

На правах рукописи

Романов Алексей Андреевич

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА  
ОТ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ TERRA/MODIS

05.11.13 — Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Красноярск – 2008

Работа выполнена в Институте космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета

Научный руководитель доктор технических наук, профессор  
Кашкин Валентин Борисович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор, Доррер Георгий Алексеевич

кандидат технических наук, профессор, Сорокин Владимир Афанасьевич

Ведущая организация Сибирский филиал ФГУ «ВНИИПО МЧС России»

Защита состоится «15» мая 2008 г. в 14.00 часов

на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.05 при Сибирском  
федеральном университете по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского,  
26, аудитория 417.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Сибирского федерального университета

Автореферат разослан «15» апреля 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Вейсов Е.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Лесные пожары (ЛП) являются значительной экологической проблемой для всей территории России, где сосредоточена большая часть бореального пояса нашей планеты. Помимо негативных экологических последствий, ЛП наносят существенные экономические ущербы, связанные как со стоимостью самой древесины, так и с организацией их тушения. В последнее время в нашей стране, и во всем мире, все больше возрастает интерес к проблеме оценки ущербов, связанных с лесными пожарами. Возможны случаи, в которых весьма актуальны вопросы экономической целесообразности тушения ЛП, в особенности при обнаружении на подконтрольной территории нескольких крупных очагов. При этом особое значение имеет оперативность обработки и анализа поступающих данных для своевременного принятия административно-управленческих решений. Поэтому тема диссертационной работы является актуальной.

Принятый в январе 2007 года лесной кодекс, и дополнительные поправки к нему, накладывают особые обязательства на субъекты РФ в вопросах лесопользования и лесоустройства. В связи с этим для объединенного Красноярского края, где находится почти четверть всех лесов России, весьма важна проблема оперативной оценки экономического ущерба, наносимого ЛП.

Сегодня как правило, ущербы, связанные с лесными пожарами, определяются после ликвидации самих ЛП, либо в конце пожарного сезона на основе площадной оценки гарей в рамках лесопожарной инвентаризации. Причинами, по которым раньше не представлялось возможным организовать оперативную оценку экономических ущербов, являются:

1. Устаревшие базы лесотаксационных данных. Эта проблема носит временный характер. В связи с широким распространением новых технологических решений (например, таких как лазерные сканирующие системы, и др.), задача актуализации лесотаксационных данных получила новый этап развития. На федеральном и региональном уровнях ведется работа по внедрению проектов создания детальных карт о состоянии лесного фонда России.

2. Отсутствие спутниковых систем мониторинга больших территорий с высоким пространственным разрешением. Источниками данных, по которым на сегодняшний день можно оперативно производить лесопожарный мониторинг таких регионов как Сибирь, являются спутниковые системы NOAA (сканер AVHRR) и TERRA (прибор MODIS). Пространственное разрешение пожарных каналов этих сканирующих систем — 1,1 и 1 км соответственно (при ведении съемки в надир). На основе данных MODIS можно с высокой точностью оценить площадь малоразмерного пожара, однако определить его координаты внутри квадратно километра не представляется возможным.

В ближайшее время альтернативы спутниковым сканирующим системам для решения задач мониторинга ЛП не будет [1,2]. Поэтому, разработка информационных средств оперативной оценки экономического ущерба от действующих лесных пожаров на основе спутниковых данных, является перспективным направлением, поскольку их внедрение в эксплуатацию

позволит сэкономить затраты на ликвидацию ЛП, а также повысить уровень лесопожарной охраны.

**Цель диссертационной работы** состоит в проектировании информационной технологии комплексирования спутниковых и лесотаксационных данных для оперативной оценки экономического ущерба от действующих лесных пожаров, обнаруженных по радиометрическим данным сканера MODIS (спутник TERRA). Исходя из цели исследования, были определены следующие **основные задачи**:

1. Разработать метод оперативной оценки экономического ущерба от недавно зафиксированных ЛП по спутниковым данным низкого пространственного разрешения.
2. Изучить особенности форматов представления радиометрических данных сканера MODIS. Разработать модуль распаковки данных прибора MODIS для информационного обеспечения алгоритмов первоначальной оценки экономического ущерба от действующих ЛП.
3. Разработать алгоритм формирования последовательности тушения обнаруженных на подконтрольной территории лесных пожаров, согласно которой общий экономический ущерб от них будет минимальным.
4. Разработать метод оперативного прогнозирования величины экономического ущерба от недавно обнаруженных ЛП.

**Методы исследования.** При выполнении работы использовались: методы анализа и обработки данных дистанционного зондирования Земли из космоса; методы математической статистики; нейросетевые подходы; методы проектирования распределенных информационных систем.

**Научная новизна решения поставленных задач:**

1. Предложен метод оперативного формирования информационного отчета об актуальной пожарной обстановке, на основе комплексной обработки радиометрических данных MODIS, который учитывает особенности архитектуры сканера, и позволяет исключить эффект наложения участков смежных сканов.
2. На основе предложенного метода впервые разработан алгоритм оперативного определения экономического ущерба от лесных пожаров, позволяющий получить стоимостные оценки на первоначальной стадии их обнаружения. В отличие от существующих на сегодняшний день методов инвентаризации, этот алгоритм не требует времени на получение и обработку данных сканирующих систем высокого пространственного разрешения.
3. Предложен метод оперативного прогнозирования ущерба от действующих лесных пожаров, на основе вербализации нейронной сети, обучающей выборкой для которой являются результаты стандартных методов послепожарной инвентаризации.

**Научная и практическая ценность диссертационной работы.** Впервые на русском языке подробно представлены характеристики форматов представления данных MODIS, и описаны средства доступа к ним. Это может быть использовано как в образовательных процессах, так и при создании новых

программных средств тематической обработки радиометрических данных TERRA/MODIS. Полученные в диссертации результаты могут служить основой для дальнейших разработок информационных технологий оперативного лесопожарного мониторинга, учитывающие влияние рельефа, и др. важных параметров. Предложенные в настоящей работе алгоритмы и методы могут быть адаптированы для реализации оперативной оценки экологического ущерба от действующих лесных пожаров.

Представленная в диссертационной работе информационная технология позволяет в режиме реального времени оперативно производить предварительную оценку экономического ущерба от недавно зафиксированных ЛП. Результаты работы могут широко использоваться администрациями регионов, федеральным агентством лесного хозяйства и другими заинтересованными службами в практике принятия административно-управленческих решений, связанных с работами по ликвидации пожаров.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Система алгоритмов для оперативной оценки и прогнозирования экономического ущерба от недавно зафиксированных лесных пожаров.
2. Реализация алгоритмов распаковки и тематической обработки данных TERRA/MODIS на предмет детектирования ЛП, а также алгоритмов оперативной оценки и прогнозирования ущерба от них, в виде распределенных модулей для информационной поддержки принятия решений по организации тушения лесных пожаров.
3. Алгоритм оперативного формирования последовательности тушения ЛП, согласно которой общий экономический ущерб от них будет минимальным.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на Всероссийской научно-практической конференции «Информатика и информационные технологии», КГТУ, Красноярск, 2004 г.;
- на Всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации», НГТУ, Новосибирск, 2004 и 2005 гг.;
- на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», НГТУ, Новосибирск, 2004 и 2005 гг.;
- на Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплекс – проблемы и решения», СибГТУ, Красноярск, 2006 г.;
- на IV Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Институт космических исследований РАН, Москва, 2006 г.;
- на IV Международной конференции «Аэрокосмические методы и Геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве», Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, 2007 г.;
- на XI Международной научной конференции «Решетневские чтения», Сибирский государственный аэрокосмический университет, Красноярск, 2007 г.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, из которых 2 статьи в рецензируемых отечественных научных журналах из списка изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций кандидатов и докторов наук.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из: введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 82 наименований; содержит 22 рисунка и 16 таблиц. Основной объем работы составляет 131 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и направления исследований, рассмотрены их новизна, научная и практическая значимость. Также изложены основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** диссертационной работы является обзорной, и посвящена проблеме мониторинга лесных пожаров по данным системы TERRA/MODIS. В этой части работы раскрыты основные особенности форматов представления собираемых ею радиометрических данных; описаны проблемы, связанные с их визуализацией; представлена характеристика библиотек доступа к ним. Дано теоретическое обоснование детектирования лесных пожаров по спутниковым данным низкого пространственного разрешения. Представлен обзор программных средств чтения данных MODIS. Обоснован выбор пожарных каналов MODIS в качестве основных источников информации для решения поставленных в диссертационной работе задач.

По своим техническим характеристикам, гиперспектральная система MODIS является усовершенствованным продолжением сканера AVHRR (спутник NOAA). Широкий спектральный диапазон прибора MODIS (0,4 – 14 мкм) обеспечивается 36-тью каналами. При этом в диапазонах 620 – 670 и 841 – 876 нм съемка ведется с разрешением в 250 м; ещё в пяти каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазона — с разрешением в 500 м, а в остальных 29 каналах (0,6 – 14 мкм) пространственное разрешение составляет 1 км. Для решения задач лесопожарного мониторинга можно использовать следующие каналы, предусмотренные в конструкции сканера: 21-ый (3,929 – 3,989 мкм) и 31-ый (10,780 – 11,280 мкм). По сравнению с тепловым каналом AVHRR пожарный канал прибора MODIS имеет более высокий порог насыщения (500 К). Помимо этого, радиометрические данные, собранные с его помощью, кодируются 12-ти битными словами (у AVHRR 10-ти битными). Это позволяет на их основе более точно детектировать малоразмерные лесные пожары, площадь которых много меньше пространственного разрешения самого сканера. Система TERRA/MODIS функционирует в режиме прямого вещания, что обеспечивает свободный доступ к собираемым ею данным; полоса обзора составляет около 2300 км; частота приема данных — минимум два раза в сутки. Благодаря этому, сканер MODIS получил широкое распространение, и на сегодняшний день, он является единственным источником оперативных данных об актуальной пожарной обстановке на больших территориях.

Для эффективного использования данных MODIS на стадии его проектировки были созданы специальные научные группы, силами которых были разработаны алгоритмы тематической обработки многоспектральных измерений параметров суши на предмет обнаружения ЛП, а также калибровки самого прибора. И в настоящее время они поддерживают процессы сбора и обработки данных MODIS в масштабе всего земного шара. Однако эти материалы, имеющие глобальный характер для планеты в целом, не всегда применимы для качественных исследований отдельно рассматриваемых регионов. Поэтому для решения прикладных задач, в некоторых случаях целесообразно разрабатывать собственные информационные приложения, учитывающие специфику конкретной задачи и региона исследований.

По степени обработки данные MODIS делятся на продукты нескольких уровней. Level 0 представляет собой первичный поток пакетов в PDS-файлах, где радиометрические данные записаны так, как они формируются сканером на борту спутника. Продукты уровня Level 1 представляют собой результат распаковки данных Level 0. В них растровые данные собраны из «сырых» пакетов файлов формата PDS в многомерные массивы, удобные для оперирования с ними как с организованными наборами данных. В результате распаковки из одного файла PDS формируется один файл уровня Level 1A. Продукты Level 1B являются результатом калибровки данных Level 1A, в результате которой формируются четыре файла в формате HDF, которые содержат данные разных пространственных разрешений MODIS и дополнительные сведения. Характерной особенностью данных, собранных радиометром MODIS, является географическая привязка, которую можно проводить сразу после их получения на станцию, так как она формируется на борту и передается непосредственно в потоке бортовой телеметрии. Файл формата HDF состоит из совокупности наборов данных: многомерных массивов и таблиц, а также метаданных, позволяющих правильно интерпретировать радиометрические данные сканера MODIS. Специально для доступа к продуктам Level 1B специалистами CIMSS (*Cooperative Institute for Meteorological Satellite*) был разработан интерфейс M-API (см. рис. 1). Набор инструментариев SDP облегчает решение некоторых задач обработки спутниковых данных. Непосредственный доступ к радиометрическим данным MODIS, обеспечиваю функции группы HDF. При этом интерфейс M-API в некоторой мере упрощает процессы чтения данных сканера MODIS.

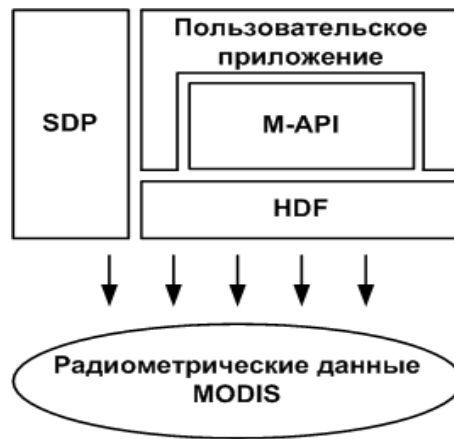


Рисунок 1 – Интерфейсы доступа к данным Level 1B в формате HDF

Основной проблемой, часто проявляющейся при обработке данных MODIS, является эффект наложения частей соседних сканов изображения, так называемый «эффект бабочки». Это происходит вследствие кривизны поверхности Земли и конструкции сканера. В результате возможно удвоение одних и тех же объектов на краях изображения с одинаковыми параметрами, что может отрицательно сказаться на точности детектирования пожаров.

Сегодня предлагается несколько программных продуктов, по обработке спутниковых данных, в том числе и радиометра MODIS. Однако, применительно к задачам, решаемым в диссертации, они имеют ряд недостатков. В большинстве своем, эти программные пакеты ориентированы на решение широкого круга задач, посредством обработки спутниковых данных многих космических систем. При этом у пользователя не всегда имеется возможность адаптировать реализованные в них алгоритмы обработки радиометрических данных, для достижения узконаправленных целей.

**Вторая глава** работы посвящена подготовке информационных сведений для системы алгоритмов оперативной оценки и прогнозирования экономического ущерба от лесных пожаров. В этой части диссертации представлена реализация алгоритмов чтения радиометрических данных TERRA/MODIS, а также алгоритмов их тематической обработки на предмет обнаружения и оценки площади ЛП, в виде информационного модуля *распаковки*. Основной целью разработки модуля являлось — представление в простом табличном виде информации об актуальной пожарной обстановке на исследуемой территории, которая содержит следующие сведения: количество ЛП, их координаты, площадь на момент обнаружения, удаленность от населенных пунктов и баз лесоохраны. Для этих целей в качестве информационной основы были выбраны продукты сканера MODIS уровня первоначальной обработки Level 1B, так как они калиброваны и имеют географическую привязку.

В данной части работы также предложен метод устранения «эффекта бабочки» на основе соотношений между геометриями реального и идеального (лишенного искажений) сканов MODIS: рассчитывается массив смещений для всех пикселей относительно границ идеального скана. Реализованный в модуле распаковки стандартный алгоритм детектирования лесных пожаров



усовершенствован предварительной обработкой данных MODIS на предмет устранения проблемы удвоения пожарных пикселей.

Функциональным ядром модуля распаковки является интерфейс чтения радиометрических данных M-API, а в качестве хранилища выходных результатов автором работы был выбран SQL-Server (рис. 2). Пользовательский интерфейс модуля позволяет настроить его работу в двух режимах: простом и автоматическом. Первый предполагает выбор конкретного файла данных в формате HDF для его последующей обработки. Во втором режиме модуль распаковки с заданной периодичностью проверяет каталог, содержащий файлы уровня обработки Level 1B.

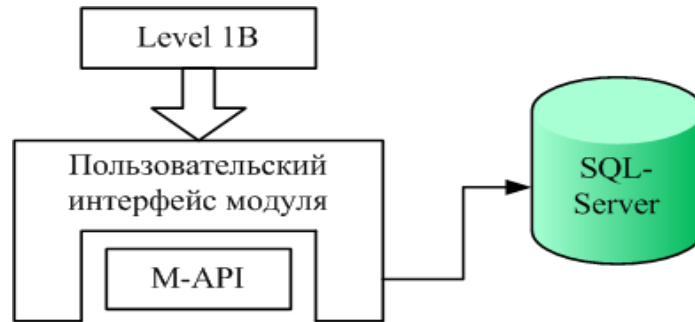


Рисунок 2 – Схема взаимодействия между модулем распаковки и сервером

Помимо этого, интерфейс пользователя модуля распаковки предполагает возможность редактирования всех основных параметров (пороги для яркостных температур; размер апертуры матрицы соседних пикселей; соотношение между регистрируемой высокотемпературной зоной и площадью ЛП) реализованных в нем алгоритмов тематической обработки данных MODIS: пороговый алгоритм обнаружения лесных пожаров [3,4], и метод оценки площади ЛП [5]. Интерфейс модуля позволяет также редактировать справочную информацию, хранящуюся на сервере (лесотаксационные данные; сведения о базах лесоохраны и имеющихся на них технических средствах тушения ЛП, и др.).

Архитектура модуля распаковки данных Level 1B, спроектирована как клиентское приложение, которое может быть запущено на отдельно выделенном от сервера компьютере. Это позволяет распределить нагрузку между несколькими вычислительными машинами. Результат функционирования модуля — набор табличных данных, который является составной частью информационной основы для системы алгоритмов оперативной оценки и прогнозирования экономического ущерба от ЛП. В нем также содержатся расчеты величины погрешностей оценок площадей обнаруженных пожаров: коэффициент вариации и доверительные интервалы для каждой оценки площади пожара, которые учитываются в дальнейшем при определении экономического ущерба.

**Третья глава диссертации** посвящена разработке методов оперативной оценки экономического ущерба от действующих лесных пожаров. Здесь дано понятие лесного пожара, приведены его основные характеристики, описана классификация типов ЛП. Представлена сводная характеристика существующих на сегодняшний день моделей низовых лесных пожаров (в

настоящей работе во всех расчетных моделях пожары рассматриваются как низовые, с произвольной формой, близкой к эллипсу).

Экономический ущерб от действующих ЛП, обнаруженных посредством обработки данных системы TERRA/MODIS (результат функционирования модуля распаковки), предлагается разделять на две составляющие:

- *актуальная* — на момент обнаружения;
- *прогнозируемая* — связанная с вероятным развитием пожара.

В рамках предлагаемой ниже системы алгоритмов оперативной оценки экономического ущерба от ЛП, вводится понятие *удельной цены одного гектара леса* внутри пожарного пикселя (где обнаружен ЛП). При этом, точность оценки пропорциональна полноте доступных лесотаксационных данных. Удельную цену одного гектара предлагается определять, основываясь на цене леса внутри каждой лесотаксационной единицы, которая является базовой составляющей при стандартных инвентаризационных методах оценки ущербов. Для её формирования предлагается использовать следующую расчетную формулу, которая учитывает стоимость одного кубического метра конкретного типа древесины и её запас:

$$C = \frac{(Q_k \cdot C_k + Q_c \cdot C_c + Q_m \cdot C_m + Q_d \cdot C_d) \cdot Q}{Q_{cp}}, \quad (1)$$

где  $Q_i$  — запас крупной, средней, мелкой и дровяной древесины, а  $C_i$  — соответствующая цена;  $Q_{cp}$  — средний запас древесины на гектаре;  $Q$  — общий запас лесотаксационной единицы;  $C$  — стоимость одного гектара внутри лесотаксационной единицы в руб/га, на основании которой, согласно нормативным документам о ставках платы за единицу объема лесных ресурсов, формируется удельная стоимость гектара леса внутри пожарного пикселя. Описание процессов подготовки и импорта лесотаксационных сведений на сервер данных содержится в приложении к работе.

*Ущерб на момент обнаружения лесных пожаров.*

В этой части работы предлагается метод оперативной оценки экономического ущерба, связанного только со стоимостью древесины, охваченной и поврежденной огнем обнаруженных ЛП. Ущерб, связанный с затратами на доставку технических средств тушения и пожарных бригад к месту ЛП, является составной частью *прогнозируемого* экономического ущерба, так как за время доставки площадь пожаров и их периметры изменятся.

Результатом работы модуля распаковки, представленного во второй главе диссертации, являются сведения об актуальной пожарной обстановке. По данным с пространственным разрешением в  $1 \text{ км}^2$  не представляется возможным определить, в какой именно части пикселя находится ЛП, и также нельзя точно охарактеризовать его форму. Весьма достоверно существует лишь возможность оценить площадь ЛП, по найденной площади высокотемпературной зоны. Формально пиксель и обнаруженный внутри него пожар могут быть представлены, как показано на рис. 3:

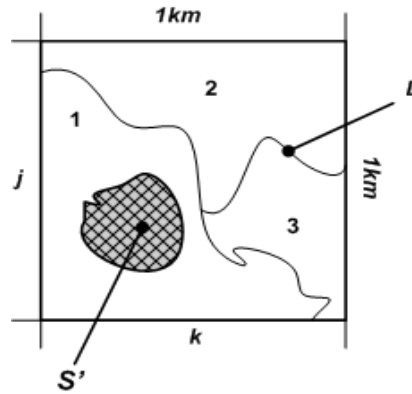


Рисунок 3 – Схематичное представление пожарного пикселя

Здесь:  $S'$  — площадь ЛП,  $L$  — границы лесотаксационных единиц,  $j$  и  $k$  — характеризуют координаты пожарного пикселя общей площадью  $S = 1 \text{ км}^2$ . По паре  $j, k$  можно определить административный район, лесхоз и лесничество, где зафиксирован ЛП. Стоимость одного гектара леса внутри пожарного пикселя ( $Q_{jk}$ ) предлагается сопоставить со случайной величиной, математическое ожидание которой имеет вид:

$$M(Q_{jk}) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot p_i, \quad (2)$$

где  $c_i$  — цена гектара леса  $i$ -ой лесотаксационной единицы, которая определяется по формуле (1);  $p_i$  — геометрическая вероятность, равная  $S_i/S$ , где  $S_i$  — площадь  $i$ -ой лесотаксационной единицы;  $n$  — количество таксационных единиц внутри пожарного пикселя;  $Q_{jk}$  — удельная цена гектара площади внутри пожарного пикселя. Таким образом, расчетную величину экономического ущерба ( $U_{jk}$ ) на момент обнаружения пожара в пределах исследуемого  $j, k$ -пикселя можно оценить по формуле:

$$U_{jk} = S' \cdot M(Q_{jk}), \quad (3)$$

где  $S'$  — площадь лесного пожара.

Это значение актуальной составляющей ущерба является средней величиной. Чем выше точность детализации лесотаксационных данных, тем меньше абсолютная разница между реальной величиной экономического ущерба и его расчетным значением (3). Общий экономический ущерб по всем пожарным пикселям  $n$  на момент обнаружения всех лесных пожаров, будет определяться как сумма каждого расчетного значения  $U_{jk}$ :

$$U = \sum_{jk} U_{jk}. \quad (4)$$

*Точность оценки актуальной составляющей ущерба от ЛП.* Поскольку удельная цена одного гектара леса (2) представляется случайной величиной (подчиняющаяся закону нормального распределения), то для определения точности оценки актуальной составляющей ущерба можно использовать доверительные интервалы и коэффициент вариации. В данном случае дисперсия ( $\sigma$ ) величины  $Q_{jk}$  будет иметь вид:

$$\delta = \sum_i^n p_i \cdot c_i^2 - \left( \sum_i^n p_i \cdot c_i \right)^2, \quad (5)$$

где  $p_i$  — геометрическая вероятность, соответствует площади  $i$ -ой лесотаксационной единицы в гектарах;  $c_i$  — удельная цена одного гектара. Таким образом доверительный интервал для величины, характеризующей удельную цену одного гектара леса внутри пожарного  $j,k$ -пикселя, вычисляется по формуле:

$$Q_1 = M(Q_{jk}) - \delta \ll \alpha \ll M(Q_{jk}) + \delta = Q_2, \quad (6)$$

где:  $Q_1$  и  $Q_2$  — мин. и макс. значения величины цены гектара леса внутри пожарного пикселя;  $\delta = t_\gamma \frac{\sqrt{\delta}}{\sqrt{n}}$  — статистическая величина, ограничивающая доверительный интервал,  $t_\gamma$  — коэффициент надежности оценки. Коэффициент вариации для величины стоимости одного гектара леса внутри пожарного пикселя:

$$V = \frac{\sqrt{\delta}}{M(Q_{jk})}. \quad (7)$$

В диссертации согласно формулам (5,6) для величины актуальной составляющей экономического ущерба на момент обнаружения ЛП производится расчет её мин. и макс. значения; точность первоначальной оценки ущерба от лесного пожара характеризуется коэффициентом вариации (7).

#### *Прогнозируемый экономический ущерб.*

Прогнозируемый ущерб от действующего лесного пожара, помимо затрат на доставку техники и бригад к месту тушения, связан с его развитием. Можно выделить следующие основные явления, характеризующие этот процесс: продвижение фронтов, увеличение площади и периметра ЛП. Все это взаимосвязано между собой, и обуславливается множеством факторов местности, где происходит пожар. Существует несколько моделей динамики распространения низовых лесных пожаров, содержательный обзор большинства из которых представлен в работах [6,7]. Природа лесного пожара очень многообразна, поэтому многие модели ЛП основываются на большом количестве параметров, и вследствие чего не применимы для решения задачи оперативного прогнозирования ущерба по спутниковым данным низкого пространственного разрешения.

В настоящей работе прогнозирование площади пожара основывается на регрессионной зависимости между скоростью ветра и скоростью распространения огня. Для её формирования автором были проанализированы результаты экспериментов, представленные в работах Ротермела [8,9]. Главным критерием выбора этих работ являлся тот факт, что они основывались на значениях всего пяти параметров, которые можно относительно легко определить по спутниковым, метео- и лесотаксационным данным: влагосодержание лесных горючих материалов (ЛГМ), скорость ветра, запас ЛГМ, глубина и плотность слоя. Анализу были подвергнуты результаты 12-ти экспериментов, каждому из которых соответствовало уникальное значение

скорости распространения огня. В качестве математического инструмента для анализа был взят метод наименьших квадратов. Для регрессионной зависимости выбрана линейная форма, так как более полное полиномиальное уравнения регрессии в данном случае получить невозможно:

$$\bar{\gamma} = 1.273 \cdot x_1 - 46.571 \cdot x_2 + 74.265 \cdot x_3 + 15.932 \cdot x_4 - 3.806 \cdot x_5 - 25.691, \quad (8)$$

где  $x_1$  — скорость ветра в м/с;  $x_2$  — запас лесных горючих материалов, кг/м<sup>2</sup>;  $x_3$  — глубина слоя, м;  $x_4$  — плотность слоя, кг/м<sup>3</sup>;  $x_5$  — влагосодержание лесных горючих материалов. В работе была проведена проверка статистической значимости всей регрессии (8), а также отдельных её коэффициентов. Согласно таблице значений  $t$ -распределения Стьюдента, значимыми являются только коэффициенты при  $x_2$  и  $x_3$ . В первую очередь это можно объяснить качеством исходных данных, а именно насколько полно они покрывают пятимерное пространство всех экспериментов. Это также говорит о том, что эксперименты проводились в близких по характеристикам условиях (возможно рельеф, атмосферное давление, и/или др. физические параметры были одинаковыми). Однако, проверка по критерию Фишера показала хорошую значимость всего уравнения (8) в целом: в шесть раз превышено значение минимального порога. Поэтому, в предлагаемой в настоящей работе информационной технологии оперативной оценки ущерба от ЛП, скорость распространения огня оценивается по выражению (8). Такие параметры как: плотность слоя, его глубина и запас горючего материала, предполагается получать из имеющихся лесотаксационных данных на подконтрольный регион. В том случае, если некоторые из них отсутствуют, можно использовать экспериментальные значения. Методика определения влагосодержания ЛГМ по данным сканера MODIS подробно представлена в работе А.И. Сухинина [10]. Помимо этого, существует возможность задавать значения параметров регрессии (8), руководствуясь опытом экспертов. При отсутствии метеосводок на местность, где обнаружен ЛП, скорость ветра задается двумя значениями (мин. и макс. возможными), и прогнозируемая составляющая экономического ущерба (ПСЭУ) рассчитывается для двух крайних оценок скорости распространения огня.

ПСЭУ от действующего лесного пожара зависит от размеров, которые он примет по истечению некоторого периода времени, который связан с принятием управленческих решений, доставкой технических средств и бригад к месту обнаружения, тушением ЛП (выбором метода локализации). Чтобы определить параметры лесного пожара на конкретный момент времени, в данной части работы была адаптирована (для использования радиометрических данных MODIS) математическая модель лесных пожаров, предложенная в работе Г.А. Доррера [11]. Согласно этой модели, скорость с которой увеличивается периметр лесного пожара, определяется по формуле:

$$V_p = 0.12 \cdot \bar{\gamma} \cdot k, \quad (9)$$

где  $\bar{\gamma}$  — скорость распространения огня, которую можно оценить по регрессии (8);  $V_p$  — соответствующая скорость увеличения периметра ЛП; параметр  $k$  вычисляется по выражению:

$$k \approx \frac{\pi}{2(1+e)} \cdot (1.5 + 1.5 \cdot \xi - \sqrt{\xi}) \text{ и } \xi = \sqrt{1-e^2}, e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (10)$$

где  $a$  и  $b$  — полуоси эллипса ЛП, от которых зависит значение его  $e$  — эксцентриситета  $e$ . Чем выше скорость ветра, тем больше эллипс лесного пожара вытянут вдоль главной оси (рис. 4).

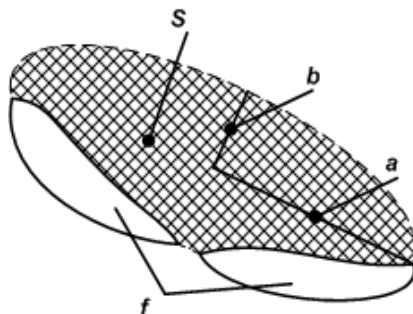


Рисунок 4 – Схематичное представление площади, пройденной лесным пожаром и высокотемпературных зон

Здесь: заштрихованная область  $S$  характеризует пройденную огнем площадь;  $f$  — зоны внешнего фронта ЛП, которые находятся в стадии «горения» — высокотемпературные области внутри пожарного пикселя.

Согласно работам [11], всю выгоревшую в результате лесного пожара площадь можно оценить по следующей формуле:

$$S = \pi \cdot \left( \frac{V_p \cdot (T_0 + T_d + T_n + \tau)}{1+e} \right)^2 \cdot \sqrt{1-e^2}, \quad (11)$$

где  $T_0$  — время с момента обнаружения ЛП до момента принятия управленческого решения;  $T_d$  — время доставки техники;  $T_n$  — время локализации ЛП (14);  $\tau$  — коэффициент, характеризующий процесс распространение ЛП до заградительной полосы (зависит от метода локализации).

По данным километрового разрешения MODIS невозможно точно определить форму пятна пожара. Поэтому была произведена оценка интервала возможных значений для параметра  $k$  (10):

$$\frac{3}{8}\pi \leq k \leq \pi. \quad (12)$$

Случай, при котором пятно ЛП примет форму идеального круга или прямой мало вероятен в реальных условиях, и на практике  $k$  не примет «граничных» значений интервала (12). Для оценки скорости увеличения периметра пожара (9), предлагается учитывать значение коэффициента  $k$  пропорциональное величине скорости ветра: минимальному соответствует значение  $\frac{4}{8}\pi$ , максимальному —  $\frac{7}{8}\pi$ .

Время локализации лесного пожара вычисляется по формуле:

$$T_n \approx \frac{V_p \cdot (T_0 + T_d + \tau)}{V_n - V_p}, \quad (13)$$

где  $V_l$  — скорость локализации, это параметр, характеризующий технологию тушения ЛП (определяется исходя из параметров выбранной технологии тушения) более подробно представлен в работе С.Н. Орловского [12];  $\tau$  характеризует время распространения фронта ЛП до заградительной полосы. В диссертационной работе делается предположение, что в большинстве случаев отношение полуосей эллипса лесного пожара близко к  $\frac{b}{a} = \frac{1}{3}$ . И поэтому, применительно к формуле (11) значение эксцентриситета принимается равным  $e = 0,943$ . Таким образом, прогнозируемая составляющая экономического ущерба от лесного пожара  $U'_{jk}$  внутри исследуемого  $j,k$ -пикселя, может быть оценена по формуле:

$$U'_{jk} = S \cdot M(Q_{jk}), \quad (14)$$

где  $M(Q_{jk})$  — удельная цена одного гектара леса внутри пожарного  $j,k$ -пикселя;  $S$  — площадь лесного пожара на момент времени  $T$ , вычисленная формуле (11) согласно выбранной технологии тушения и методу локализации.

Полный прогнозируемый ущерб от пожара ( $Z_{j,k}$ ), связанный с доставкой технических средств тушения, пожарных бригад к месту обнаружения ЛП с координатами  $j,k$ , и со стоимостью его локализации, предлагается определять по следующей формуле:

$$Z_{jk} = f \cdot T_o \cdot C_o + T_l \cdot C_l + U'_{jk}, \quad (15)$$

где  $C_o$  — стоимость часа доставки технических средств тушения и пожарных бригад и  $C_l$  — стоимость часа локализации ЛП выбранным методом;  $f = 2$  — коэффициент, характеризующий время возврата технических средств и бригад;  $U'_{jk}$  — прогнозируемая составляющая экономического ущерба на момент времени  $T$ . Для формулы (15) момент времени, на который рассчитывается прогнозируемый экономический ущерб, следует определять как сумму:

$$T = 2T_o + T_l, \quad (16)$$

где  $T_o$  — время доставки техники;  $T_l$  — время локализации ЛП. Таким образом, время  $T$  будет характеризовать момент, когда пожар будет потушен, и соответствующие технические средства возвращены на место постоянной дислокации.

Представленные в третьей главе работы формулы первоначальной оценки экономического ущерба от ЛП, реализованы в виде информационного модуля *оперативной оценки ущерба*, пользовательский интерфейс которого позволяет редактировать каждый из основных параметров расчетных моделей. Здесь не учитывался ряд важных факторов, влияющих на процесс развития лесного пожара и на соответствующую величину ПСЭУ, а именно: параметры рельефа местности, а также тот факт, что каждая точка фронта ЛП движется с собственной скоростью, а форма эллипса не всегда точно характеризует природу пожара. Тем не менее, по предложенному в этой части работы методу оперативной оценки прогнозируемой составляющей экономического ущерба,

можно производить предварительные расчеты. В пятой главе работы представлены направления повышения точности оперативных оценок.

**В четвертой главе** представлено решение задачи оперативного формирования последовательности, согласно которой следует тушить недавно обнаруженные лесные пожары, чтобы общий ущерб от них был минимальным. Рассматривается проблема, возникающая при обнаружении нескольких крупных ЛП. Поскольку материальные и технические ресурсы баз лесоохраны лимитированы, то задача определения последовательности, по которой следует тушить ЛП, весьма актуальна. Ситуация рассматривается по конкретно заданному числу пожаров, обнаруженных на определенный момент времени на подконтрольной территории одной базы. Предполагается, что выбор технологии локализации и соответствующих технических средств тушения, зависит от сложившихся условий. В формализованном виде эту задачу можно представить следующим образом: найти  $\min F(x)$ , где  $F(x)$  — вещественная функция  $n$ -мерного аргумента  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Поскольку критерием оптимизации является экономический ущерб, то вид  $F(x)$  будет зависеть от функций алгоритмов, характеризующих скорость распространения огня, увеличения периметра ЛП и скорость прироста его площади, описывающие величину ущерба на конкретный момент времени. В данном случае, вектор параметров  $x$  представляет собой набор следующих временных интервалов:

- время с момента обнаружения до принятия решения о тушении ;
- время доставки/возврата техники и пожарных бригад;
- время, затраченное на ликвидации каждого ЛП в отдельности.

При этом вектор  $x$  задается относительно конкретного пожара, то есть: рассматривается ситуация, когда в процессе тушения находится один пожар, а остальные развиваются. Так как количество пожаров, стоимость процессов доставки и тушения ЛП определены заранее, они не являются переменными параметрами, и их соответствующий вклад в целевую функцию будет константой. Поэтому, вектор  $x$  можно свести к одной переменной времени  $t$  с внешними ограничениями. Исходя из представленного выше описания, предлагается следующая целевая функция, характеризующая общий экономический ущерб от всех лесных пожаров:

$$F_k(t) = \sum_i^n U_i(t) + \tau_\partial^k \cdot C_\partial^k + \tau_\lambda^k \cdot C_\lambda^k \quad (17)$$

Здесь:  $n$  — количество ЛП;  $k$  — порядковый индекс, характеризующий последовательность тушения;  $U_i(t)$  — ущерб от  $i$ -го лесного пожара на момент времени  $t$ , связанный с потерей древесины (3);  $C_\partial^k$  — цена часа доставки технических средств тушения до  $k$ -го пожара;  $C_\lambda^k$  — цена часа локализации пожара с порядковым индексом  $k$ , согласно выбранной технологии;  $F_k(t)$  — ущерб от всех зафиксированных ЛП, образующийся в случае, если первым потушен пожар с индексом  $k$ . Каждое слагаемое представленной целевой функции (17) зависит от времени  $t$ . Коэффициенты  $\tau_\partial^k$  и  $\tau_\lambda^k$  характеризуют временные интервалы необходимые для доставки/возврата технических средств



тушения до/от пожара с порядковым индексом  $k$ , и время ликвидации соответственно:

$$\tau_{\delta}^k = \begin{cases} t & t < T_{\delta}; \\ T_{\delta} & T_{\delta} \leq t \leq (T_{\delta} + T_n); \\ t - T_{\delta} - T_n & (T_{\delta} + T_n) < t \leq (2T_{\delta} + T_n); \\ 2T_{\delta} & t > (2T_{\delta} + T_n). \end{cases} \quad \text{и } \tau_n^k = \begin{cases} 0 & t < T_{\delta}; \\ t - T_{\delta} & \text{при } T_{\delta} \leq t \leq T_{\delta} + T_n; \\ 0 & t > T_{\delta} + T_n. \end{cases} \quad (18)$$

где  $T_{\delta}$  — время доставки технических средств тушения до пожара с индексом  $k$ ,  $T_n$  — время ликвидации пожара  $k$  согласно выбранной технологии,  $t$  — время, при котором фиксируется величина общего ущерба от всех пожаров, при условии, что первым ликвидируют пожар с индексом  $k$ . Условие (18) учитывает тот факт, что в процессе ликвидации пожара с индексом  $k$ , остальные ЛП в количестве  $n - 1$  будут развиваться и вносить свой вклад в общий ущерб, связанный с потерей древесины. Ниже кратко представлен алгоритм формирования требуемой последовательности:

- На первоначальном этапе, все обнаруженные лесные пожары индексируются (их число  $n$ ). Далее, по выражению (17) определяется величина общего экономического ущерба для каждого из числа  $n$  обнаруженных ЛП. При этом значение целевой функции  $F_k(t)$  рассчитывается на момент времени, когда пожар с индексом  $k$  будет потушен и технические средства возвращены на базу. После расчетов ищется  $\min F_k(t)$ . Наивысший приоритет в последовательности, согласно которой следует тушить все зафиксированные пожары, будет соответствовать порядковому индексу  $k$ .
- На втором шаге пожар, индекс которого был учтен на предыдущем этапе, исключается из общей выборки, и величина прогнозируемого экономического ущерба вычисляется для каждого из оставшихся  $n - 1$  пожаров. Далее ищется новый минимум целевой функции  $\min F_k(t)$ , и следующий номер искомой последовательности будет соответствовать новому порядковому индексу  $k$ . Затем этот шаг повторяется для всех оставшихся  $n - 2$  пожаров, и т.д.

В итоге будет сформирована требуемая последовательность, согласно которой общий экономический ущерб от всех лесных пожаров, зафиксированных на подконтрольной территории одной базы, будет минимальным.

**Прогнозирование ущерба.** Предложенный выше алгоритм можно также использовать для прогнозирования общего минимального экономического ущерба от зафиксированных по спутниковым данным лесных пожаров. Однако его существенным недостатком является отсутствие в нем возможности учитывать факторы рельефа и изменений ветра, которые могут весьма сильно повлиять на ход развития пожара. Успешное применение

моделей развития ЛП на данном этапе осложняется отсутствием подробных рельефных карт. При этом спутниковые данные низкого пространственного разрешения MODIS трудно применимы для использований в расчетных моделях характеристик рельефа. Учет всех возможных факторов, которые влияют на процессы распространения огня, на практике очень трудно реализуем. В силу описанных причин, формализовать полный набор признаков и создать явный алгоритм точного прогнозирования экономического ущерба от действующих ЛП не представляется возможным. В связи с этим, предлагается использовать нейросетевой подход.

В качестве программной модели нейрокompьютера был выбран продукт «Нейропро» [13,14]. От других существующих на сегодняшний день нейросетевых имитаторов, данная программная оболочка отличается наличием развитых возможностей по упрощению сети с последующим построением её вербального описания. Это в свою очередь позволяет использовать результаты моделирования при разработке собственных программных модулей, реализуя при этом требуемые пользовательские интерфейсы.

В качестве информационной основы формирования набора примеров для обучения нейросети, были выбраны отчетные сведения за предыдущий год (данные Федерального агентства лесного хозяйства по Красноярскому краю на 1 ноября 2006 года). В качестве «задачника» взят следующий набор данных:

- Наименование лесхозов;
- Количество пожаров;
- Общая площадь пожаров.

В качестве «ответов» была использована величина, характеризующая сумму, состоящую из расходов по тушению ЛП и экономических потерь от пострадавшей в огне древесины. Число примеров обучающей выборки соответствовало числу лесхозов в Красноярском крае (58), общее количество пожаров — 862. В процессе создания сети число нейронов и слоев варьировалось с целью подбора оптимальной структуры (двухслойная сеть по 8 и 10 нейронов).

Функциональные возможности программы «Нейропро» по вербализации полученной нейросети использовались для разработки *информационного модуля прогнозирования* экономических ущербов. В результате чего был создан инструмент, позволяющий прогнозировать величину ущербов по координатам обнаруженных лесных пожаров, их общей площади и количеству. Основной целью этой разработки являлось реализация возможности контроля функционирования системы алгоритмов, предложенных в главе 3 работы и реализованных в информационном модуле оперативной оценки ущербов.

**Пятая глава работы** содержит описание разработанных автором информационных модулей, теоретическое обоснование которых изложено в предыдущих главах. Ниже на рисунке 5 представлена их общая структура. Стрелками показано движение информационных потоков между модулями, являющимися составной частью технологии оперативной оценки экономического ущерба от пожаров по данным TERRA/MODIS.

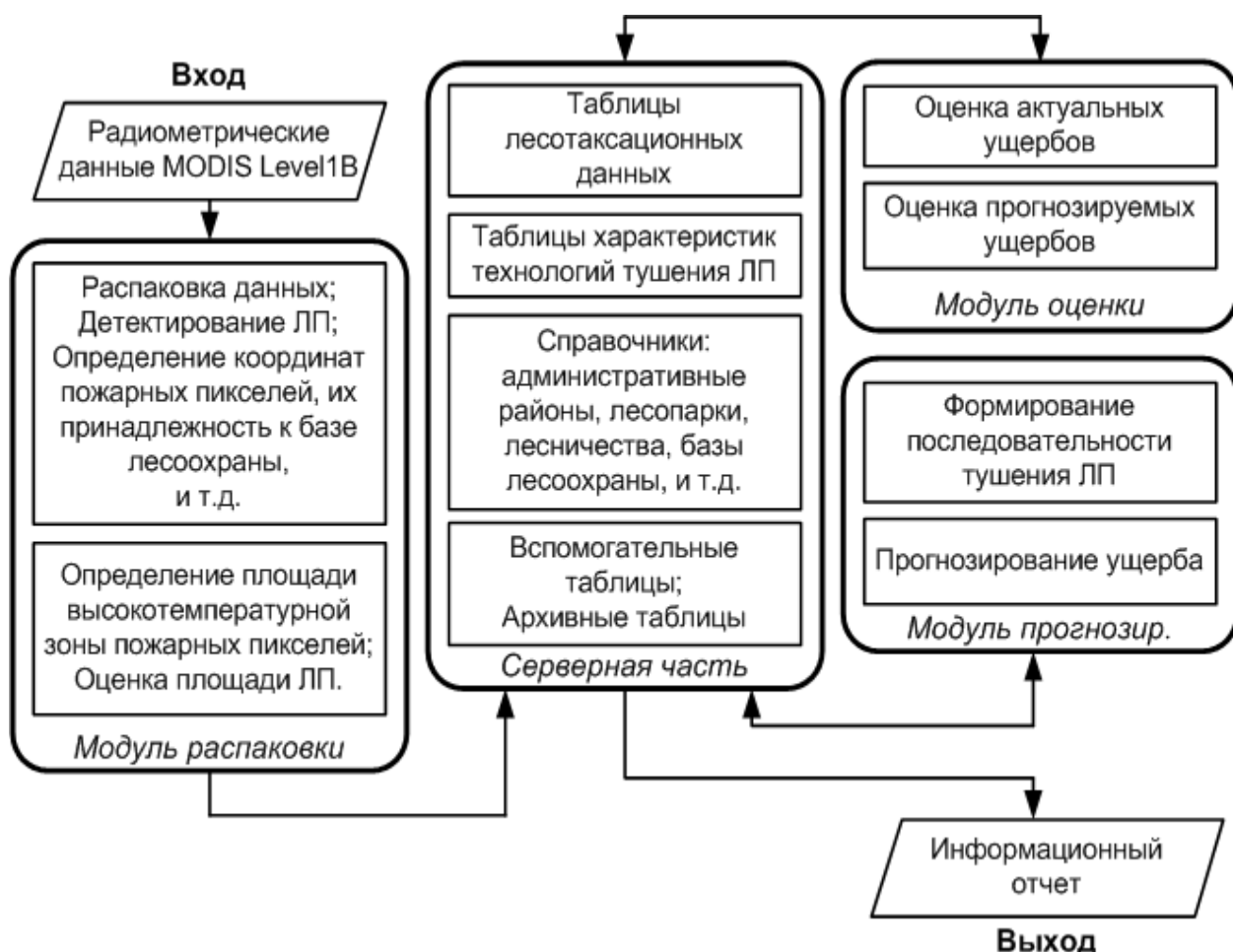


Рисунок 5 – Структура модулей и реализованных алгоритмов

В данной части работы представлены также направления, по которым можно усовершенствовать предложенные в диссертации алгоритмы (повысить точность оперативной оценки и прогнозирования ущерба от ЛП). В качестве основных можно выделить следующие три: 1) создание регрессионных моделей оценки скорости распространения огня для конкретных типов подконтрольных территорий (для большего числа элементов лесотаксационной сетки); 2) построение нейросетей, учитывающие результаты инвентаризации по отдельным областям подконтрольных регионов; 3) создание таблиц корректирующих коэффициентов, на основе первоначальной оценки и последующей инвентаризации.

Пример основного содержания информационного отчета.

Дата/Время	28.06.20/11:33:31	Лесотаксовый район	Первый Вост.-Сиб.
Административный район:	Минусинский	Разряд таксы	2
Лесничество (лесопарк)	Минусинское	Площадь, Га	2,67
Лесхоз	Минусинский	Актуальный ущерб, руб	869
Лесничество/координаты	Знаменское/	Прогнозируемый ущерб, руб	24863

Расстояние, км		Погрешность оценок	
Населенный пункт 1		Площадь, Га	
Населенный пункт 2		Минимальная	2,43
Авиаотделение	Ермаковское	Максимальная	2,91
Пункт базирования	Шушенское	Коэффициент вариации, %	12
Авиакомпания	Багульник	Ущерб, руб	
Расстояние, км	48	Минимальный	852
Способ доставки	Ми-2	Максимальный	886
Технология тушения	АЛП-0,2 ВН-22, В, о, 1	Коэффициент вариации, %	9

### **Основные результаты работы и выводы:**

В диссертации представлена информационная технология оперативной оценки экономического ущерба от действующих лесных пожаров, обнаруженных по спутниковым данным системы TERRA/MODIS, которая позволяет за короткий промежуток времени произвести:

- Предварительный расчет минимального экономического ущерба от пожаров;

- Формирование последовательности, согласно которой следует тушить ЛП (какой из пожаров тушить первым), чтобы ущерб от них был минимальным;

- Прогноз величины экономического ущерба от лесных пожаров.

Предложенные алгоритмы и расчетные модели могут быть адаптированы для более точных сканирующих систем. В работе также описаны направления, по которым возможно усовершенствование представленной информационной технологии, с целью достижения более высокой точности предварительных расчетов. Главной особенностью представленной в работе технологии является то, что она обеспечивает получение оценок экономического ущерба на стадии обработки оперативных данных лесопожарного мониторинга, тогда как остальные технологии требуют: время на обработку спутниковых данных высокого пространственного разрешения, либо — результаты стандартных методов инвентаризации (непосредственное изучение гарей).

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Предложена система алгоритмов оперативной оценки и прогнозирования экономического ущерба от действующих лесных пожаров, связанных с затратами на их ликвидацию и поврежденной огнем древесины. На основе регрессионной зависимости между скоростью распространения огня и некоторых параметров местности разработана модель, характеризующая развитие лесного пожара. Решена задача формирования последовательности тушения недавно зафиксированных пожаров, согласно которой общий экономический ущерб от них будет минимальным. Предложен метод оперативного прогнозирования величины экономического ущерба от пожаров. Разработанные в процессе исследований расчетные модели и алгоритмы

ориентированы на использование данных сканирующих спутниковых систем низкого пространственного разрешения.

На основании предложенных в работе алгоритмов и методов выполнено проектирование информационных модулей, которые могут быть использованы для поддержки принятия административно-управленческих решений при организации процессов ликвидации лесных пожаров. Результаты диссертации могут быть использованы при разработке информационных систем оперативной оценки экологического ущерба от крупных лесных пожаров, по количественным оценкам выбросов продуктов пиролиза и сгоревшего в результате пожаров кислорода.

Автор работы предполагает дальнейшее развитие предложенных в диссертации алгоритмов, в частности по таким направлениям как: совершенствование методов прогнозирования ущербов от действующих лесных пожаров, повышение их точности; усовершенствование моделей распространения огня и прироста площадей пожаров, посредством учета более широкого круга факторов.

#### **Литература, цитируемая в автореферате:**

1. Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве [Текст]: Учебник / В.И. Сухих. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 392 с.
2. Барталев, С.А. Разработка методов оценки состояния и динамики лесов на основе данных спутниковых наблюдений [Текст] : автореф. на соиск. ученой степ. докт. тех. наук : 01.04.01 – приборы и методы эксп. физики / Барталев Сергей Александрович. – М., 2007. – 48 с.
3. Сухинин, А.И. Космические методы в мониторинге лесных пожаров и их последствий [Текст] / А.И. Сухинин // Сибирский экологический журнал. – 1996. – № 1. – С. 85-92.
4. Kaufman, Y.J. Remote sensing of biomass burning in the tropic [Текст] / Y.J. Kaufman, C.J. Tucker, and I. Fung // J.Geophys.Res., 1991. P. 9927–9939.
5. Dozier, J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution / Remote Sensing of Environment, 1981. №11, P. 221-229.
6. Weber R.O. Modelling fire spread through fuel beds // Prog. Everg. Combust. Sci. 1990.Vol. 17. P.65-82.
7. Гришин, А.М. Математические модели лесных пожаров [Текст] / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во ТГУ. – 1981. – 277 с.
8. Rothermel, Richard C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Res. Paper INT- 115. Ogden, UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 1972. 40 с.
9. Rothermel, Richard C. How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: Intermountain Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 1983. 161 с.

10. Сухинин, А.И. Оценка влагосодержания лесных горючих материалов по радиационной температуре [Текст] / А.И. Сухинин, Е.И. Пономарев ; Ин-т космических исследований. – М., 1998. – 26 с. – Библиогр.: с. 24–25. – Деп. в ВИНТИ 15.02.02, № 1144-В98.
11. Доррер, Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров [Текст] / Г.А. Доррер. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 160 с.
12. Орловский, С.Н. Лесные, степные и торфяные пожары, практика их тушения в условиях Сибири [Текст] : Учебное пособие / С.Н. Орловский. – Красноярск: КрасГАУ, 2003. – 167 с.
13. Программный нейро-имитатор [Электронный ресурс] : программная оболочка создания нейронных сетей. — Режим доступа: <http://neurorgo.ru>. — Яз. рус.
14. Царегородцев, В.Г. Извлечение знаний из таблиц данных при помощи обучаемых и упрощаемых искусственных нейронных сетей [Текст] : автореф. на соиск. ученой степ. канд. тех. наук : 05.13.11 – математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей / Царегородцев Виктор Геннадьевич. – Красноярск, 2000. – 19 с.

**Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Романов, А.А. Предварительная обработка данных радиометра MODIS (КА TERRA) для решения прикладных задач / А.А. Романов, В.Ю. Ромасько, В.Б. Кашкин // Исследование Земли из космоса, № 5. — М.: НАУКА РАН, 2007. – С.44-49.
2. Романов, А.А. Информационная система детектирования лесных пожаров и оперативной оценки экономических ущербов от них по данным радиометра MODIS (спутник Terra) // Проблемы использования и охраны ресурсов Красноярского края, Вып. 9. – Красноярск: КНИИГиМС, 2007. – С.44-47.
3. Романов, А.А. Информационная технология оценки экономических ущербов от лесных пожаров по данным сканера MODIS (спутник TERRA) // Материалы XI Международной науч. конф., памяти акад. М.Ф. Решетнева. – Красноярск СибГАУ, 2007. С.94-95.
4. Романов, А.А. Первоначальная оценка экономического и экологического ущербов от лесных пожаров по данным радиометра MODIS с использованием нейросетей // Материалы IV Международной конференции «Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве». – М.: МГУЛ, 2007. – С. 118-121.
5. Романов, А.А. Комплексная оценка экономических и экологических ущербов от действующих лесных пожаров по данным радиометра MODIS (спутник Terra) / С.Н. Орловский, А.А. Романов // Вестник КрасГАУ, № 15. – Красноярск: КрасГАУ, 2006. – С.113-118.

6. Романов, А.А. Применение радиометрических данных сканера MODIS для оценки ущербов от лесных и степных пожаров // Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции «Лесной и химический комплекс – проблемы и решения», Том I. – Красноярск: СибГТУ, 2006. – С.83-90.
7. Романов, А.А. Оценка экологических и экономических ущербов от лесных пожаров по данным радиометра MODIS // Сборник статей по материалам Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Выпуск 3. – М.: ИКИ РАН, 2006. (электронная версия).
8. Романов, А.А. Информационная система мониторинга лесных пожаров по данным радиометра MODIS (спутник TERRA) // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». — Новосибирск: НГТУ, 2005. – С.159-160.
9. Романов, А.А. Детектирование лесных пожаров по данным радиометра MODIS // Материалы Всероссийской научной конференции «Наука. Технологии. Инновации». – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С.57-58.
10. Романов, А.А. Проблемы усвоения данных спутникового дистанционного зондирования // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона». – Новосибирск: НГТУ, 2004. – С.164-166.
11. Романов, А.А. Лесопожарный мониторинг по данным радиометра MODIS // Межвузовский сборник научных трудов «Информатика и информационные технологии». – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. С. 150-152.

Романов Алексей Андреевич

Оперативная оценка экономического ущерба от лесных пожаров  
по данным TERRA/MODIS

Автореф. дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 11.04.2008. Заказ № 853

Формат 60x90/16. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз.

ИПК Сибирского федерального университета

660074, Красноярск, ул. Киренского, 28