earth. Слева на этом рисунке приведены увеличенные фрагменты результатов обработки космических данных, иллюстрирующие интенсивные по-

жары в середине этого дня во Владимирской, Рязанской, Московской и Нижегородской областях.

На рис. 5 (на цв. вклейках) приведен фрагмент, демонстрирующий результат обнаружения из космоса пожаров, происходивших 29 июля 2010 г. (12:09 мск) вблизи Нижнего Новгорода. На этом рисунке отчетливо проявляются множество очагов интенсивных пожаров и мощные дымовые шлейфы. Указаны магистральные ЛЭП и их буферные зоны. Анализ данного фрагмента показывает, что большое количество очагов пожаров находится внутри буферных зон в непосредственной близости от ЛЭП.

На рис. 6 (на цв. вклейках) представлен пример прогноза развития пожаров вблизи аэропорта г. Воронежа с учетом метеоусловий, в том числе скорости и направления ветра. Красными зонами выделены вероятные направления распространения пожаров. Указаны расстояния от действительных и прогнозируемых очагов пожаров до аэропорта.

На рис. 7 (на цв. вклейках) приведены результаты обнаружения из космоса пожаров, происходивших 30 июня 2010 г. (12:39 мск) в Нижегородской обл. и Республике Марий Эл. На этом рисунке показаны трассы нефтепроводов и магистральных ЛЭП, а также их буферные зоны. Видно, что интенсивные пожары угрожают этим областям инфраструктуры.

На рис. 8 и 9 (на цв. вклейках) представлены результаты обнаружения из космоса пожаров в районе г. Саров. На рис. 8 приведен фрагмент обзорного космического изображения, полученный 3 августа 2010 г. (02:27 мск), с выделенными очагами пожаров во Владимирской, Нижегородской областях и Республике Мордовия. Номерами указаны очаги пожаров вблизи Российского Федерального ядерного центра (РФЯЦ), а в таблице приведены расстояния от него до этих очагов. На рис. 9 (на цв. вклейках) иллюстрируется результат космического мониторинга пожаров 11 августа 2010 г. вблизи г. Саров на основе обзорных данных спутника Aqua (аппаратура MODIS) и детальных данных спутника RapidEye (разрешение ~6 м).

На изображении, полученном с борта спутника RapidEye в видимом диапазоне спектра, выделяются дымовые шлейфы от пожаров, обнаруженных по ИК-изображениям аппаратуры MODIS. На увеличенных фрагментах RapidEye показана зона, пройденная огнем, при пожарах за предыдущие дни, а также расстояния от трех действующих пожаров до г. Саров и до экспериментального полигона РФЯЦ.

На рис. 10 (на цв. вклейках) демонстрируется развитие природных пожаров в середине дня 29 июля 2010 г. вблизи Нововоронежской АЭС, выявленное по космическим данным. Анализ рис. 10а показывает, что в 12:09 вблизи г. Воронежа в этот день было три интенсивных очага пожаров. Через 1 ч 49 мин (в 13:58) за счет ураганного южного ветра



Рис. 12. Относительное количество пожаров за месяц (в процентах) с марта по октябрь 2010 г. в Европейской части РФ (данные ГУ "Аэрокосмос").

пожары усилились, и их количество значительно возросло. Эти природные пожары развивались в буферных зонах магистральных ЛЭП, вблизи Нововоронежской АЭС, а также вблизи городов Воронеж и Липецк и нанесли ущерб многим населенным пунктам этого региона.

ОБОБЩЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Как уже отмечалось, основные особенности лета 2010 г. заключались в экстремальных погодных условиях, сложившихся в Европейской части России из-за сильнейшей жары и засухи, а также длительных блокирующих антициклонов. На рис. 11 (на цв. вклейках) приведены пространственные распределения полей изменения температуры в июне (а), июле (б), августе (в) и сентябре (г) 2010 г. по сравнению со средними температурами этих месяцев в 2002–2009 гг., построенные по данным прибора AIRS спутника Aqua (<http://mirador.gsfc.nasa.gov>). Красным цветом на этом рисунке показано превышение, а синим цветом — понижение средних температур за эти месяцы в 2010 г. по сравнению со средними значениями для этих месяцев в 2002–2009 гг. Из рис. 11 видно, что летом 2010 г. (особенно в июле) в Европейской части России была сформирована тепловая аномалия с превышением средней температуры аналогичных месяцев за 2002–2009 гг. на 5–9°C. Аналогичная тепловая аномалия была и в августе 2010 г.

На основании результатов обработки данных космического мониторинга, проводимого ГУ "Аэрокосмос" (www.aerocosmos.info), установлено, что общее количество пожаров с марта по ноябрь 2010 г. на всей территории России превысило 33 тыс., а в Европейской части России ~13.6 тыс. В то время как, например, в 2009 г. эти числа составили ~25 тыс. и ~8.5 тыс. соответственно. На рис. 12

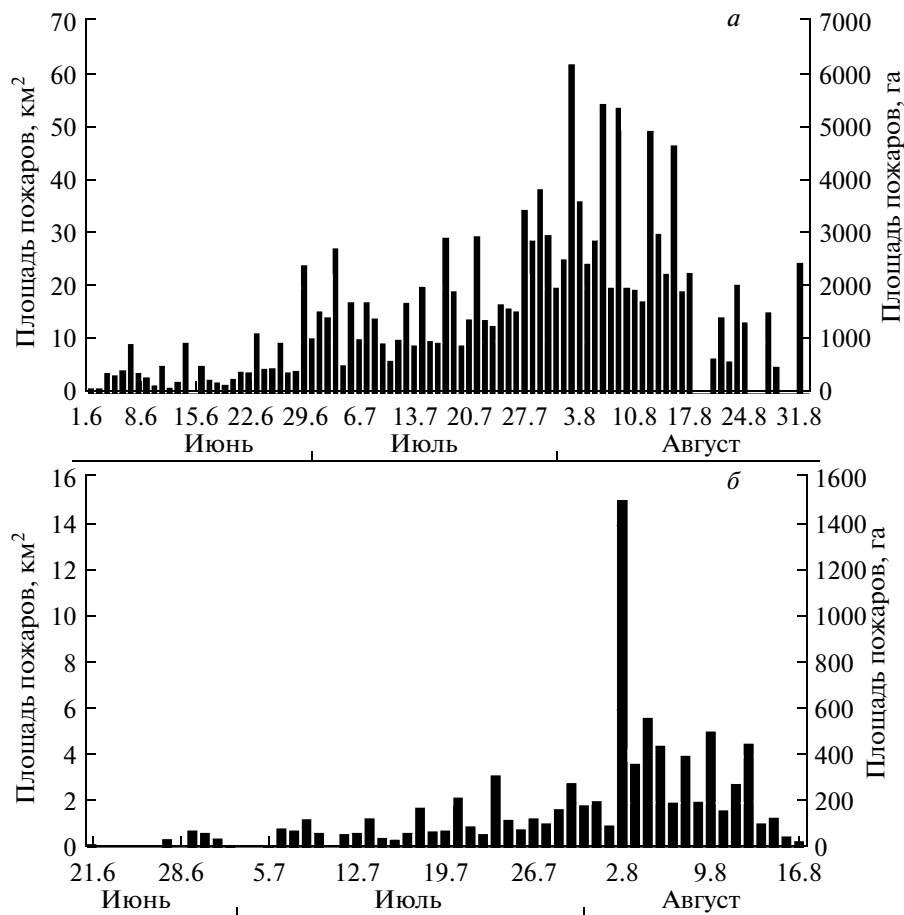


Рис. 13. Площади, ежедневно пройденные огнем с июня по август 2010 г. на территории Европейской части РФ (а) и на территории Московской области (б) (данные ГУ “Аэрокосмос”).

приведена гистограмма с распределением относительного количества пожаров по месяцам в Европейской части России за период с начала марта по конец ноября 2010 г., построенного по космическим данным ГУ “Аэрокосмос”. Анализ этой гистограммы показывает, что максимальное количество пожаров в Европейской части России было зафиксировано в наиболее жаркие месяцы – июль и август 2010 г.

Для предварительного определения площадей, пройденных огнем, использовались данные, полученные путем обработки серий обзорных космических изображений (спутники Terra, Aqua, NOAA), сформированные при мониторинге за период протекания каждого пожара. Затем эти данные уточнялись с использованием космических изображений среднего разрешения (30...50 м), полученных с борта спутников Landsat и “Метеор-М”, а также высокого разрешения (~6 м), полученных с борта спутника RapidEye. По результатам сопоставленных данных, полученных при обработке космических изображений низкого (250...1000 м), среднего (30...50 м) и высокого (6 м) разрешения, определя-

лись поправочные коэффициенты, которые использовались для оперативного определения площадей, пройденных огнем.

На рис. 13 приведены площади, ежедневно пройденные огнем в летние месяцы 2010 г. на территории Европейской части России (а) и в 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) и аппаратуры спутников Rapid Eye (разрешение ~6 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 – ~10.9 млн. га, что практически совпадает с данными 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>).

Самое большое количество очагов природных пожаров было зафиксировано из космоса 29 июля

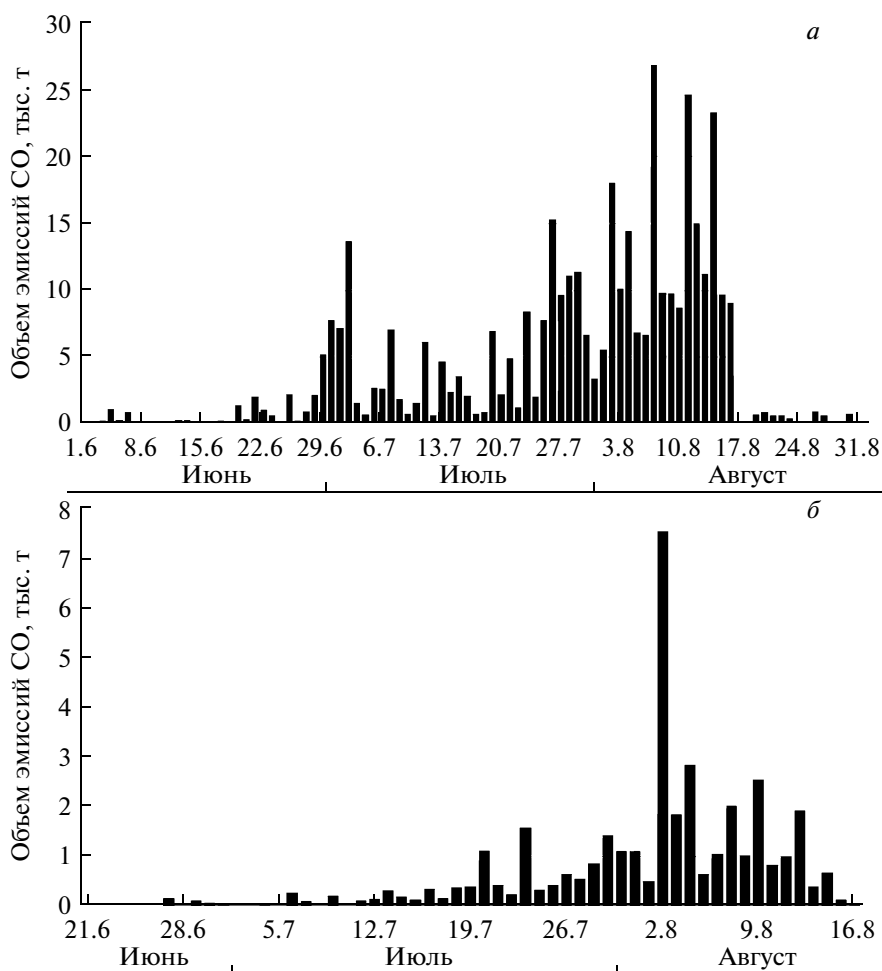


Рис. 14. Результаты оценок по космическим данным эмиссий угарного газа (CO) с 1 июня по 31 августа 2010 г. на территории Европейской части России (а) и Московской области (б).

2010 г. (см. рис. 4, 5). Наибольшие площади, пройденные огнем в Европейской части России, были зафиксированы 1–15 августа 2010 г., а в Московской области – 2–5 августа 2010 г. (см. рис. 13).

Анализ данных, полученных по результатам космического мониторинга, показывает, что в 2010 г. в Европейской части России общее число пожаров и общая площадь, пройденная огнем, были намного больше, чем в 2009 г. В 2010 г. в этом регионе страны значительно возросло, по сравнению с 2009 г., количество крупных пожаров (с площадью > 500 га), причем наиболее сильно (в десятки раз) их доля выросла в Рязанской и Владимирской областях. Отличительной особенностью лета 2010 г. явилось также большее число наиболее опасных верховых пожаров.

Как уже отмечалось выше, природные пожары 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). При определении эмиссий углерода от природных пожаров все они учитывают площади, пройденные огнем, плотность пространственного распределения биомассы и содержания углерода в ней, а также полноту сгорания. Кроме этого учитываются также эмиссионные коэффициенты, характеризующие отношение величины эмиссий к количеству сгоревшей биомассы. Плотность биомассы зависит от типа растительности (Hoelzemann et al., 2004). Для оценок объемов эмиссий CO использовалась эмиссионная модель из работы (Seiler, Crutzen, 1980)

$$E = A \times B \times C \times D,$$

где E – общая масса вещества, выбрасываемого в атмосферу, в т; A – площадь, пройденная огнем, в м²; B – плотность биомассы в кг/м²; C – доля сгоревшей биомассы в процентах; D – масса вещества, выбрасываемого в атмосферу при сгорании 1 кг биомассы (в г/кг).

Площади, пройденные огнем, определялись по космическим данным, как описывалось выше. Коэффициенты B , C и D определялись для каждого типа экосистемы с использованием карт растительности и землепользования (Вивчар и др., 2010; Seiler, Crutzen, 1980; Wiedinmyer et al., 2006).

На рис. 14 в качестве примера приведены результаты оценок ежедневных эмиссий CO в летние месяцы 2010 г. на территории Европейской части России (а) и на территории Московской области (б), полученных по описанной методике на основе космических данных.

В результате природных пожаров 2010 г. происходило сильное задымление населенных пунктов, городов, в том числе Московского мегаполиса. 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. полный штиль.

В эти дни, по данным наземных станций Мосэкомониторинга, значения концентраций токсических соединений существенно превосходили не только суточные, но и разовые предельно допустимые концентрации. Например, концентрация углекислого газа (CO_2) в условиях блокирующего антициклона в Москве превышала 1000 мг/м^3 , $\text{CO} \sim 20 \text{ мг/м}^3$, озона (O_3) $\sim 320 \text{ мкг/м}^3$, метана (CH_4) $\sim 3 \text{ мг/м}^3$. Наиболее сильные загрязнения были выявлены по аэрозолям.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ результатов космического мониторинга природных пожаров, происходивших в аномально засушливое и жаркое лето 2010 г. на территории Российской Федерации, продемонстрировал высокую эффективность космических методов и средств 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 показано, что в условиях сильной жары летом 2010 г. (среднемесячная температура в летние месяцы превышала на $5\text{--}9^\circ\text{C}$ аналогичные температуры за последние восемь лет) и сформировавшегося блокирующего антициклона над Европейской частью территории России происходили сильнейшие природные пожары. Общая площадь, пройденная огнем с марта по ноябрь 2010 г., составила для всей территории России ~ 10.9 млн. га, а для Европейской части ~ 2.2 млн. га. При этом количество крупных пожаров (с площадью >500 га) значительно превышало число таких пожаров в предыдущие годы. В Рязанской и Владимирской областях это превышение достигло десятков. Рассчитанные по космическим данным объемы эмиссии угарного газа от природных пожаров в Европейской части России достигали $15\text{--}27$ тыс. т/день, а в Московской области $3\text{--}7.5$ тыс. т (7–14 августа 2010 г.).

Из-за сильного задымления Московского мегаполиса 6–9 августа 2010 г. значение концентрации токсических соединений существенно превышало не только суточные, но и разовые нормы ПДК.

Перспективы развития космических систем для оперативного мониторинга природных пожаров связаны с более широким использованием космической информации с различных 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, для получения большего количества информационных продуктов, повышения их достоверности, точности и оперативности с целью своевременного обнаружения, а также принятия своевременных мер по ликвидации и снижению ущерба от последствий этих природных катастроф. Для повышения эффективности борьбы с природными пожарами различным федеральным и региональным органам исполнительной власти, а также заинтересованным компаниям и организациям необходимо значительно более широко, чем в настоящее время, использовать результаты космического мониторинга, прежде всего, оперативного.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Бондур В.Г. Актуальность и необходимость космического мониторинга природных пожаров в России // Вестн. ОНЗ РАН. Т. 2. NZ11001. 2010.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П. Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Научный мир, 2009. 692 с.
- Вивчар А.В., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Оценки эмиссий оксида углерода от природных пожаров в Се-

верной Евразии в приложении к задачам регионального атмосферного переноса и климата // 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.

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.

Щетинский В.Е., Котельников Р.В., Сементин В.Л., Лупян Е.А., Флитман Е.В., Щербенко Е.В., Галеев А.А., Ефремов В.Ю., Толпин В.А., Мазаров А.А., Крашенинникова Ю.С., Ершов Д.В. Применение информационной системы дистанционного мониторинга “ИСДМ Рослесхоз” для определения пожарной опасности в лесах Рос-

сийской Федерации (Изд. второе) // ФГУ “Авиалесоохрана” г. Пушкино (МО), 2008. 87 с.

Hansen M., DeFries R., Townshead J.R.G. et al. Global land cover classification at 1 km resolution using a classification tree approach // Int. J. Rem. Sens. 2000. V. 21. № 6–7. P. 1331–1364.

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. № D14SO4. doi: 10.1029/2003JD003666.

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. № 9. P. 3690–3707.

Seiler W., Crutzen P.J. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and atmosphere from bio-mass burning // Clim. Change. 1980. V. 2. P. 207–247.

Wiedinmyer C., Quayle B., Geron C. et al. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling // Atmos. Environ. 2006. V. 40. № 19. P. 3419–3432.

Satellite Monitoring of Wildfires in Russia Due to Anomalous Heat in 2010

V. G. Bondur

“Aerocosmos” Scientific Center for Aerospace Monitoring under the Ministry of Education and Sciences of the Russian Federation and the Russian Academy of Sciences, Moscow

There have been described the features of extreme conditions prevailing in the summer of 2010 in the European part of the Russian Federation when heavy wildfires occurred due to anomalous heat (average summer temperatures 2010 exceeded those in 2002–2009 by 5°–9°C) and long-term blocking anticyclones. Wildfire origins and aftermath have been analyzed here. The features of the Aerocosmos’ satellite system for online fire monitoring have been given, as well as the examples of its use in summer of 2010. Based on the low (250–1000 m), mid (~30–50 m), and high (~6 m) resolution satellite image processing results it was determined that total areas burned from March till November 2010 for the whole territory of the country were ~10.9 mln. ha, and for its European part were ~2.2 mln. ha. Histograms for the areas burned daily in summer months of 2010 have been created. Using these data and empirical models, daily emissions of carbon monoxide (CO) due to wildfires in summer 2010 have been evaluated for the European part of Russia and for Moscow region. In some days in August 2010 these emissions achieved 15–27 thousand tons for the European part of Russia and 3–7.5 thousand tons for Moscow region. Based on AIRS (AQUA satellite) spectrometer data, the spatial distribution of CO concentration at 2 to 10 km altitudes over Eastern and Central Europe has been created. It has been shown that the heaviest cover of smoke over Moscow due to wildfires was in August 6–9, 2010, when concentrations of hazardous gases (CO₂, CO, CH₄, O₃) and aerosols in the air significantly exceeded not only daily but single maximum allowable values.

Keywords: satellite monitoring of wildfires, anomalous heat, European part of Russia

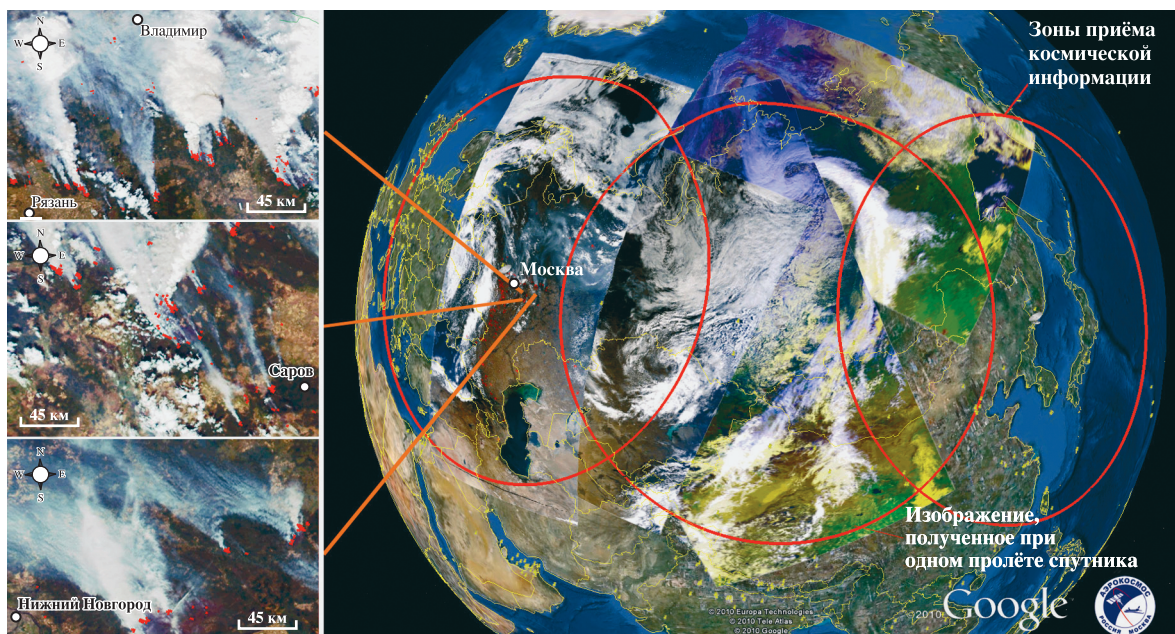


Рис. 4. «Мозаика» обзорных космических изображений, сформированная для 29 июля 2010 г., и увеличенные фрагменты с дымовыми шлейфами и выделенными очагами природных пожаров в Центральном Федеральном округе России.

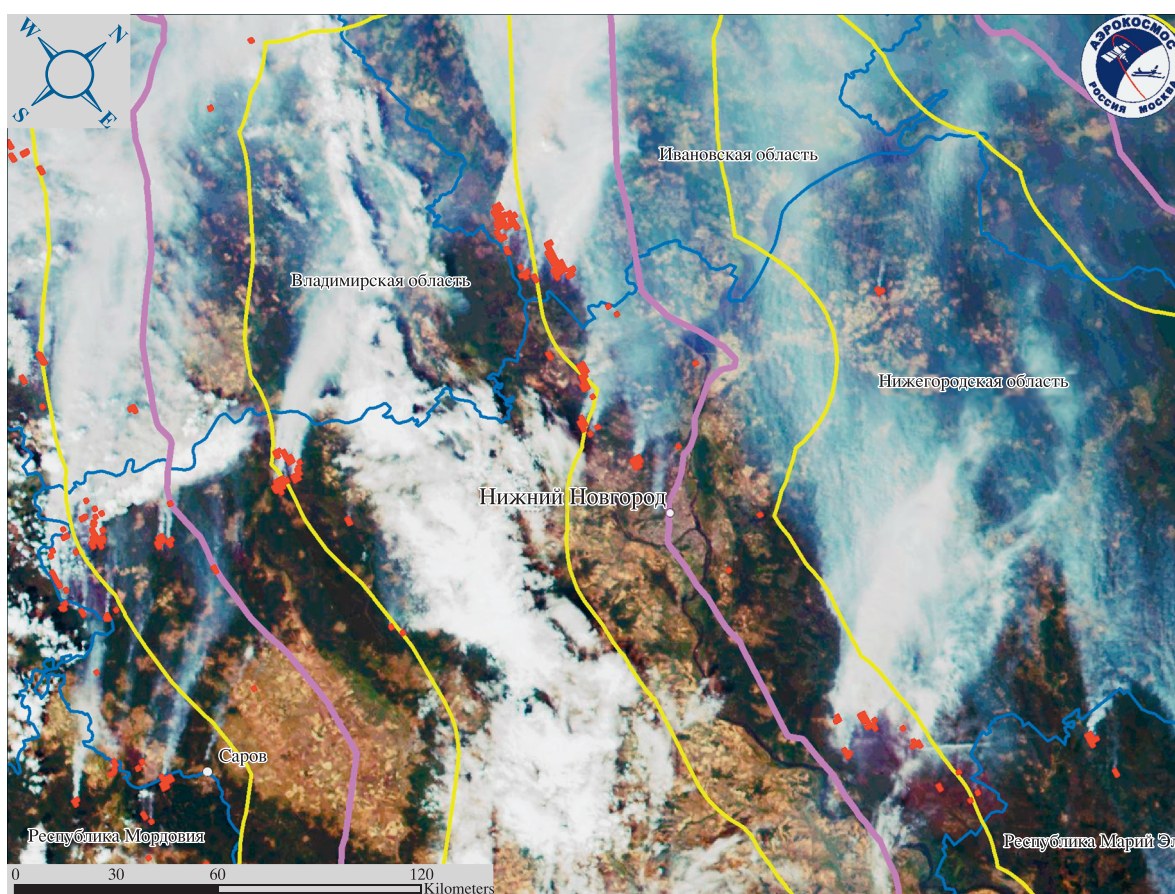


Рис. 5. Обнаружение из космоса пожаров в центре Европейской части России 29 июля 2010 г. (12:09): сиреневый – ЛЭП; желтый – буферные зоны ЛЭП.

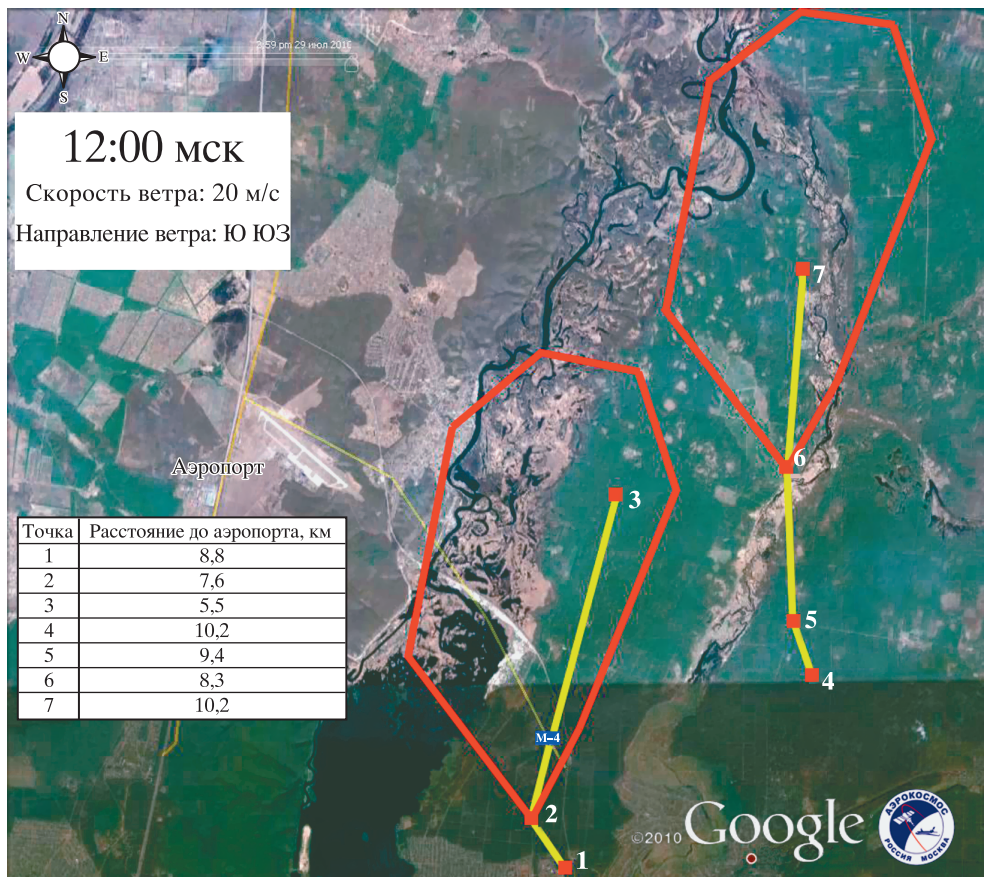


Рис. 6. Прогнозирование распространения пожаров в зависимости от метеоусловий с определением расстояний до аэропорта.

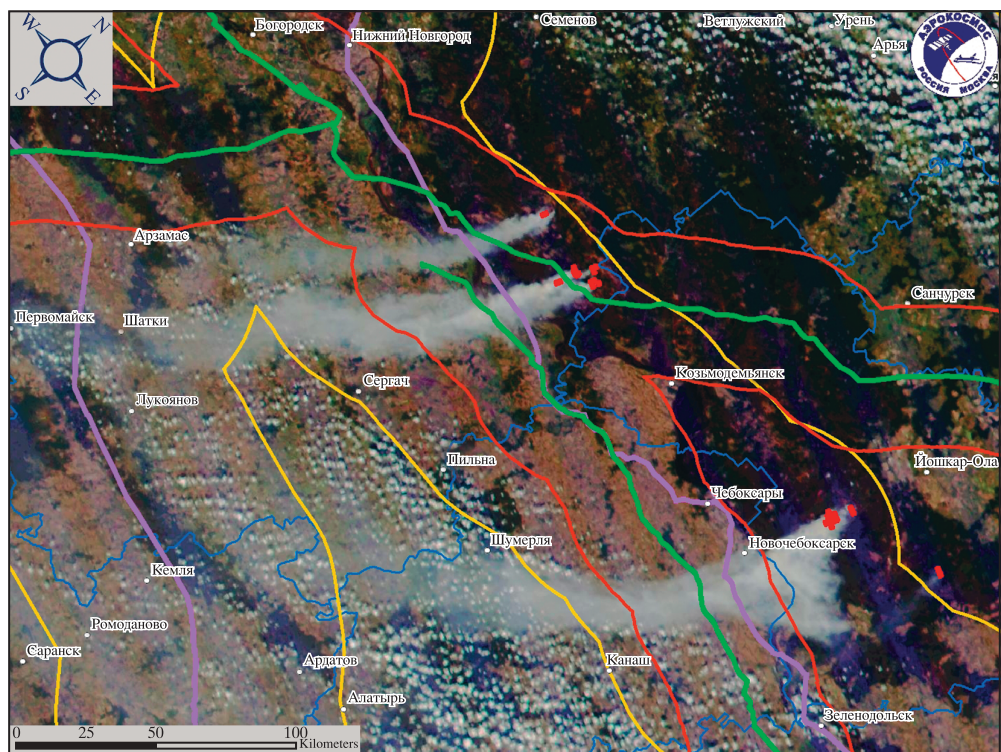


Рис. 7. Пожары, обнаруженные из космоса в Нижегородской области и Республике Марий Эл 30 июня 2010 г. (12:39) в районе магистральных ЛЭП и магистральных нефтепроводов: сиреневый – магистральные ЛЭП; желтый – буферные зоны ЛЭП; зеленый – магистральные нефтепроводы; оранжевый – буферные зоны нефтепроводов.

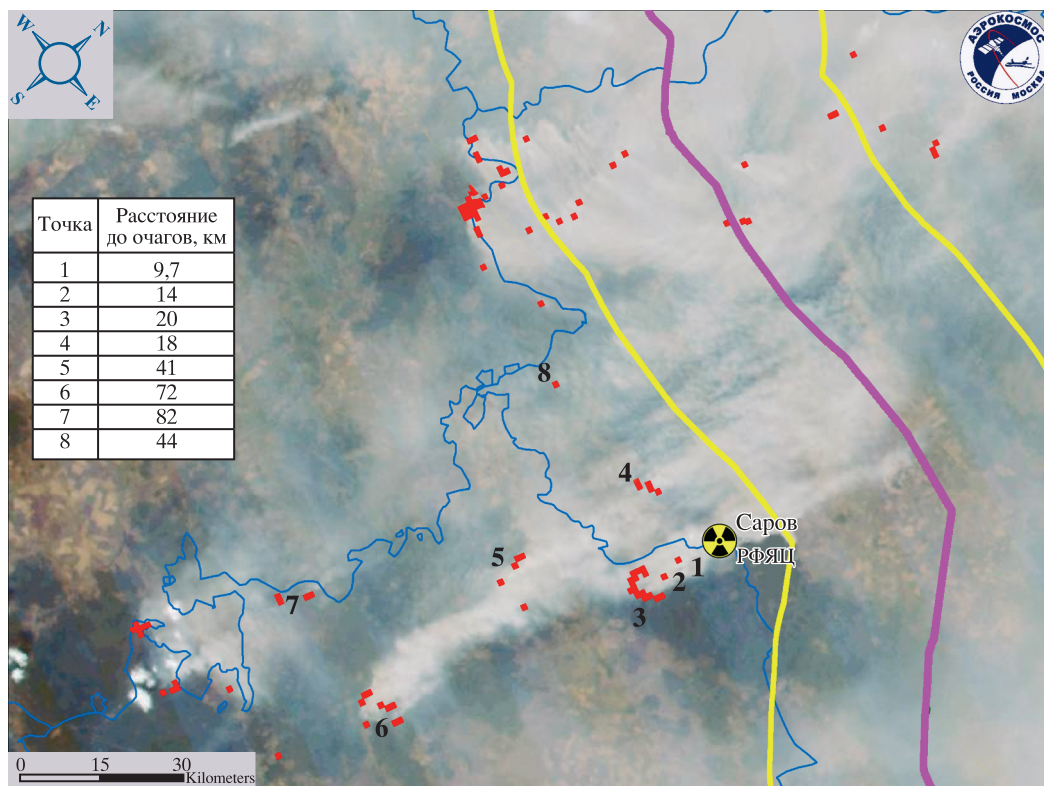


Рис. 8. Пожары, обнаруженные из космоса, в районе Российского Федерального ядерного центра (г. Саров) 3 августа 2010 г. (12:27); сиреневый – ЛЭП; желтый – буферная зона ЛЭП.

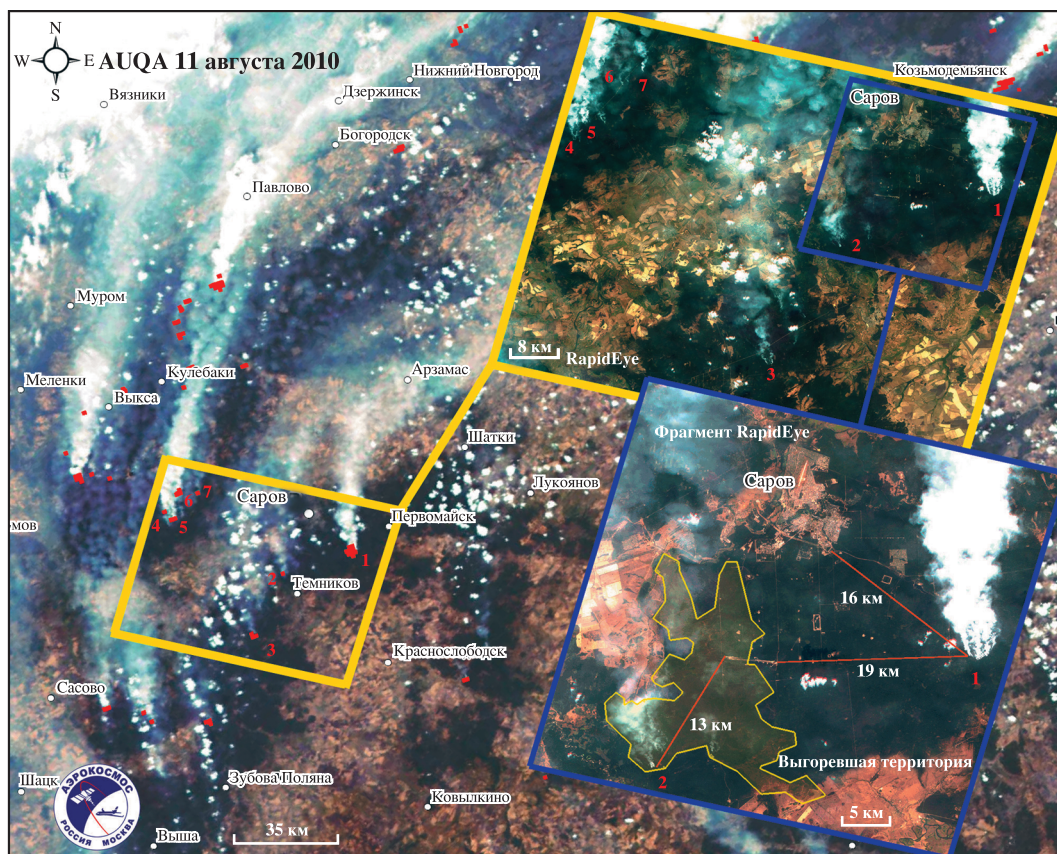


Рис. 9. Мониторинг очагов пожаров и выявление выгоревших территорий вблизи г. Саров (11 августа 2010 г.) по космическим изображениям, полученным со спутников Aqua (аппаратура MODIS) и RapidEye (пространственное разрешение 6.5 м).

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА № 3 2011 (Вклейка к ст. Бондура В.Г.)



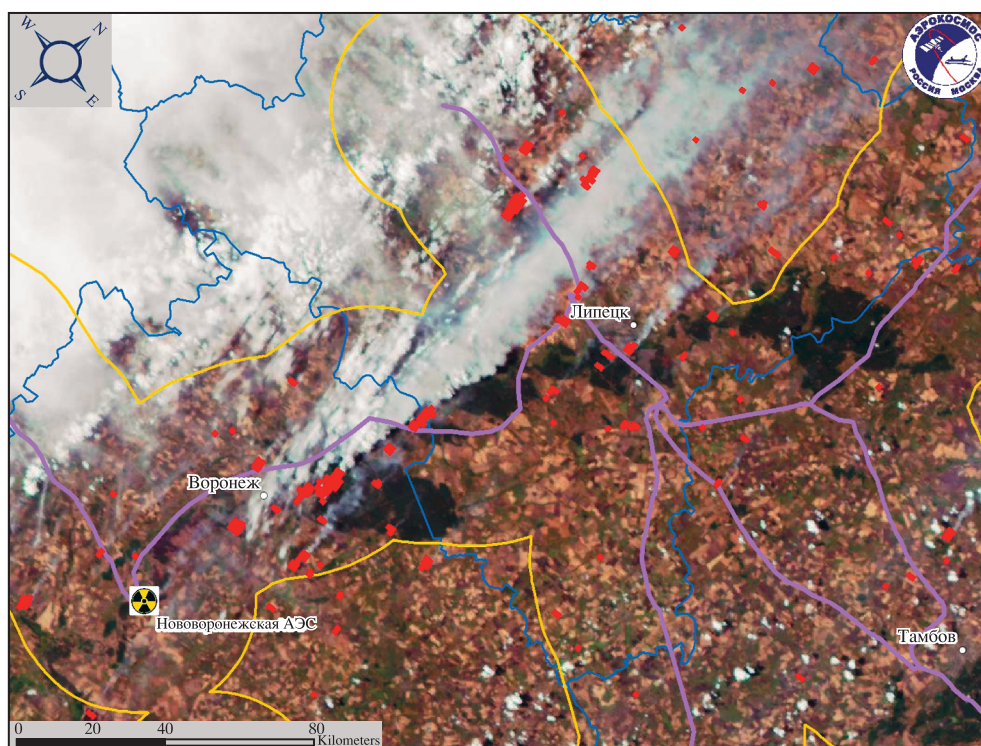
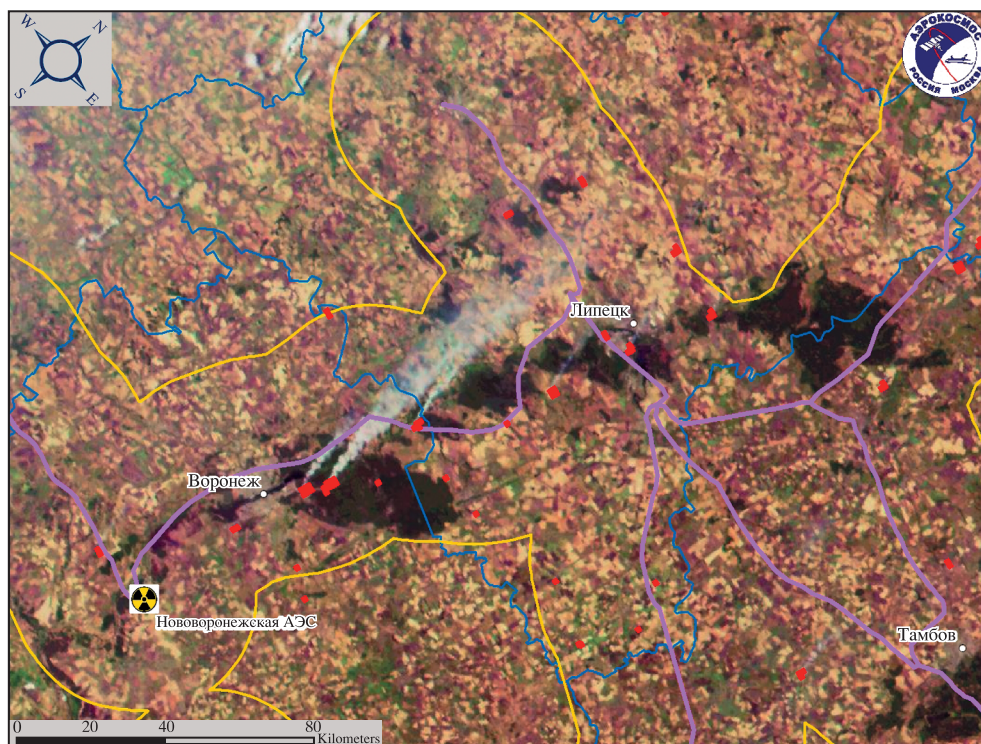


Рис. 10. Динамика развития природных пожаров 29 июля 2010 г. вблизи Нововоронежской АЭС, выявленных по космическим данным, полученным в 12:00 (а) и в 13:58 (б).



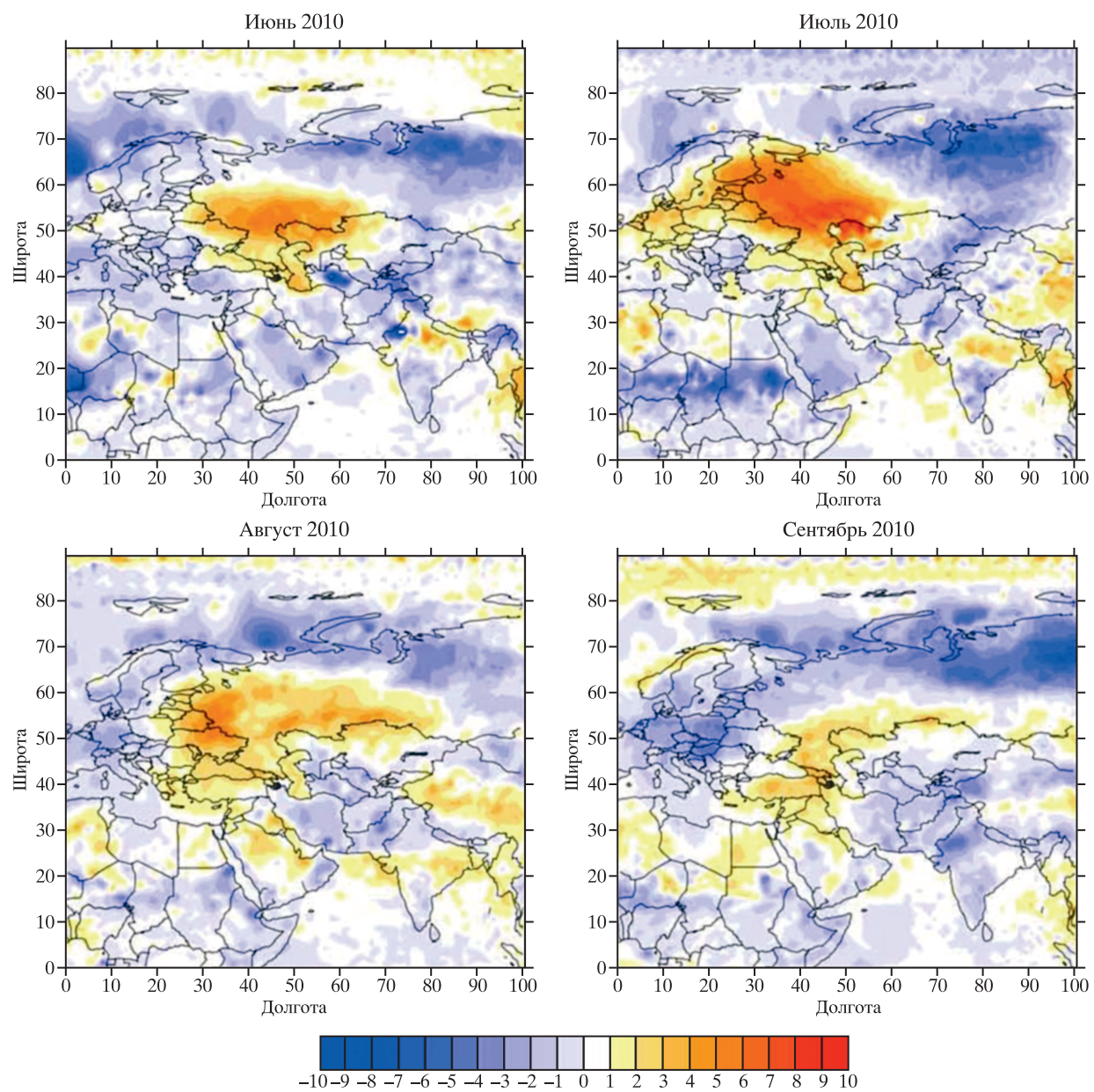


Рис. 11. Тепловые аномалии, сформировавшиеся с июня по сентябрь 2010 г. в Европейской части России по данным аппаратуры AIRS, спутник Aqua (<http://mirador.gsfc.nasa.gov>).

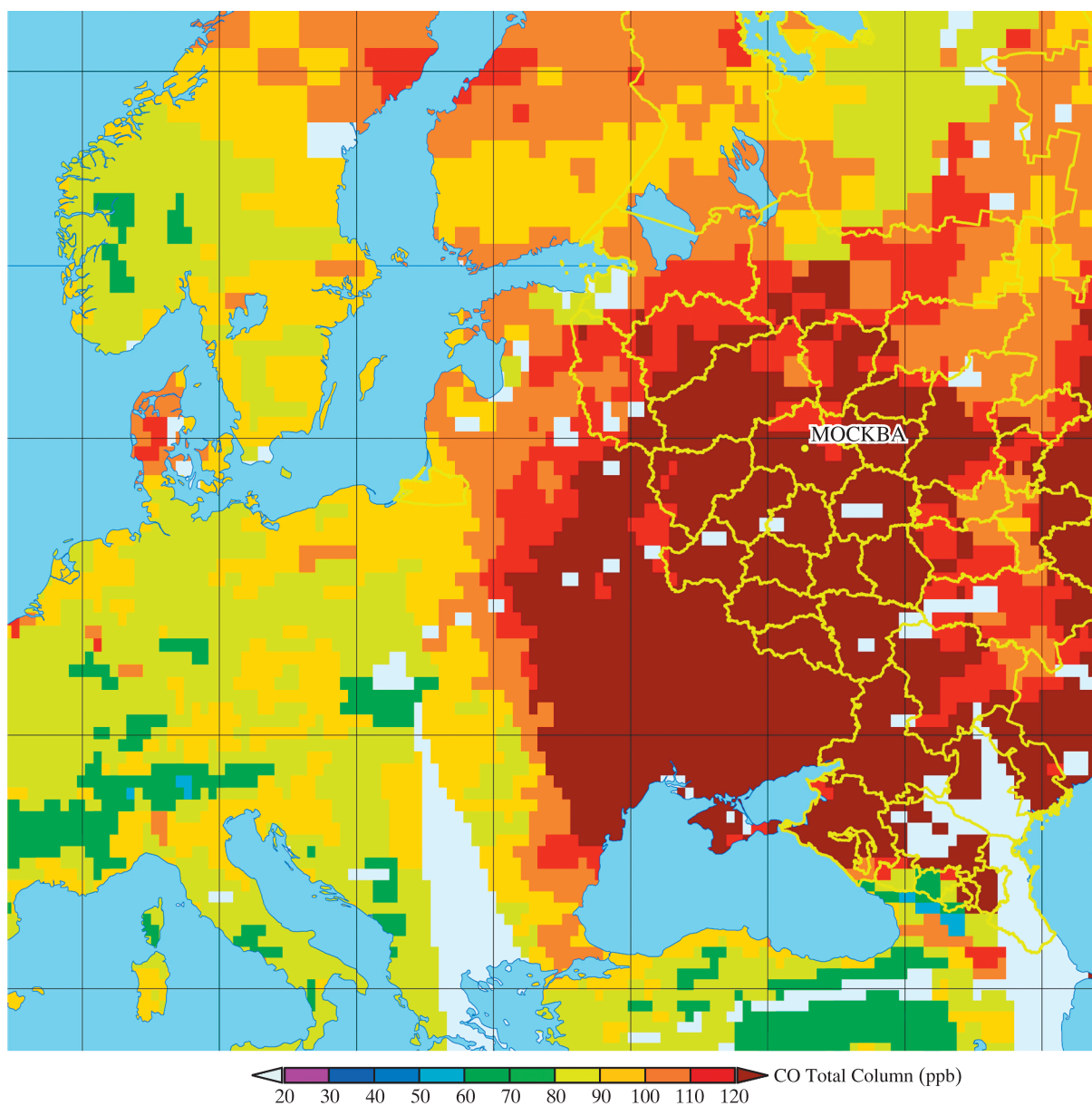


Рис. 15. Распределение концентрации CO на высотах от 2 до 10 км для 15 августа 2010 г. над Восточной и Центральной Европой, построенное по данным спутника Aqua (аппаратура AIRS) (http://airs.jpl.nasa.gov/maps/satellite_feed/).