

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ И НАБЛЮДЕНИЕ РАЗНЫХ СТАДИЙ ИХ РАЗВИТИЯ ПО ДАННЫМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОГО АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2012 г. В. В. Козодеров<sup>1</sup>, А. А. Кулешов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

<sup>2</sup>Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

E-mail: vkozod@mes.msu.ru

Поступила в редакцию 23.03.2011 г.

Рассматриваются особенности модельного описания распространения лесных пожаров от очага их возникновения вместе с формированием изображений природно-техногенных объектов (водоемов, дорожно-транспортных сетей, лесных экосистем), охваченных дымом разной интенсивности, по данным их гиперспектрального аэрозондирования. Описываются приложения данных гиперспектрального аэрозондирования для прогнозирования возможной опасности от продуктов горения. Демонстрируются примеры модельных расчетов распространения фронта лесного пожара и характерные спектры разных объектов: водоемов при задымлении от пожаров, различных типов зеленой и пожелтевшей растительности, гарей и др. Показаны перспективы использования данных гиперспектрального аэрозондирования для распознавания перечисленных объектов.

**Ключевые слова:** лесные пожары, математическое моделирование, гиперспектральные аэрокосмические изображения, распознавание объектов

### ВВЕДЕНИЕ

Лесным пожаром обычно называется явление неуправляемого многостадийного горения на покрытой лесом площади. При моделировании такого сложного природного явления лес рассматривают как многоярусную систему, состоящую из органического вещества – лесных горючих материалов (ЛГМ) с близкими геометрическими и физико-химическими параметрами (плотность, влагосодержание и др.) в каждом выделенном ярусе леса. Например, можно рассматривать трехъярусную структуру леса: трава и мелкий кустарник, подрост и деревья небольшой высоты, кроны высоких деревьев. Появляются возможности характеризовать соответственно низовые и верховые пожары в зависимости от указанного яруса при проведении модельных расчетов (Кулешов, Мыщецкая, 2008).

Лесные горючие материалы содержат углерод, различные углеводородные соединения, воду и т.д. При нагревании ЛГМ до температуры выше примерно 370 К еще до воспламенения (температура воспламенения ЛГМ составляет примерно 500 К) происходит пиролиз – термическое разложение ЛГМ с выделением горючих газов (окись углерода CO, метан CH<sub>4</sub>, водород H<sub>2</sub> и др.), негорючих газов (двуокись углерода CO<sub>2</sub>, пары воды H<sub>2</sub>O и др.), дисперсных частиц сажи и с образованием твердого остатка – коксика и золы.

Зона пожара, расположенная между сгоревшими и несгоревшими ЛГМ, называется фронтом пожара. Фронт пожара имеет переднюю и заднюю кромки. Во фронте пожара происходит наиболее сильное изменение параметров среды, а за задней кромкой фронта могут проходить процессы тления (беспламенного горения) твердых остатков пиролиза ЛГМ.

Механизм распространения лесного пожара в общих чертах таков: во фронте пожара происходит горение летучих (газы и дисперсная сажа) и конденсированных (коксик) продуктов пиролиза ЛГМ. В результате переноса тепла (конвективно, диффузионно и излучением) происходит нагрев находящейся перед фронтом органической массы, затем сушка, пиролиз и зажигание продуктов пиролиза, и далее процесс повторяется.

Лесные пожары являются мощным генератором большого количества аэрозольных частиц, которые, поступая в атмосферу, значительно меняют ее оптические характеристики. С точки зрения дистанционного зондирования (ДЗ), лесные пожары наблюдают сквозь атмосферную среду разной степени задымления в зависимости от интенсивности возгорания. Особый интерес представляют данные гиперспектрального зондирования (сотни спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области), которые содержат информацию о линиях и полосах поглощения солнечного излучения атмосферой и объектами

земной поверхности (Козодеров и др., 2010). Спектральное разрешение такой аппаратуры достигает единиц нанометра.

Влияние таких атмосферных соединений, как кислород, озон, водяной пар, углекислый газ, приводит к тому, что регистрируемые спектры имеют максимумы и минимумы вследствие существования указанных линий и полос. Такие пигменты растительного покрова, как хлорофиллы, содержат свои характерные линии поглощения в области 620–670 нм и вблизи 430 нм. Идентификация молекулярных соединений, обуславливающих немонокотонный характер спектров, связана с микроскопическим уровнем описания взаимодействия солнечного излучения с соответствующими природными средами. Процесс нахождения связей между регистрируемыми спектрами и составом и строением указанных сред получил название нанодиагностики состояния этих сред (Козодеров и др., 2009). Для лесных экосистем полученные результаты увязываются с биохимическими свойствами листовой поверхности, в частности, с ее поглощательной способностью той части приходящего солнечного излучения, которая идет на фотосинтез.

Высокое спектральное разрешение исходных данных способствует повышению информационного содержания обрабатываемых гиперспектральных изображений в сравнении с данными многоспектрального зондирования (6–7 спектральных каналов). Однако большое число спектральных каналов усложняет проблему распознавания природно-техногенных объектов на макроскопическом уровне описания формирования обрабатываемых изображений по данным гиперспектрального зондирования, так как данные близких каналов могут быть линейно зависимы, что приводит к неустойчивости решаемых систем уравнений для разных каналов и обучающих элементов разрешения (пикселов). В итоге оказывается, что исследования по обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений охватывают диагностику природно-техногенных объектов и информационные технологии распознавания этих объектов и оценки их состояния.

Примеры космического мониторинга пожаров в условиях экстремальной засухи приведены в работе (Бондур, 2011). Показаны особенности эмиссии различных газовых компонент и частиц аэрозоля в атмосферу за счет продуктов горения, включая лесные горючие материалы, содержание которых в реальности можно определить по данным аэрокосмической гиперспектрометрии.

Цель данной публикации – рассмотрение особенностей модельного описания возникновения лесных пожаров и их распространения на местности вместе с мониторингом разных стадий проявления пожаров в виде характерных данных гиперспектрального зондирования выбранных сцен.

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Рассмотрение проблемы математического моделирования пожаров обычно начинается с модельного описания зоны пожара, под которой понимается часть природной среды, внутри которой термодинамические параметры отличаются от равновесных значений вследствие изменения температуры и состава окружающей среды при физико-химических превращениях во фронте пожара. Эти параметры модельных расчетов определяются погодными условиями и типом растительности (Гришин, 1992). Леса Сибири обладают огромными сырьевыми запасами и выполняют глобальные экологические функции, являясь стоком органических соединений (углекислого газа, метана и др.). Считается, что “экологический потенциал” лесов Сибири существенно подорван вследствие возрастающего воздействия пожаров (Copard et al., 2002). Согласно наиболее вероятным сценариям, возможное потепление климата повлечет увеличение горимости лесов, количества выбрасываемой в атмосферу двуокиси углерода и других газов, называемых парниковыми.

Лесные пожары – важный возмущающий фактор экологического состояния выбранной территории. Для изучения этих возмущений в лесах бореальной зоны используют аэрокосмические изображения территории до и после пожаров (Lewis et al., 2011). В таких лесах существенными становятся процессы послепожарного роста (в биологических исследованиях лесов говорят о процессах сукцессии), изменения баланса углерода, а для таких районов, как Сибирь, еще и деградации вечной мерзлоты. Пожары таких лесов в исторической ретроспективе создают характерную мозаику гарей разных лет (типа “шрамов”, scars), что уже в течение достаточно долгого времени наблюдается со спутников (Kasischke et al., 2008). При этом возрастает роль данных гиперспектрального зондирования для того, чтобы выделить объекты, формирующие отдельные элементы обрабатываемых изображений с анализом тонкой структуры спектров. Разрабатываются модели отдельных частей таких изображений, в которых, наряду с древесной массой и фитоеlementами, в пределы поля зрения аппаратуры попадают различные компоненты межкрупного пространства – мхи и лишайники, травянистый покров и открытые почвы, продукты горения: зола и частично сгоревшие материалы.

При интерпретации данных гиперспектрального зондирования используют векторное представление спектров в признаковом пространстве, размерность которого соответствует числу спектральных каналов. Вектор значений регистрируемых яркостей каждого пиксела моделируется как линейная комбинация спектральных сигнатур указанных компонентов земной поверхности, содержащихся в пикселе. Каждая такая компонента

(в английской транскрипции “endmember”) формирует свой характерный спектр, который обычно увязывают с типом поверхности, чтобы отличить его от тех классов объектов, которые участвуют в вычислительных процедурах распознавания объектов для обрабатываемых наборов пикселей. В практических приложениях вводят градации глубины воздействия пожара с картографированием органического материала приземного слоя леса по данным гиперспектрального зондирования, что позволяет предсказывать потенциальные угрозы текущего или будущего возгорания.

Основная идея приложений данных гиперспектрального аэрозондирования состоит в том, что при высоком пространственном разрешении этих данных появляется возможность сравнения регистрируемых спектров с “эталонными” спектрами соответствующих объектов на земле, уточняя тем самым проективное покрытие указанных объектов в пределах поля зрения аппаратуры гиперспектрального зондирования. В игру вступает тонкая структура спектров, в частности, таких пигментов фотосинтезирующей растительности, как хлорофиллы. В работе (Szekiela et al., 2009) показаны особенности обработки гиперспектральных аэроизображений по данным известной аппаратуры “Компактная самолетная аппаратура, дающая гиперспектральные изображения” (Compact Airborne Spectrographic Imager/CASI). Работая в области длин волн от 0.4 до 0.7 мкм с разрешением около 2.4 нм, эта аппаратура позволяет выделять отдельные линии поглощения атмосферы и земной поверхности. Идут по пути использования второй и даже четвертой производных от регистрируемых спектров (Tsai, Philpot, 1998), чтобы устранить эффект так называемого континуума поглощения. Континуум связан с воздействием крыльев отдельных линий и полос поглощения соответствующих химических соединений. Устранение воздействия этого эффекта позволяет сопоставить влияние наблюдаемых линий и полос, например, для разных типов вод прибрежной зоны, что способствует калибровке прибора по эталонным спектрам, известным из лабораторной спектроскопии.

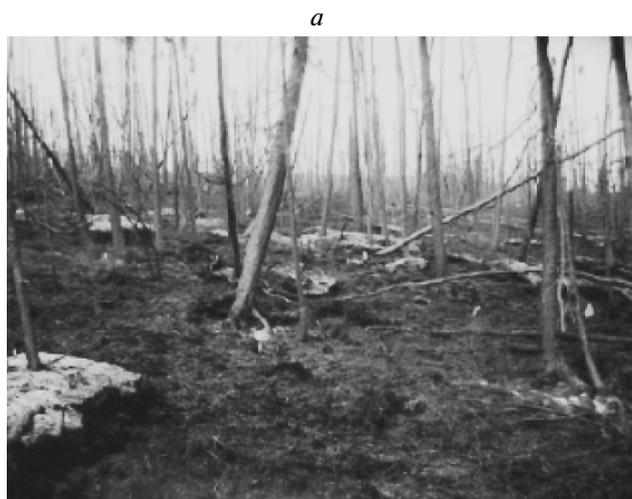
Возвращаясь к проблеме лесных пожаров, отметим, что при оценке уровня их воздействия на окружающую среду (burn severity) по данным спутников Landsat часто рассматривают новые “вегетационные индексы”. Вместо “вегетационных индексов нормализованной разности” (Normalized Difference Vegetation Index/NDVI) вводят “нормализованное отношение выгорания” (Normalized Burn Ratio/NBR), а также аналогичный разностный индекс (dNBR), “композиционный индекс выгорания” (Composite Burn Index/CBI) (Hou et al., 2008). Эти индексы дают представление о градациях углеродных соединений (возможного уровня выгорания топлива, содержащегося в пологе леса и на поверхности земли) при

сравнении данных дистанционного зондирования и наземных обследований.

При использовании данных гиперспектрального аэрозондирования акцент делается на возможности картографирования последствий пожаров при выделении зеленой и выжженной растительности, золы и почвы (Kokaly et al., 2007) при более высоком пространственном разрешении, чем на основе спутниковых данных. В соответствии со сказанным выше относительно того, что отдельный элемент разрешения (пиксел) на изображении представляет собой смесь спектров разных объектов (“endmembers”), требуется разделять эффекты воздействия соседних объектов, искажений, обусловленных приборной функцией и влиянием атмосферы (Huang et al., 2002). Обычно используется приближение линейного перемешивания эффектов указанных выше компонентов для каждого пикселя (Robichaud et al., 2007), что позволяет провести разделение спектров, формируемых разными материалами в пределах поля зрения аппаратуры гиперспектрального зондирования. Открываются возможности построения по данным гиперспектрального зондирования карт сгоревших и несгоревших органических соединений на поверхности, отделения их от минеральных компонентов зольных соединений и т.д. Такие современные исследования должны обосновать реальную роль лесов бореальной зоны как стока углерода при рассмотрении его эмиссии при пожарах в процессе возможного глобального потепления (O’Neill et al., 2003).

Еще одним последствием прохождения сильных лесных пожаров является изменение водопроницаемости лесной подложки, что может приводить к нарушению водного режима водосборов (Lewis et al., 2008). Здесь также важнейшую роль играют данные гиперспектрального зондирования, способствующие выделению отдельных спектров из спектральной смеси данных в пределах каждого пикселя: зеленая и нефотосинтезирующая растительность, почвы, затенения элементов растительного покрова и т.д. Разные пороговые уровни изменения спектров лесной подложки служат для уточнения водопроницаемости соответствующих слоев почвы вследствие лесных пожаров.

Другие особенности использования данных гиперспектрального зондирования для изучения отдельных компонентов лесных экосистем (древесина, кора и пр.) как поставщиков горючих материалов при пожарах изложены в работе (Jia et al., 2006). В ней показано, что данные гиперспектрального зондирования позволяют получать информацию о проективном покрытии почв растительностью, о плотности древесного полога, и на ее основе оценивать риски от возможных пожаров, предсказать возможную опасность от продуктов горения (burn severity). Знание этих факторов способствует прогнозированию возможных



**Рис. 1.** Наземные фотографии последствий лесного пожара (а) и послепожарных восстановительных работ (б).

последствий от лесных пожаров для конкретных лесных массивов.

Данные гиперспектрального аэрозондирования используются также для наблюдения деталей послепожарной обстановки после регенерации молодых посевов на пройденной огнем территории. Конкретный пример типичных последствий лесного пожара приведен на рис. 1а. Можно видеть, что на этой наземной фотографии значительная часть лесной подстилки выгорела, заметны следы оставшегося почвенного покрова и зо-

лы на земле, на стволах и коре деревьев. Можно видеть также отдельные островки оставшегося мха и лишайников. Наземная фотография рис. 1б характеризует пример подраста молодняка (преимущественно сосна) через пару лет после пожара на территории, еще содержащей последствия пожара (видны обугленные стволы деревьев) (Moskal et al., 2001). Данные гиперспектрального зондирования позволяют различить близкие по составу сцены рис. 1а и рис. 1б (в первом случае — под пологом леса преобладают продукты горения, во втором случае видны результаты послепожарных лесовосстановительных работ).

В целом можно отметить, что моделирование последствий лесных пожаров в значительной степени зависит от состояния приземного слоя атмосферы (температура, влажность, скорость и направление ветра). Несовершенство существующих моделей влияния лесных пожаров на окружающую среду усложняет проблему предсказуемости последствий таких пожаров. Более значительные перспективы имеет использование данных ДЗ для понимания особенностей проявления этих пожаров и оценки их последствий по результатам повторных съемок. Здесь рассмотрим примеры модельных расчетов, а также особенности наблюдения разных стадий развития пожаров, разных уровней задымления для разных объектов (лесные экосистемы, гари, водоемы и т.д.).

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Приложения результатов моделирования распространения пожаров и данных аэрокосмического мониторинга пожаров охватывают следующие направления: оценка пожарной опасности; обнаружение источников возгорания; контроль динамики лесных пожаров; оценка площадей, пройденных огнем, и повреждений лесного покрова. Первое из направлений связано с использованием данных дистанционного зондирования в тепловой области спектра и здесь не рассматривается. Применение данных ДЗ наиболее эффективно при реализации второго направления с особым акцентом на данные гиперспектрального зондирования, которые позволяют различать разные источники возникновения дымов (лесные, торфяные пожары и т.д.), их интенсивность. Третье направление связано с возможностями модельного описания воздействия конкретного очага пожара и зависит от текущих метеорологических условий. Возможности четвертого из перечисленных направлений частично рассмотрены выше (данные рис. 1 и смежные проблемы).

Пожары наблюдаются из космоса вследствие характерных контрастов от дымов на окружающем их фоне. При высоком пространственном разрешении на соответствующих изображениях можно наблюдать и открытый огонь от источника возгорания или верхового лесного пожара. Дан-

ные гиперспектрального зондирования способствуют повышению достоверности распознавания разных типов дымов и области открытого огня. Например, в работе (Козодеров и др., 2011) показано, что пламя открытого огня имеет максимум, близкий к тому, который характерен для растительности в области 700 нм. Если пользоваться упрощенным описанием, основанным на значениях NDVI в области полосы поглощения хлорофилла (620 нм) и длины волны 700 нм, то по значениям NDVI соответствующие пиксели будут отнесены к объектам “растительность в нормальном состоянии”, хотя в действительности соответствующие пиксели по данным гиперспектрального аэрозондирования характеризуют разные типы возгорания леса.

Специфика моделирования лесных пожаров состоит в рассмотрении системы осредненных уравнений газовой динамики и уравнений, описывающих изменение объемных долей компонентов твердой фазы и изменение температуры твердой фазы, вместе с балансными соотношениями, характеризующими тепло-, влаго-, энерго- и массообмен между средами. Учитываются скорости химических реакций, потоки через верхнюю границу слоя ЛГМ. Уравнения решаются при заданных начальных и граничных условиях, так что скорость распространения лесного пожара оказывается зависящей от атмосферных условий (скорости и направления приземного ветра) и от свойств лесного полога (плотность древесных пород и расстояние между деревьями, уровень увлажнения). Задача моделирования ставится как задача определения скорости распространения фронта пожара с учетом турбулентного и конвективного переноса тепла, влаги, а также образования и трансформации частиц дымового аэрозоля в пограничном слое атмосферы.

Считается, что разработка математических моделей распространения пожара позволяет предсказать его поведение, что способствует более эффективной борьбе со стихией огня. Однако несовершенство моделей ограничивает соответствующие приложения. Другая трудность – недостаточность информационного обеспечения разработанных математических моделей, в частности, данных о характеристиках горючих материалов, погоде, топографии местности и др. Ввиду сложности расчета процессов горения в течение многих дней на больших территориях задачи математического моделирования лесных пожаров требуют серьезных вычислительных ресурсов. Одним из способов решения проблемы является использование кластерных вычислительных систем. Наиболее общим подходом равномерного распределения вычислительной нагрузки между процессорами при решении задач динамики лесных пожаров является разделение вычислительной области (карты лесной территории) на подобласти, количество которых совпадает с числом используемых процессоров, т.е. ис-

пользование принципа геометрической декомпозиции (Доррер, 2008).

Из наблюдений реальных лесных пожаров установлено (Гришин, 2002), что самостоятельное распространение верхового пожара возможно лишь при наличии достаточно сильного ветра (не менее 3 м/с). Низовой пожар может распространяться и при отсутствии ветра. Часто наблюдается совместное распространение низового и верхового пожаров, причем фронт низового пожара обгоняет фронт верхового, происходят подогрев, сушка, пиролиз ЛГМ и зажигание продуктов пиролиза (сажи и горючих газов) в кронах деревьев, таким образом, низовой пожар “подпитывает” энергией верховой.

Результатом модельных расчетов является построение контуров распространения пожара от источника их возникновения в любые заданные моменты времени, что открывает перспективы прогнозирования последствий реальных пожаров. Спутниковый мониторинг лесных пожаров обычно увязывают с обнаружением условий их возникновения (Спутниковый мониторинг..., 2003). При оценке пожарной опасности учитываются свойства ЛГМ, метеорологические условия, грозовая активность и др.

Моделирование лесных пожаров не ограничивается только описанием процесса распространения фронта пожара. В работе (Plaza et al., 2002) показаны примеры использования параллельных вычислений при разделении спектральной смеси объектов в процессе обработки гиперспектральных изображений. Это новые приложения по оценке последствий пожаров как следствие уточнения особенностей пространственного распределения разных компонентов (зеленая и сторевшая растительность, зола и минеральное питание почв) объектов в пределах поля зрения гиперспектральной аппаратуры.

С появлением данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования возникли новые условия для идентификации вида пожара (лесной или торфяной), определения степени задымления атмосферы (слабое, среднее, сильное) над различными объектами (лесом, водоемами, горячи от предшествующих пожаров).

Другая область применения математического моделирования для изучения лесных экосистем связана с моделями переноса излучения (Goodepough et al., 2003). В этих исследованиях ориентируются на объединение данных гиперспектрального зондирования и данных модельных расчетов уходящего излучения от растительного полога разной плотности. При этом исходят из возможностей классификации породного состава лесной растительности и оценки биофизических и биохимических параметров исследуемых экосистем.

Традиционные подходы визуально-инструментального дешифрирования отдельных сним-

ков аэрокосмического зондирования на основе готового программного обеспечения, поставляемого зарубежными фирмами, оказываются ограниченными вследствие применения таких программных продуктов исключительно для конкретных аппаратных комплексов и заданных процедур обработки данных. В работе (Козодеров и др., 2008) описываются основы создаваемого оригинального программно-алгоритмического обеспечения решения задачи распознавания природно-техногенных объектов и оценки параметров их состояния по данным гиперспектрального зондирования. Исследуются информационные меры близости каждого текущего элемента разрешения на обрабатываемом изображении относительно выбранных наборов “эталонных” объектов и с валидацией получаемой информационной продукции по данным наземных лесотаксационных и других обследований выбранной территории. Акцент делается на отечественные разработки разных версий гиперспектральной аппаратуры и математического обеспечения для обработки данных с этой аппаратуры. При этом используется опыт предшествующей реализации проектов по распознаванию и оценке параметров состояния объектов почвенно-растительного покрова на основе данных многоспектрального (до десятка спектральных каналов в видимой и ближней инфракрасной области) аэрокосмического зондирования. Используется также опыт модельного описания взаимодействия излучения с объектами природно-техногенной сферы, что в совокупности с разрабатываемой аппаратно-программной системой интеллектуальной обработки данных определяет междисциплинарный характер проводимых работ. Некоторые особенности развития технологии обработки данных многоспектрального и гиперспектрального аэрокосмического зондирования изложены в учебном пособии (Козодеров, Кондранин, 2008).

Как было сказано выше, данные гиперспектрального аэрокосмического зондирования позволяют использовать тонкую структуру регистрируемых спектров для повышения информационного содержания обрабатываемых изображений в сравнении с данными многоспектрального зондирования. Возникает необходимость обоснования оптимального числа каналов, способствующих решению задачи распознавания с заданной точностью. Требуется выделить определенный набор этих объектов на обрабатываемом гиперспектральном изображении путем представления всего множества измерительных данных в виде, удобном для визуализации пространственного распределения зарегистрированных пикселей, провести оконтуривание выделенных объектов с расчетом средних спектров и их изменчивости в пределах этих контуров и осуществить обучение используемого классификатора по соответствующей тестовой выборке. Итогом реализации пере-

численных этапов обработки гиперкубов данных (две пространственные координаты и длина волны) является распознавание выделенных классов природно-техногенных объектов путем экстраполяции обучающих данных на все пиксели обрабатываемого гиперспектрального изображения.

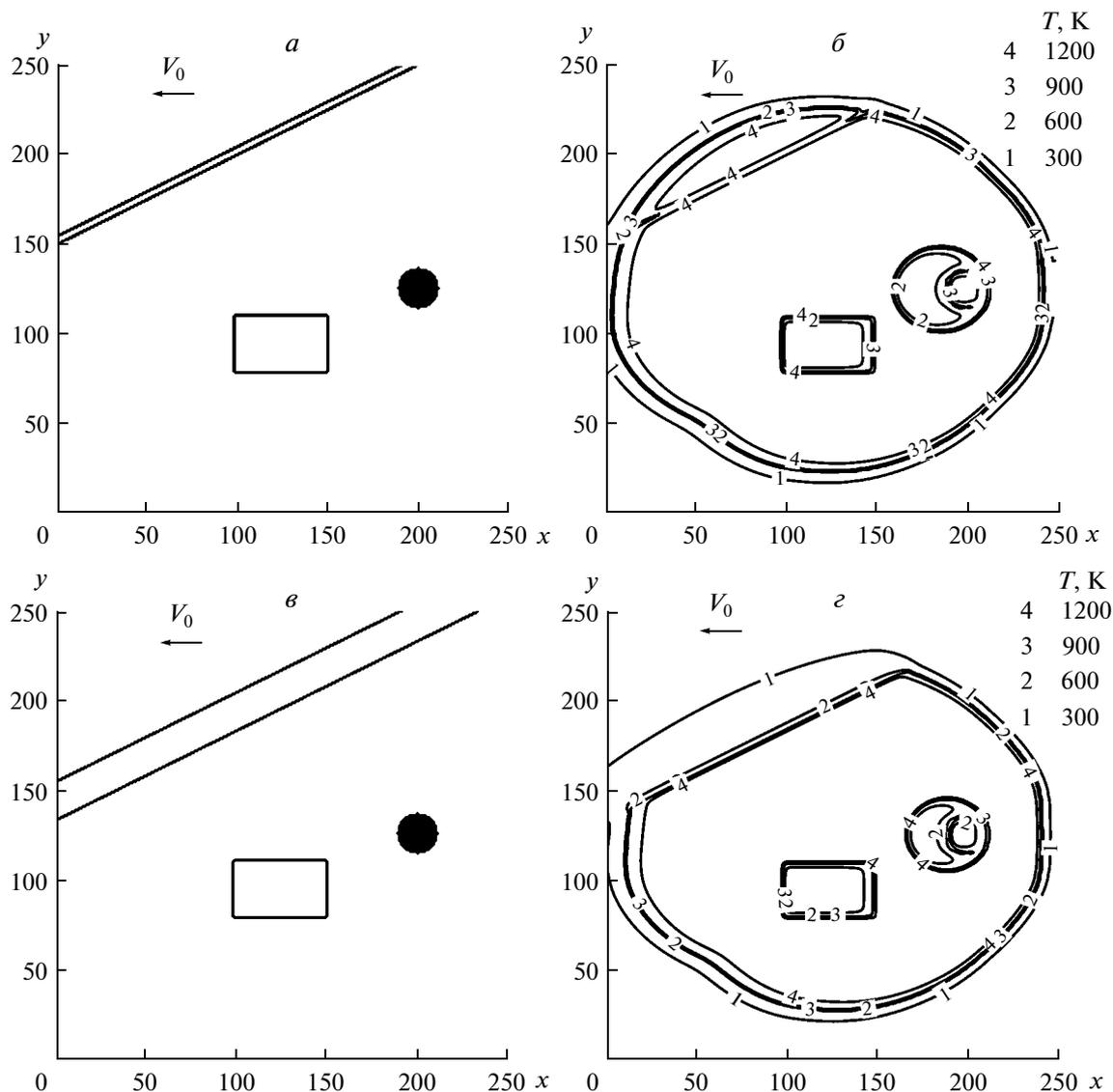
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 представлены результаты демонстрационных расчетов по модели (Кулешов, Мышечкая, 2005) распространения лесного пожара в одном ярусе леса в продуваемом лесном массиве под действием ветра, имеющего скорость  $V_0 = 3$  м/с в направлении, противоположном оси  $Ox$ , в условиях неоднородного распределения запасов ЛГМ. В модели учитывается перенос газовой фазы и ее взаимодействие с твердой фазой, состоящей из ЛГМ и твердых продуктов пиролиза ЛГМ. Учитывается также выбывание субстанции на верхней и нижней границах слоя ЛГМ. Моделируются основные физические процессы (конвективный перенос газовой фазы, вязкость, теплопроводность, турбулентная диффузия и наличие ветра) и химические реакции, а также межфазный теплообмен и обмен лучистой энергией.

На рис. 2а в начальный момент времени схематично изображены поляна прямоугольной формы и дорога, на которых отсутствует растительность. Источник пожара имеет форму круга черного цвета. Размерные оси координат соответствуют расстояниям в метрах. На рис. 2б видно выгорание ЛГМ и распространение температурного фронта пожара приблизительно через 4 часа после появления источника возгорания. Изолинии температуры соответствуют ее четырем представленным градациям (до воспламенения ЛГМ – 300 К, после воспламенения – 600 К, сильное задымление – 900 К, открытое пламя – 1200 К). Фронт пожара в большей степени распространяется в направлении ветра. Температура за задней кромкой фронта постепенно падает. Фронт пожара обтекает поляну и распространяется через узкую дорогу шириной 3 м.

На рис. 2в изображена дорога шириной 20 м, которая служит препятствием для дальнейшего распространения фронта пожара. Фронт пожара не может преодолеть дорогу такой ширины и распространяется вдоль нее по направлению ветра (рис. 2г).

На рис. 3 показано синтезированное изображение гиперспектрометра размерностью  $5400 \times 500$  пикселей для выбранной территории Тверской области, охваченной лесными и торфяными пожарами, на дату аэросъемки 5 августа 2010 г. Видны также лесные массивы, не подверженные пожарам (в правой части), водоемы с разной степенью задымления, дымы от лесных и торфяных пожаров. На рис. 3а показаны контуры объектов, в пределах которых далее будут приведены сред-



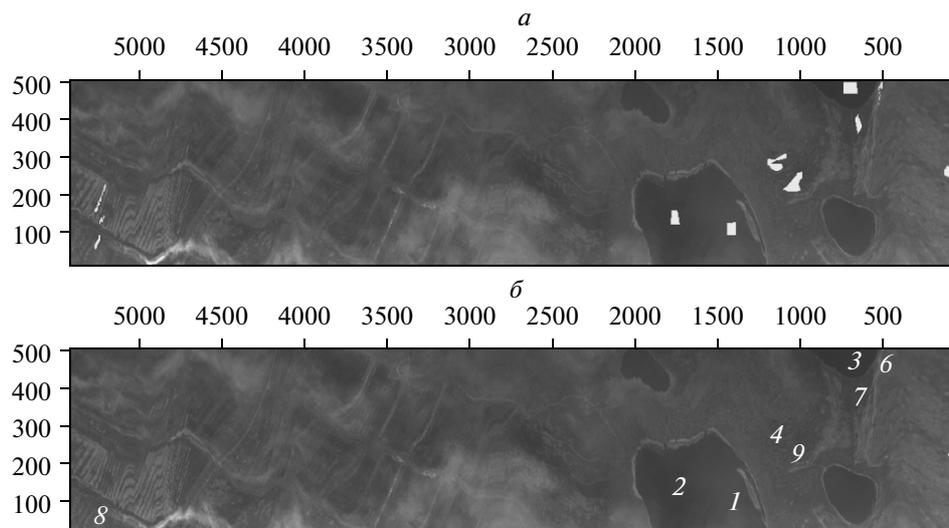
**Рис. 2.** Схематическое изображение источника пожара (круг черного цвета), поляны без растительности (квадрат) и дороги шириной 3 м (а) и 20 м (в), результаты модельных расчетов в виде изолиний температуры через 4 ч после возникновения источника возгорания для этих двух примеров (соответственно б и г).

ние спектры и их стандартные отклонения. Выделено 9 классов объектов (рис. 3б), соответствующих указанным контурам: открытая водная поверхность озера при среднем и слабом задымлении и его отсутствии; зеленая и пожелтевшая растительность, открытая почва; гари от пожаров и выгоревший лес, торфоразработки и т.д.

Для каждого из девяти контуров выбранных классов объектов рис. 3 на рис. 4 приведены средние спектры этих объектов и их стандартные отклонения для исходных спектральных яркостей (рис. 4а, в, д) и спектральных яркостей, нормированных на их интегральные значения в каждом спектральном канале (рис. 4б, г, е). Необходимость такого нормирования диктуется требованиями создания универсальной базы данных спек-

тральных образов различных объектов независимо от условий их текущей съемки. Единицы измерения исходных спектров – Вт/(см<sup>2</sup> мкм стер), нормированных спектров – нм<sup>-1</sup>.

Из данных рис. 4а можно видеть, что спектры всех трех типов объектов (водоемы при присутствии над ними дыма от пожаров, водоемы при наличии над ними слабого и среднего задымления) имеют характерный максимум в области 460–480 нм, амплитуда которого уменьшается по мере уменьшения задымления. Для всех трех типов иллюстрируемых кривых заметно влияние линий и полос поглощения излучения водной поверхностью и атмосферой, которое придает этим спектрам характерную изрезанность. Нормализа-



**Рис. 3.** Отображение выбранной территории по данным аэрогиперспектрометрии с контурами выделенных объектов (*а*) в пределах текущей сцены (*б*): среднее задымление над водой — 1, слабое задымление над водой — 2, чистая вода — 3; зеленый лес — 4, пожелтевшая растительность — 5; песчаная почва — 6; гарь — 7, торфоразработка — 8, горелый лес — 9.

ция спектров приводит к уменьшению влияния задымления атмосферы (рис. 4б) при сохранении общих особенностей спектров, как бы приближая спектры всех трех объектов к спектру водной поверхности при отсутствии задымления над ней.

Иной характер носят кривые на рис. 4в, характеризующие спектры вегетирующей лесной растительности, пожелтевшей травянисто-кустарниковой растительности и песчаной почвы соответственно. Для иллюстрируемого примера зеленой растительности характерно наличие двух небольших максимумов (длины волн 460 нм и 550 нм), минимума в области 670–680 нм, соответствующего максимуму полосы поглощения хлорофилла (основного пигмента фотосинтезирующей растительности), а также основного максимума для длин волн более 720 нм. Спектры, соответствующие песчаной почве, имеют вид монотонного возрастания их амплитуды при переходе от длин волн 400 нм к 720 нм при наличии упомянутой изрезанности вследствие наличия линий и полос поглощения излучения атмосферной средой. Можно заметить влияние полос поглощения кислорода (718 нм и 762 нм), водяного пара (820 нм и 940 нм) и другие особенности спектров в длинноволновой области. Спектры пожелтевшей растительности близки к спектрам открытой почвы во всей области длин волн, за исключением (550–710) нм.

При нормализации спектров (рис. 4г) их амплитуда для зеленой растительности в области коротких волн (400–540 нм) оказывается выше, чем для двух остальных объектов. При этом все три объекта особенно существенно различаются в области длин волн (580–700) нм, слабо различаясь для более длинных волн.

Из данных рис. 4д следует, что амплитуда исходных спектров гарей незначительно отличается по длинам волн, демонстрируя лишь наличие полос поглощения регистрируемого излучения в атмосфере и на земной поверхности. При этом заметны локальные максимумы вблизи 480 нм и 720–850 нм, локальные минимумы вблизи 650–700 и 920–930 нм. Спектры горелого леса и их стандартные отклонения в значительной степени пересекаются со спектрами гарей на всех иллюстрируемых длинах волн, за исключением 480–650 нм, где амплитуды спектров горелого леса незначительно превышают амплитуды спектров гарей. Спектры районов торфоразработок имеют амплитуды, превышающие амплитуды спектров двух других перечисленных объектов во всем диапазоне длин волн (рис. 4д).

Данные рис. 4е для нормированных спектров показывают, что в коротковолновых каналах (длины волн 400–700 нм) амплитуды спектров располагаются в таком порядке: горелый лес имеет максимальную амплитуду, торфоразработки — минимальную амплитуду, а спектры гарей идут между этими двумя экстремумами. Вблизи длины волн 700 нм отмечается точка перегиба, так что для более длинных волн максимальная амплитуда спектров характерна для торфоразработок, а минимальная — для горелого леса. Все три иллюстрируемых примера нормированных спектров демонстрируют их явное отличие от спектров зеленой растительности (рис. 4г): амплитуда спектров зеленой растительности почти 1.5 раза ниже в коротковолновой области и почти в 1.2 раза выше в длинноволновой области, пересекаясь со всем набором иллюстрируемых спектров в области длин волн 700–720 нм.

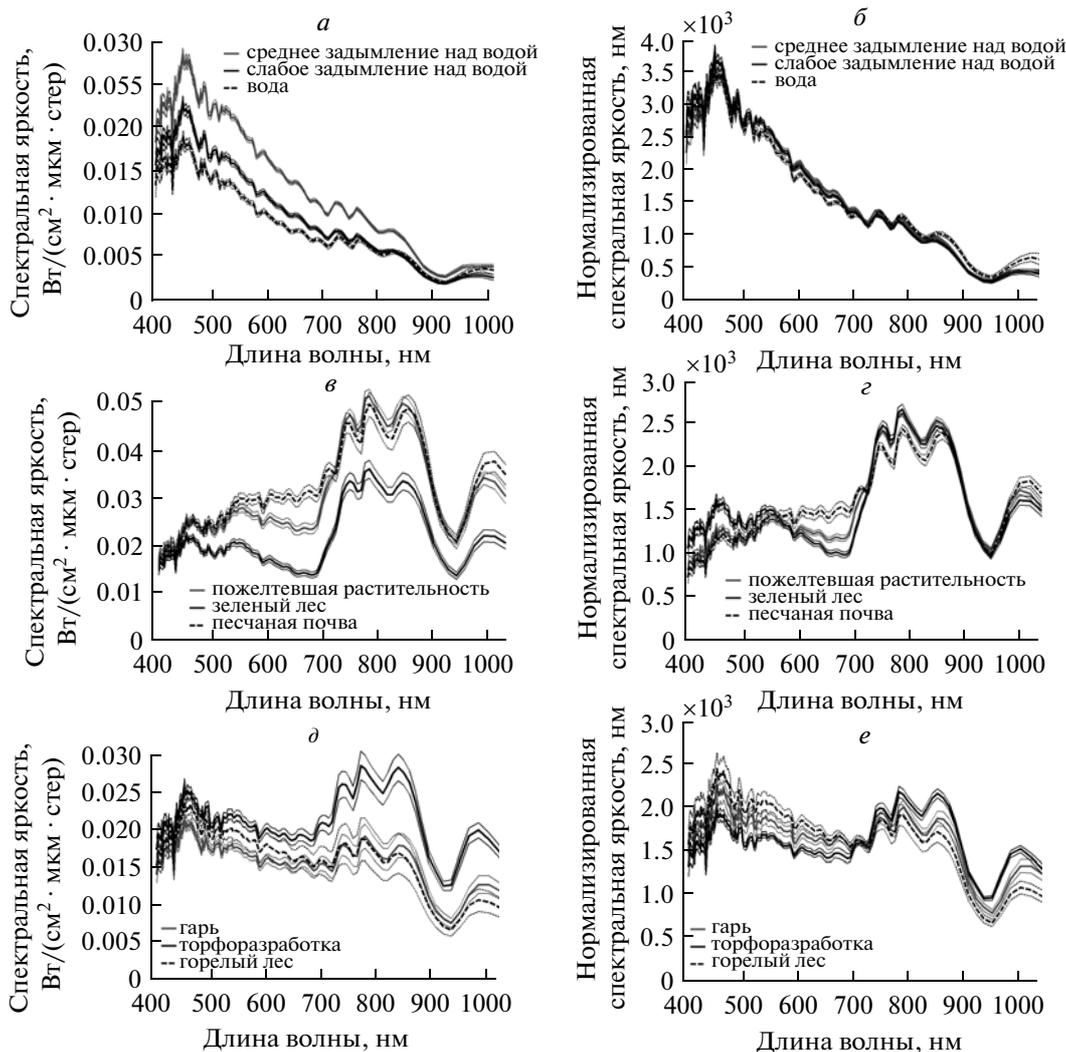


Рис. 4. Исходные средние спектры и их стандартные отклонения (а, в, д) для объектов 1–9 рис. 3, а также нормированные на интегральную яркость спектры и их стандартные отклонения для тех же объектов (б, г, е).

Перечисленные особенности спектрального распределения гиперспектральных данных для выбранных объектов служат для распознавания этих объектов по их спектральным признакам. Распознавание объектов сводится к экстраполяции приведенных выборочных данных (samples) рис. 4 на все элементы разрешения (пиксели) иллюстрируемой сцены. При этом по коротковолновым каналам выделяются пиксели, соответствующие разным уровням задымления территории как отдельного класса выделяемых объектов. В работе (Козодеров и др., 2011) были показаны особенности отображения дымов разной степени интенсивности над лесными экосистемами с разной плотностью полог по данным гиперспектрального аэрозондирования с целью применения квадратичного дискриминантного анализа для распознавания соответствующих объектов. Эта часть исследований здесь не рассматривает-

ся, а внимание уделяется использованию того же классификатора (квадратичного дискриминантного анализа) для распознавания только тех девяти объектов, для которых на рис. 3 показаны контуры обучающих выборочных данных.

На рис. 5а показано относительное число пикселей, относящихся к каждому из девяти выделенных классов объектов. Показаны отношения  $n/N$ , где  $n$  – число обучающих пикселей,  $N$  – общее число всех пикселей (обучающих и распознанных) для выбранных классов объектов. Из данных рис. 5а видно, что число пикселей вновь распознанных гарей по выборке 7 рис. 3 незначительно. Вместе с тем, распознанных пикселей по выборке 4 (зеленый лес) намного больше, чем их содержится внутри обучающего контура этого объекта. Классификатор выдает также большое количество пикселей горелого леса (выборка 9) в сравнении с теми пикселями, которые использу-

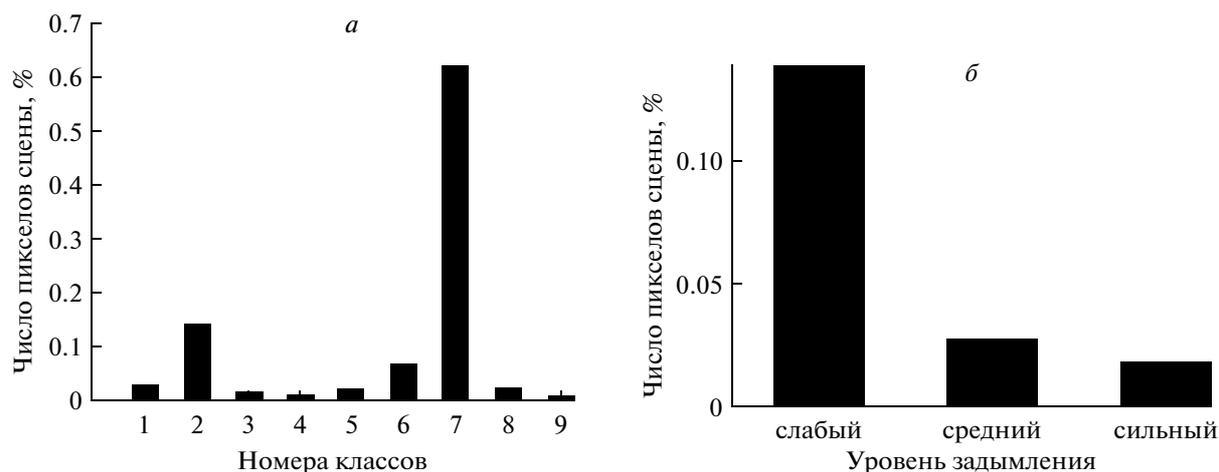


Рис. 5. Относительное число пикселей, соответствующих каждому из девяти выбранных на рис. 3 классов объектов (а) и относительное число пикселей, соответствующих трем разным интенсивностям задымления (слабое, среднее и сильное) водоемов (б).

ются для обучения. Из данных рис. 5а можно видеть также достаточно большие площади водной поверхности (объект 3), не подвергнутые задымлению на изображении рис. 3.

Данные рис. 5б демонстрируют относительное число пикселей, соответствующих трем разным уровням задымления водных объектов: слабое (соответствует обучающей выборке 2 на рис. 3), среднее (выборка 1) и сильное (небольшое число пикселей, не показанных на контурах рис. 3 и на спектральных данных рис. 4).

В целом следует отметить необходимость использования разных классификаторов для оптимизации вычислительных процедур распознавания объектов по гиперспектральным аэрокосмическим изображениям.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Было показано, что моделирование лесных пожаров представляет собой сложную задачу описания распространения фронта пожара от источника его возникновения в зависимости от физико-химических параметров ЛГМ и состояния приземной атмосферы. Показаны важность и перспективы использования данных гиперспектрального аэрокосмического зондирования для мониторинга условий возникновения пожаров и распространения фронта пожаров, задымления от лесных пожаров для различных наблюдаемых объектов, а также для изучения тонкой структуры регистрируемых спектров для разных условий развития пожаров. При обработке гиперспектральных аэрокосмических изображений также появляются возможности повышения точности распознавания объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г. Космический мониторинг природных пожаров в России в условиях аномальной жары в 2010 г. // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 3. С. 3–13.
- Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. 404 с.
- Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Томск: Изд-во Томского университета, 2002. 122 с.
- Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров // Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 400 с.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Борзяк В.В. Инновационная технология обработки многоспектральных космических изображений земной поверхности // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 1. С. 56–72.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования. М.: Изд-во, МФТИ, 2008. 222 с.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Щербаков М.В., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 2. С. 36–54.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Райкунов Г.Г., Казанцев О.Ю., Белоцерковский А.В., Ашташкин А.А., Бобылев В.И., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П., Борзяк В.В., Щербаков М.В., Лесуновский А.А. Аэрокосмическая гиперспектрометрия: летные испытания аппаратуры, программно-алгоритмическое обеспечение обработки данных // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 59–68.
- Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Исследование лесных и торфяных пожаров по данным гиперспектрального аэрозондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 70–79.
- Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением двумерных

- многофазных моделей // Матем. моделиров. 2005. Т. 17. № 1. С. 34–42.
- Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // Матем. моделиров. 2008. Т. 20. № 11. С. 28–34.
- Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы: Аналитический обзор / СО РАН. ИОА. ГПНТБ; Ред. В.В. Белов. Новосибирск, 2003. 135 с.
- Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Jr., Davidenko E.P., Ivanova G.A. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // *Clim. Change*. 2002. V. 55. P. 197–211.
- Lewis S.A., Hudak A.T., Ottmar R.D., Robichaud P.R., Lentile L.B., Hood S.M., Cronan J.B., Morgan P. Using hyperspectral imagery to estimate forest floor consumption from wildfire in boreal forests of Alaska, USA // *Intern. J. Wildland Fire*. 2011. V. 20. P. 255–271.
- Lewis S.A., Robichaud P.R., Frazier B.E., Wu J.Q., Laes D.Y.M. Using hyperspectral imagery to predict post-wildfire soil water repellency // *Geomorph*. 2008. V. 95. P. 192–205.
- Goodenough D.G., Dyk A., Niemann K.O., Pearlman J., Chen H., Han T., Murdoch M., West C. Processing Hyperion and ALI for Forest Classification // *IEEE Transact. Geosci. and Rem. Sens*. 2003. V. 41. P. 1321–1331.
- Hoy E.E., French N.H.F., Turetsky M.R., Trigg S.N., Kasischke E.S. Evaluating the potential of Landsat TM/ETM + imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests // *Intern. J. Wildland Fire*. 2008. V. 17. P. 500–514.
- Huang C., Townshend J.R.G., Liang S., Kalluri S.N.V., DeFries R.S. Impact of a sensor's point spread function on land cover characterization // *Rem. Sens. Environ*. 2002. V. 80(2). P. 203–212.
- Jia G.J., Burke I.C., Kaufmann M.R., Goetz A.F.H., Kindel B., Pu Y. Estimates of forest canopy fuel attributes using hyperspectral data // *Forest Ecol. and Managem.* 2006. V. 229. P. 27–38.
- Kasischke E.S., Turetsky M.R., Ottmar R.D., French N.H.F., Hoy E.H., Kane E.S. Evaluation of the Composite Burn Index for assessing fire severity in Alaska black spruce forests // *Intern. J. Wildland Fire*. 2008. V. 17. P. 515–526.
- Kokaly R.F., Rockwell B.W., Haire S.L., King T.V.V. Characterization of post-fire surface cover, soils, and burn severity at the Cerro Grande Fire, New Mexico, using hyperspectral and multispectral remote sensing // *Rem. Sens. Environ*. 2007. V. 106(3). P. 305–325.
- Johnstone J., Kasischke E.S. Stand-level effects of soil burn severity on post-fire regeneration in a recently burned black spruce forest // *Canad. J. Forest Res*. 2005. V. 35. P. 2151–2163.
- Moskal L.M., Price K., Jakubauskas M.E., Martinko E. Comparison of hyperspectral AVIRIS and Landsat TM imagery forestimating burn site pine seedling regeneration densities in the Central Plateau of Yellowstone National Park // *Proceedings of The 3rd International Forestry and Agriculture Remote Sensing Conference and Exhibition*. Denver, CO, 2001.
- O'Neill K.P., Kasischke E.S., Richter D.D. Seasonal and decadal patterns of soil carbon uptake and emission along an age sequence of burned black spruce stands in interior Alaska // *J. Geophys. Res*. 2003. V. 108(D1). P. 8155. doi:10.1029/2001JD000443.
- Plaza A., Martinez P., Perez R., Plaza J. Spatial/spectral endmember extraction by multidimensional morphological operations // *IEEE Transact. Geosci. and Rem. Sens*. 2002. V. 40. № 9. P. 2025–2041.
- Robichaud P.R., Lewis S.A., Laes D.Y.M., Hudak A.T., Kokaly R.F., Zamudio J.A. Post-fire soil burn severity mapping with hyperspectral image unmixing // *Rem. Sens. Environ*. 2007. V. 108. P. 467–480.
- Szekielda K.H., Bowles J.H., Gillis D.B., Miller W.D. Interpretation of Absorption Bands in Airborne Hyperspectral Radiance Data // *Sensors*. 2009. № 9. P. 2907–2925.
- Tsai T., Philpo W. Derivative analysis of hyperspectral data // *Rem. Sens. Environ*. 1998. V. 66. P. 41–51.

## Forest Fires Modeling and Observation of Different Stages of Their Development Using Hyperspectral Airspace Remote Sensing Data

V. V. Kozoderov<sup>1</sup>, A. A. Kuleshov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University

<sup>2</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, Moscow

Characteristic features of modeling description of fires spreading from the source of their appearance are considered together with natural and anthropogenic objects (water bodies, road and transportation net, forest ecosystems encompassed by smokes of various density and not caused by their influence) imagery forming using their hyperspectral airborne remote sensing data. Applications of hyperspectral airborne data are described from the point of view of studying predictability of possible danger due to burning products of different forest stands density. Examples are revealed of modeling calculations of spreading the forest fire front and of characteristic spectra for various objects: water bodies with different density of smoke from the forest and peat fire sources outside them, various types of green and yellow vegetation, burnt places, etc. Prospects are shown of hyperspectral airborne data use for recognition of the listed objects.

**Keywords:** forest fires, mathematical modeling, hyperspectral airspace imagery, objects recognition