

Государственная публичная научно-техническая библиотека
Институт оптики атмосферы
Сибирского отделения Российской академии наук

Серия "Экология"

Издается с 1989 г.

Выпуск 70

**Н.А. Абушенко, Д.А. Алтынецв, В.Н. Антонов, С.В. Афонин, В.В. Белов,
Ю.В. Гриднев, А.М. Гришин, Д.В. Ершов, Г.Н. Коровин, В.В. Кошелев,
Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, Г.Г. Матвиенко, В.П. Новик, Е.И. Пономарев,
В.С. Соловьев, А.И. Сухинин, А.В. Татарников, С.А. Тащилин,
В.А. Ткаченко, Е.В. Флитман**

**СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
В РОССИИ. ИТОГИ. ПРОБЛЕМЫ. ПЕРСПЕКТИВЫ**

(под редакцией засл. деятеля науки РФ, д. ф.-м. н. В.В. Белова)

Аналитический обзор

Новосибирск, 2003

ББК 43.4

Спутниковый мониторинг лесных пожаров в России. Итоги. Проблемы. Перспективы = Satellite Monitoring of Forrest Fires in Russia. Results. Problems. Perspectives: Аналит. обзор / СО РАН. ИОА. ГПНТБ; Ред. В.В. Белов. – Новосибирск, 2003. – 135 с., ил. – (Сер. Экология. Вып. 70).

ISBN 5-94560-038-5

В предлагаемом обзоре на основе отечественной и зарубежной литературы анализируются возможности систем спутникового обнаружения и мониторинга лесных пожаров, рассматриваются требования, которым должны удовлетворять эти системы и основные их элементы. Рассмотрены геоинформационные компоненты систем космомониторинга лесных пожаров, алгоритмы обработки изображений с целью обнаружения и контроля пожаров, алгоритмы и методики оценки степени пожарной опасности с использованием наземных и спутниковых измерений. Обсуждается проблема раннего обнаружения лесных пожаров из космоса и подходы к повышению эффективности алгоритмов тематической обработки многоканальных спутниковых изображений. Описана сложившаяся в России практика спутникового обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Авторы излагают результаты собственных разработок, направленные на решение указанных проблем. Обсуждают особенности организации в России систем спутникового мониторинга федерального и регионального уровней, итоги их работы, а также высказывают свою точку зрения на перспективы их совершенствования.

При подготовке обзора использована научная литература за последние 15 лет.

Обзор может быть полезен для специалистов в области спутникового мониторинга окружающей среды, аспирантов, студентов старших курсов вузов по специальностям, связанным с тематической обработкой изображений, экологией окружающей среды, созданием и применением геоинформационных систем и методов дистанционного зондирования атмосферы и земной поверхности.

The review of the Russian and foreign literature analyzes the capabilities of systems for satellite detection and monitoring of forest fires and considers the requirements imposed on these systems and their basic elements. Geoinformation components of these systems are considered along with algorithms for processing of satellite images in order to detect and monitor forest fires, as well as algorithms and techniques for evaluation of fire risk using ground-based and satellite measurements. The problem of early detection of forest fires from space is discussed, and approaches to improving the efficiency of algorithms for thematic processing of multichannel satellite images are analyzed. The existing Russian practice of satellite detection and monitoring of forest fires is described. Original results aimed at accomplishing these goals are reported. Peculiarities in organization of federal- and regional-level satellite monitoring systems in Russia and their results are discussed, and the recommendations for their improvement are given. The scientific literature published for the past 15 years is reviewed. This review may be useful for specialists dealing with satellite environmental monitoring, as well as postgraduate and graduate students studying thematic processing of images, ecology, development and application of geoinformation systems and methods for remote sensing of the atmosphere and the Earth's surface.

Научный редактор д. ф.-м. н. В.В. Белов

Рецензенты: д. ф.-м. н. Б.Д. Белан, д. ф.-м. н. В.А. Крутиков

Обзор подготовлен к печати к.п.н. О.Л. Лаврик, М.Б. Зеленской, Т.А. Калужной

ISBN 5-94560-038-5

© Государственная публичная научно-техническая библиотека Сибирского отделения Российской академии наук (ГПНТБ СО РАН), 2003

ВВЕДЕНИЕ

Лесные пожары остаются одним из мощных природных факторов, влияющих на происходящие на планете глобальные изменения окружающей среды. Следы этого катастрофического явления огромных масштабов можно найти на каждом континенте. К сожалению, достаточно часто реализуются ситуации, при которых все известные технологии борьбы с огнем не приносят результата и только сама природа в состоянии остановить вырвавшуюся из-под контроля человека огненную стихию. Хорошо известны своими катастрофическими последствиями пожары последних лет в США, Мексике, Австралии, России.

Основные причины подобных событий состоят в том, что либо несвоевременно или не в достаточном объеме принимаются меры к тушению пожаров, либо они поздно обнаруживаются, когда стадия их развития такова, что не существует технологий и достаточных средств для их ликвидации.

Среди методов контроля состояния лесов, с точки зрения оперативного обнаружения пожаров на ранней стадии их развития, наряду с широко известными наземными системами наблюдения (визуальными, телевизионными и т. п.) и авиационным патрулированием в последние десятилетия практическое применение все более широко находят системы спутникового мониторинга.

Система спутникового мониторинга лесных пожаров, базирующаяся на пятиканальных сканирующих радиометрах AVHRR, размещенных на спутниках NOAA (США), существует и в России. Характеристики этой спутниковой группировки и оптико-электронных приборов, созданных для решения метеорологических задач, оказались приемлемыми для использования их в системах спутникового мониторинга лесных пожаров.

К этим характеристикам относятся: тип орбиты (полярная), ее высота (870 км) и количество находящихся на орбите спутников (до 4 одновременно), что позволяет контролировать почти каждую точку поверхности земного шара с периодичностью до десяти и более раз в сутки, наличие в приборе AVHRR спектрального канала 2,75 мкм (частота, близкая к максимальной интенсивности инфракрасного излучения лесных пожаров), а также каналов в видимой и дальней ИК области спектра (что позволяет разделять пожары, некоторые атмосферные фоны и поверхностные объекты не различимые в канале 2,75 мкм).

Кроме того, полоса обзора прибора AVHRR достигает почти 3000 км. Это связано в том числе и с одним из основных недостатков этого прибора – со сравнительно низким пространственным разрешением сканера AVHRR (в подспутниковой точке это примерно 1 км²).

Последнее обстоятельство обуславливает сложность использования данных этого прибора для эффективного решения проблемы раннего обнаружения лесных пожаров. Именно эта задача должна считаться одной из центральных задач спутникового мониторинга лесных территорий, особенно в тех случаях, когда наиболее надежная и испытанная практикой технология решения этой задачи (авиатрули-

рование) перестает быть доступной для природоохранных служб (например, по экономическим причинам, что характерно для России начиная с конца 80-х гг. прошлого столетия).

Российская система спутникового мониторинга лесных пожаров имеет свои особенности. Их можно характеризовать следующим образом.

Достаточно быстро расширяется число региональных центров спутникового мониторинга, что связано, в числе других причин, с облегчением доступа к оперативной спутниковой информации и с производством относительно недорогих станций приема спутниковых данных. В течение нескольких последних лет на территории стран СНГ развернуты и функционируют более 15 таких центров.

Кроме того, действуют системы федерального, ведомственного уровня, которые контролируют либо всю территорию России (например, в службе авиационной охраны лесов), либо ее часть (например, Сибирский территориальный округ по линии ГО и ЧС).

Следует отметить, что во многих центрах, осуществляющих мониторинг лесных пожаров, ведутся работы по созданию методов обработки спутниковых данных. При этом в разных центрах основное внимание уделяется разным задачам. Например, в одних большее внимание уделяется оценке площадей выгоревших лесных массивов, в других – оперативной оценке индекса пожарной опасности, а в третьих основные усилия сосредоточены на совершенствовании алгоритмов раннего обнаружения очагов пожаров, борьбы с бликами и т. п.

Для совершенствования систем спутникового мониторинга лесных пожаров (территориального, федерального, ведомственного уровней) необходимо осуществлять сравнительную оценку их эффективности. На решении этой задачи авторы данной работы предполагают объединить и сосредоточить свои усилия в ближайшее время.

В предлагаемом читателю обзоре дается информация об особенностях организации в России систем спутникового мониторинга федерального и регионального уровней, рассматриваются основные элементы этих систем, обсуждаются итоги их работы и перспективы совершенствования.

Обзор содержит четыре основных раздела, соответствующих действующим элементам систем спутникового мониторинга регионального или федерального уровня. В то же время раздел, посвященный вопросам построения моделей возникновения и развития лесных пожаров, который написан заслуженным деятелем науки РФ, проф. А.И. Гришиным, пока, к сожалению, не является действующим блоком этих систем. Однако, несомненно, перспектива развития и совершенствования систем спутникового мониторинга лесных пожаров в первую очередь связана именно с созданием этих моделей.

Остальные разделы написаны по материалам, представленным авторами из Института космических исследований РАН, Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов (г. Москва), Института солнечно-земной физики СО РАН (г. Иркутск), Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН (г. Красноярск), Института оптики атмосферы СО РАН (г. Томск), Красноярского государственного университета, Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН (г. Якутск) и Запдно-Сибирского РЦПОД.

В каждом разделе используется своя нумерация рисунков, таблиц и формул, список литературы – общий для всех разделов обзора.

Работа выполнена при частичной поддержке программы "Информационно-телекоммуникационные ресурсы СО РАН и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 01-05-65494 и "ЦКП Атмосфера" № 00-05-72014).

Глава 1. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СПУТНИКОВОМ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ

Геоинформационная система мониторинга лесных пожаров – это компьютеризованная система сбора, хранения, отображения и распространения данных о горимости лесов, о возникновении и развитии лесных пожаров, их воздействии на окружающую природную среду. Система позволяет оперативно интерпретировать и анализировать эти данные для эффективного использования при решении управленческих, производственных и научных задач, связанных с охраной лесов [1].

Основное назначение ГИС мониторинга лесных пожаров – информационная поддержка процессов принятия решений в системе охраны леса и управления лесными пожарами, а также обеспечение доступа пользователей к информации о лесных пожарах и их воздействиях на лесные экосистемы.

Целями создания ГИС мониторинга лесных пожаров являются повышение эффективности функционирования системы охраны леса и управления лесными пожарами, снижение наносимого ими ущерба природе и обществу, расширение имеющихся знаний о процессах возникновения и развития лесных пожаров, их влиянии на структуру и динамику лесного фонда.

Основной базисной информацией в завершенной геоинформационной системе мониторинга лесных пожаров должна быть картографическая база данных по состоянию лесного и почвенного покрова. Эти данные необходимы прежде всего для оценки пространственного распределения степени пожарной опасности на заданной территории. К дополнительной стационарной (точнее, квазистационарной, поскольку и эти данные с течением времени могут изменяться) следует отнести координаты некоторых реперных точек или линий, объектов (например, сеть водных ресурсов, транспортная сеть, населенные пункты и т. д.). Эти сведения необходимы для уточнения географической привязки спутниковых изображений, для устранения солнечных бликов от водных поверхностей, которые имеют сходные с пожарами признаки.

Отметим, что в настоящее время в России как федеральные, так и большинство региональных систем спутникового мониторинга лесных пожаров нельзя отнести к завершенным по двум основным причинам. Первая уже упоминалась – в существующих ГИС отсутствует блок прогноза развития пожаров. Вторая связана с тем, что отсутствует в них, как правило, электронная база данных по состоянию лесов и надпочвенного покрова. Как следствие, в большинстве действующих систем космомониторинга лесных пожаров отсутствует блок прогноза пожарной опасности.

Для работы геоинформационной системы в режиме мониторинга необходимы входные оперативные сведения об изменениях, происходящих на контролируемой

территории. В данном случае это сообщения или данные о появлении пожаров или изменении их характеристик. Источниками этой информации могут быть население, наземные службы охраны лесов, пролетающие над территорией самолеты гражданской авиации, летчики-наблюдатели в системе авиатрулирования и, наконец, спутниковые данные, приборы наблюдения, размещенные на спутнике.

Если первые из перечисленных данных относятся непосредственно к объекту контроля – пожарам, то спутниковую информацию об их обнаружении или динамике развития можно получить только после интерпретации, обработки или, как иногда говорят, после дешифрирования результатов измерений некоторых физических величин прибором, размещенным на спутнике.

1.1. Космические средства мониторинга лесных пожаров. Общие (идеальные) требования к ним

Мониторинг лесных пожаров предназначен для решения комплекса функциональных задач, связанных с оценкой и прогнозом пожарной опасности в лесах, обнаружением и контролем динамики лесных пожаров, послепожарной инвентаризацией лесов, управлением работой лесопожарных служб [2].

В настоящее время основной объем информации для решения выше перечисленных задач поступает от наземных и авиационных служб охраны лесов. Однако отмечается, что в данных целях перспективно использование космических средств дистанционного зондирования [3 – 5].

Космическая ступень охраны лесов от пожаров должна формироваться на основе функционального привлечения космических средств наблюдения общего назначения (метеорологических, ресурсных и др.), а также за счет создания специализированных космических систем наблюдения за лесопожарной обстановкой, оснащенных специальным прибором на борту космических аппаратов общего назначения [3, 6].

При этом космические средства должны обеспечивать решение следующих основных задач:

- раннее обнаружение возникающих лесных пожаров с определением их координат, площади очагов горения и оперативное доведение информации до потребителей;
- наблюдение за динамикой развития ранее обнаруженных лесных пожаров до их полной ликвидации или самопроизвольного прекращения с определением направлений перемещения и скорости поступательного движения кромки пожара;
- энергетическая диагностика кромки лесных пожаров с оценкой уровня интенсивности тепловыделения;
- определение величины снегозапаса, наблюдение за границей схода снежного покрова;
- определение метеорологических параметров атмосферы (облачность, очаги гроз, температура воздуха, поле ветра);
- определение температуры поверхности, влажности почвы, фенологическое состояние лесов, лесопирологическое районирование лесного фонда;
- оценка степени пожарной опасности для прилегающих к зоне пожара участков насаждений и прогнозирование развития лесных пожаров;

- получение данных о дымовых шлейфах и конвекционных колонках, образующихся при крупных лесных пожарах; определение степени и масштабов задымленности территории в районах лесных пожаров.

Полученная информация, дополненная данными самолетных и наземных наблюдений, может служить основой для формирования содержательной части ГИС и использоваться для оперативной оценки ситуации и принятия решения.

Обнаружение лесных пожаров должно осуществляться на территории лесного фонда страны, ограниченной 45 – 72 градусами с. ш. и 20 – 170 градусами в. д., общей площадью 1180 млн га. При этом особое внимание должно быть обращено на территорию в пределах 50 – 70 градусов с. ш. и 30 – 70 градусов в. д. [6].

Периодичность обзора территории с целью обнаружения лесных пожаров и слежения за динамикой их развития с момента наступления и до окончания пожароопасного сезона в светлое время суток не должна превышать 1 часа, а в ночное время – 2 – 3 часов. С учетом недостаточных технических возможностей допуска и меньшая периодичность обзора, поскольку в действующей системе периодичность авиационного наблюдения составляет иногда менее 1 раза в сутки.

Информация о задымленности территории в районах лесных пожаров, а также о дымовых шлейфах и дымовых колонках должна выдаваться не менее двух раз в светлое время суток, о фронтальной облачности с активной грозовой деятельностью и об очагах "сухих" гроз – не менее трех раз в сутки.

Периодичность получения информации о границах районов с различными классами пожарной опасности не менее одного раза в сутки (по данным на 14 – 15 часов местного времени). О влажности лесного горючего материала (ЛГМ) в периоды высокой и чрезвычайной пожарной опасности – не более раз в сутки [3].

Оперативность представления потребителям данных о действующих лесных пожарах – 15 – 30 мин с момента их обнаружения, а о динамике развития ранее обнаруженных лесных пожаров – не более 30 мин с момента очередного наблюдения или двух часов с момента поступления запроса.

Данные о задымленности территории, об облачности с активной грозовой деятельностью в очагах "сухих" гроз должны представляться не позднее, чем через 2 часа после получения соответствующей информации с борта КА.

Задержка в выдаче данных потребителям о наличии ресурсной облачности в зоне радиусом 50 км в местах действия крупных лесных пожаров не должна превышать 15 мин с момента ее обнаружения [6, 7].

Вероятность обнаружения лесных пожаров площадью до 0,1 га – 0,8, площадью до 0,5 га – 0,95 и площадью до 2 га – 0,99 [8].

Вероятность правильного распознавания ресурсной облачности должна быть не менее 0,95.

Точность определения координат лесных пожаров – 0,5 км. Допустимая погрешность при оперативном определении границ пожаров 50 – 100 м, а площадей пожаров – 10 – 15%.

Точность определения границ задымленности территории в районе пожара должна быть не хуже 1 км.

Точность фиксации фронта грозовой облачности, зон ресурсной облачности и границы схода снежного покрова должна быть не менее 10 км.

Емкость системы федерального или ведомственного уровня должна обеспечивать наблюдение за динамикой развития до 600 одновременно действующих лесных пожаров.

Обнаружение лесных пожаров, оценка их параметров и контроль пожарной опасности должны осуществляться при любых метеорологических условиях. Решение других задач охраны леса от пожаров должно обеспечиваться при облачности не выше 1 балла.

Приведенные требования, конечно, следует рассматривать как максимальные, а их достижение зависит от технических возможностей системы.

1.2. Функциональная структура ГИС мониторинга лесных пожаров

Эффективность системы управления охраной лесов определяется ее способностью оценивать и прогнозировать условия возникновения и развития лесных пожаров, регулировать в соответствии с этими условиями структуру и параметры лесопожарных служб, технологические схемы и режимы работ по профилактике, обнаружению и тушению лесных пожаров, ликвидации их последствий. Функциональная структура ГИС мониторинга лесных пожаров как составной части системы управления охраной лесов определяется, соответственно, перечнем задач учета, планирования, оперативного регулирования, контроля и анализа, решаемых в рамках этой системы на федеральном, региональном и локальном уровнях [9].

ГИС мониторинга лесных пожаров на федеральном, региональном и локальном уровнях в идеальном варианте включает в себя шесть функциональных подсистем:

1. оценки и прогноза пожарной опасности в лесах;
2. мониторинга процессов возникновения и развития лесных пожаров;
3. мониторинга процессов предупреждения, обнаружения и тушения лесных пожаров;
4. интеллектуальной поддержки управленческих решений;
5. прогноза развития пожаров;
6. оценки последствий лесных пожаров и результатов функционирования системы охраны леса.

Рассмотрим в качестве примера функциональные возможности действующих систем спутникового мониторинга в России на федеральном, региональном и ведомственном уровнях.

1.2.1. Федеральная ГИС "Авиалесоохрана"

В лесной противопожарной службе России создан Федеральный центр ГИС "Лесные пожары", где ежедневно принимается спутниковая информация о пожарной обстановке и горимости лесов в масштабах страны и осуществляются оптимальные управленческие решения [1 – 2].

Работы по ее созданию и совершенствованию осуществляются с 1995 г. совместно специалистами Международного института леса (МИЛ), Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов (ЦЭПЛ РАН), Института солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН) и Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) [10 – 13].

Система обеспечивает интеграцию информации, полученной в результате обработки спутниковых данных NOAA, с другими источниками данных о текущей

горимости лесов для принятия решений подразделениями Авиалесоохраны. Задачи, которые в первую очередь решает эта система, следующие:

- получение спутниковых данных;
- оперативная обработка данных;
- интеграция результатов обработки спутниковых данных с информацией, полученной из других источников;
- оперативное представление данных пользователям.

К создаваемой системе предъявлялись следующие основные требования, которые и определили ее архитектуру и базовые технологии:

- поступление в систему основного оперативного потока данных со спутников, позволяющих несколько раз в день гарантированно наблюдать всю территорию России (этому требованию из гражданских систем на сегодняшний день удовлетворяет только система метеорологических спутников серии NOAA);
- оперативное получение данных по всей территории России (т. е. информация должна собираться из нескольких центров приема и обработки спутниковых данных);
- обеспечение достаточно высокой оперативности сбора, обработки и доставки данных конечным пользователям (весь этот цикл не должен превышать нескольких часов, а в отдельных ситуациях и 20 – 30 мин после проведения съемки);
- совмещение поступающих в систему данных и результатов их обработки с результатами авиационных и наземных наблюдений (т. е. создаваемая система должна быть интегрирована с использующейся в службе процедурой сбора и анализа данных);
- возможность оперативного получения результатов обработки спутниковой информации как для Центральной базы авиационной охраны лесов России, так и для региональных баз, а также для различных заинтересованных служб и ведомств (т. е. к информации должен быть организован достаточно удобный и простой доступ удаленных пользователей);
- устойчивость и, по возможности, независимость реализованных в системе процедур обработки и анализа данных от условий и районов наблюдений (т. е. в системе, в конечном итоге, должно быть несколько видов стандартной выходной информации, которые специалисты службы должны использовать для принятия конкретных решений);
- достаточная гибкость и удобные возможности ее модификации и расширения (в ней должны быть предусмотрены возможности включения дополнительных центров приема и обработки данных, добавление новых процедур обработки и представления данных);
- низкая стоимость ее эксплуатации – одно из самых существенных требований (поэтому система должна быть легко управляема и контролируема).

Оперативный обмен данными. Один из ключевых моментов при создании подобных систем – вопрос оперативного обмена данными, поскольку, как видно из основных требований, она является существенно распределенной. Поэтому в ГИС "Авиалесоохрана" использовались для построения сети передачи данных возможности российских сетей Интернет. Такой выбор накладывает ряд ограничений на

объемы передаваемой информации, что было учтено при планировании потоков данных в системе. В то же время этот выбор позволил:

- избежать необходимости аренды выделенных междугородных каналов для передачи данных центрами приема и специализированных каналов для пользователей системы (пользователям в этом случае достаточно иметь только подключение к Интернету);
- обеспечить хорошую масштабируемость сети передачи данных в системе (т. е. по мере необходимости можно в большинстве случаев достаточно легко увеличить скорость подключения к Интернету как отдельных элементов системы, так и пользователей информации);
- избежать необходимости использования у ряда конечных пользователей специализированного программного обеспечения для получения доступа к данным (пользователи могут использовать стандартное программное обеспечение для получения данных по протоколам ftp, http или по электронной почте).

Автоматизация процессов обработки и передачи данных. ГИС "Авиалесоохрана" ориентирована на максимальную автоматизацию процессов обработки и передачи данных. Исходя из этого были выбраны центры приема и обработки спутниковых данных, на базе которых можно было с минимальными затратами организовать прием, обработку и обмен этими данными. Ими стали центр приема ИСЗФ СО РАН (<http://kcm.iszf.irk.ru>) и центр приема ИКИ РАН (<http://smis.iki.rssi.ru>). С 1999 г. центры приема и обработки данных NOAA были установлены в Центральную базу в г. Пушкино (<http://www.pushkino.aviales.ru>) и Иркутскую базу в г. Иркутск (<http://www.irkutsk.aviales.ru>). С того момента центры ИСЗФ и ИКИ являются дублирующими на случай сбоев в работе основных центров Авиалесоохраны.

В зону видимости этих двух центров попадает практически вся территория России (исключая районы Чукотки). Оба центра подключены к Интернету по выделенным каналам. В центрах используется одинаковое базовое программное обеспечение, позволяющее полностью автоматизировать процесс приема и обработки спутниковых данных [14 – 15]. На базе этих центров реализована система сбора, обработки и доступа к данным, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.1. Остановимся на нескольких ключевых особенностях такой схемы организации системы.

Обработка телеметрии. Вся обработка первичных данных, полученных со спутников, происходит непосредственно в центрах приема. Это позволяет избежать передачи больших объемов информации между различными удаленными пользователями. При необходимости получения пользователями исходных данных для проведения специализированной обработки, которая автоматически не выполняется в системе, ими могут быть получены фрагменты исходных данных по интересующим их регионам.

Кроме этого при необходимости построения конечных продуктов, для которых используются данные, полученные в разных центрах приема (например, карт облачности по всей территории России), между центрами приема организуется обмен фрагментами данных или прореженной информацией.

Как показал опыт нескольких лет эксплуатации системы, наибольший интерес для пользователей представляют не столько первичные данные, сколько результаты их обработки.

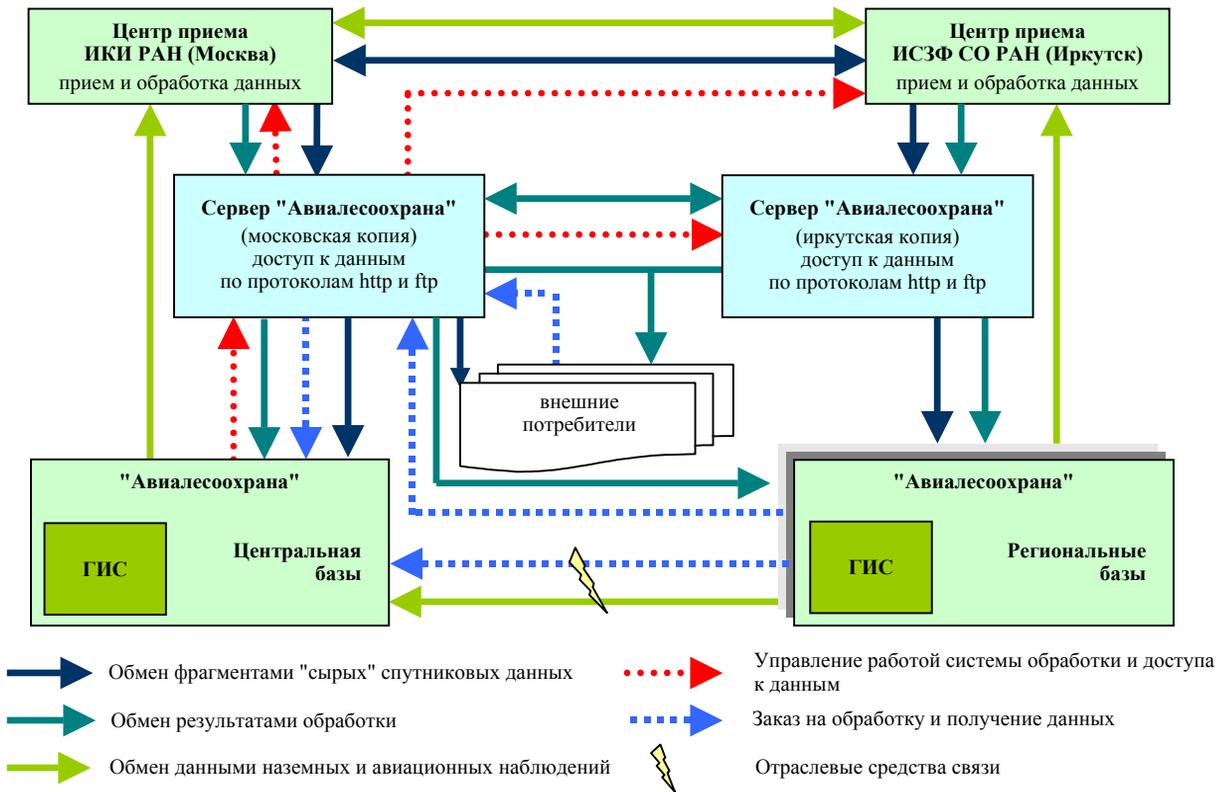


Рис. 1.1. Общая схема работы системы приема, обработки и распространения данных

Фрагменты первичных данных и результаты обработки автоматически передаются из центров приема на серверы Авиалесоохраны, которые установлены в узлах, имеющих подключение к Интернету по выделенным каналам. Это позволяет обеспечить достаточно быстрый доступ к данным не только пользователей Центральной и Иркутской баз авиационной охраны лесов, но и пользователей других регионов. В настоящее время эти серверы установлены в центральном узле сети "Космос", расположенном в ИКИ РАН, и в ИСЗФ СО РАН, что позволило также организовать поступление данных из центров приема и обработки по локальным сетям этих институтов.

Пользователи могут получить доступ к данным либо через веб-сервер Авиалесоохраны (<http://nffc.infospace.ru>), либо путем автоматической передачи данных по протоколу ftp. Последний способ передачи данных реализован для служб авиационной охраны лесов, которые используют специализированные ГИС. Другие пользователи могут получить и проанализировать данные, применяя стандартные веб-интерфейсы. Для обеих групп пользователей доступны фрагменты исходных данных и набор стандартных продуктов, список которых приведен ниже.

Следует отметить, что в ряде случаев при обработке спутниковых данных используется информация авиационных и наземных наблюдений, поступившая в Центральную и региональные базы авиационной охраны лесов. Поэтому в системе организован обмен этой информацией с центрами приема и обработки спутниковых данных.

Контроль работоспособности и управление работой отдельных элементов системы. Для обеспечения работы системы организованы контроль работоспособности и управление работой ее отдельных элементов. Контроль и управление работой организованы на основе специальной технологии, разработанной в ИКИ РАН [16, 17]. Вся информация о работе отдельных элементов системы передается на Центральный сервер Авиалесоохраны (г. Пушкино), откуда ее может получить и проанализировать диспетчер.

Диспетчер также может управлять процедурами обработки данных, определяя, по каким регионам необходимо обрабатывать и передавать данные в ГИС. Для выполнения этих операций созданы веб-интерфейсы и интерфейсы непосредственно в ГИС Центральной авиационной базы. Кроме этого диспетчер может зарегистрировать пользователей на сервере Авиалесоохраны и открыть для них доступ к различным группам продуктов.

Доступ к информации. Пользователи региональных авиабаз и другие "внешние" пользователи могут заказать доступ к необходимой им информации, послав запрос на серверы Авиалесоохраны. Отметим, что для различных региональных пользователей в системе может реализовываться специализированная обработка данных. В частности, такая обработка реализуется в интересах Иркутской и Новосибирской баз авиационной охраны лесов. Для Иркутской базы, например, специально готовится список координат точек с подозрением на пожары по району ответственности базы, а для Новосибирской базы – карты изображений облачности над соответствующим регионом.

Организация приема данных. Процесс обработки данных, выполняемый в центрах приема в Москве и Иркутске, отображен на принципиальной схеме организации процесса приема, обработки и представления данных (рис. 1.2). На схеме показаны следующие основные элементы:

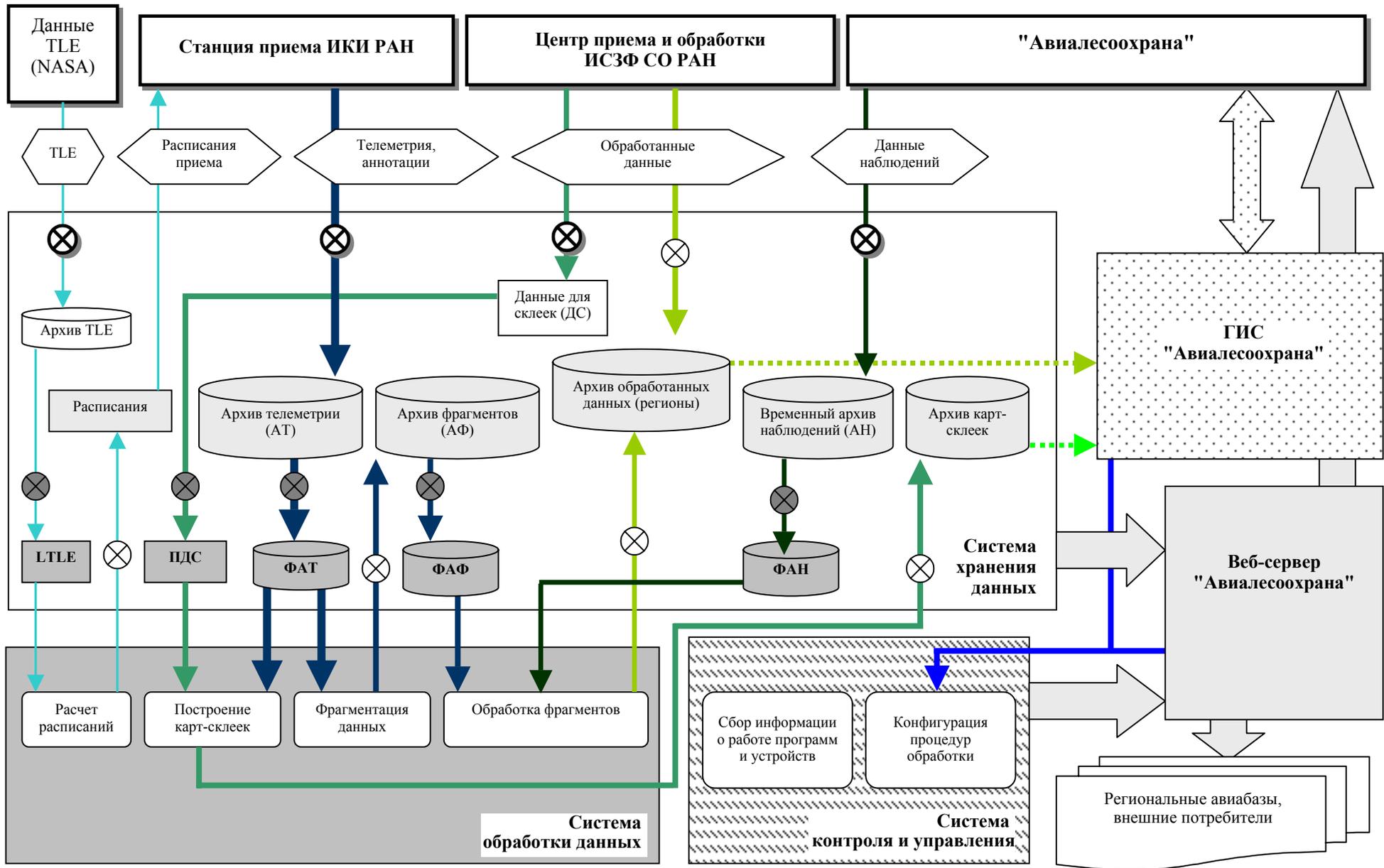


Рис. 1.2. Схема системы обработки данных в центре приема ИКИ РАН

- источники данных (на схеме имеют тень);
- система хранения данных;
- система обработки данных;
- система контроля и управления;
- ГИС "Авиалесоохрана";
- веб-сервер "Авиалесоохрана".

Все потоки данных в системе организованы по следующему принципу. Первоначально данные поступают в систему хранения, проходя при этом входной контроль (на схеме он обозначен для разных данных перечеркнутым кружком с тенью). Затем данные записываются в следующие архивы:

Архив TLE – архив предикт-телеграмм. Используется для расчета расписаний приема данных и для географической привязки спутниковых данных.

Архив телеметрии (АТ) – архив исходной телеметрии, поступающей со спутников (первичные данные). В архиве телеметрии данные хранятся двое суток, после чего переносятся для долговременного хранения на магнитные ленты.

Данные для склеек облачности (ДС) – архив данных, необходимых для построения карт облачности над всей территорией России. В архив поступают данные по зоне видимости станции приема, установленной в ИСЗФ. Данные поступают уже переведенные в картографическую проекцию в формате GIF. В архиве хранятся несколько последних поступивших данных.

Временный архив наблюдений (АН) – архив данных наблюдений, которые поступают раз в сутки из Авиалесоохраны в виде текстовых файлов (список крупных лесных пожаров с их географическими координатами). Данные используются для наложения на результаты обработки спутниковых данных.

Периодически из этих архивов производится выборка данных, которые необходимы для выполнения дополнительной обработки архивных данных. Для этого обычно используются последние поступившие в архив данные. Правила такого выбора зависят от конкретного типа данных и текущего заказа на их обработку, пришедшего от диспетчера в систему контроля и управления (эти процессы на схеме отмечены перечеркнутыми кружками темно-серого цвета). Данные из этих архивов удаляются после того, как выполнены соответствующие процедуры обработки.

В Информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Министерства природных ресурсов РФ (ИСДМ МПР РФ) сегодня накапливаются следующие архивы первичных или вспомогательных данных:

LТLE – наиболее новая предикт-телеграмма, по которой происходит расчет текущего расписания;

ПДС – последняя пришедшая из Иркутска информация для построения карты-склейки облачности над всей территорией России;

ФАТ – архив телеметрии, которая должна пройти фрагментацию;

ФАФ – архив фрагментов данных, которые должны пройти обработку с целью обнаружения пожаров;

ФАН – последний список крупных лесных пожаров, полученный из Авиалесоохраны.

В СДМ реализованы следующие процедуры обработки данных:

Расчет расписаний – осуществляется раз в сутки.

Построение карт-склеек – осуществляется четыре раза в сутки.

Фрагментация данных – осуществляется после каждого удачного (без сбоев) сеанса приема. Во время фрагментации из телеметрии автоматически выбираются

данные по районам наблюдений, которые записываются в формат TDF [18]. Данные по району выбираются только в том случае, если пространственное разрешение в центральной точке района на обрабатываемом сеансе не хуже 2 км.

Обработка фрагментов данных – проводится с целью детектирования пожаров с использованием алгоритмов детектирования пожаров МИЛ и ИСЗФ СО РАН.

Результаты обработки отправляются в систему хранения, где они также проходят входной контроль, преобразуются в удобный для дальнейшей работы вид и заносятся в соответствующие архивы (эти процессы на схеме отмечены перечеркнутыми кружками).

В СДМ существуют следующие архивы обработанных данных:

Архив фрагментов (АФ) – архив фрагментов по различным регионам наблюдений. Данные в этом архиве хранятся двое суток.

Архив обработанных данных (регионы) – в архив поступают данные, прошедшие специализированную обработку с целью детектирования пожаров. В этом архиве данные хранятся в форматах GIF, JPG и LAN, причем в формате LAN – в течение двух дней, в форматах GIF и JPG – в течение недели, после чего удаляются. Из этого архива часть данных автоматически поступает в ГИС "Авиалесоохрана".

Архив карт-склеек – в архив поступают карты облачности над всей территорией России. В архиве хранятся четыре последние поступившие карты. Из данного архива данные также автоматически поступают в локальную ГИС МЛП.

Для работы пользователей Центральной базы данные из архивов системы хранения передаются в ГИС МЛП. Обмен данными осуществляется по FTP протоколу. Эти процессы отмечены на схеме прерывистыми линиями.

Данные из архивов, отмеченных на схеме светло-серым цветом, становятся доступны пользователям через веб-сервер "Авиалесоохрана". Для этого на веб-сервере для каждого архива создана система динамических интерфейсов, позволяющих отображать текущее состояние архивов.

Все процессы, представленные на схеме, работают полностью автоматически и не требуют постоянного вмешательства оператора. Для настройки и контроля работы этих процессов создана специальная подсистема, позволяющая оператору с помощью веб-интерфейсов получать доступ к информации о процессах передачи и обработки данных. Основная часть архивов в системе, особенно архивы долговременного хранения спутниковых данных, реализованы сегодня с использованием баз данных. Поскольку эти архивы должны постоянно обновляться в автоматическом режиме, для их поддержки используется специальная технология, разработанная в ИКИ РАН [19]. Система архивации строится таким образом, чтобы хранение данных, полученных в результате различных обработок, осуществлялось независимо друг от друга. Это позволяет легко наращивать систему хранения и добавлять в обработку новые процедуры.

Состав производных тематических продуктов. *Карты облачности над территорией России* строятся по данным, которые принимаются в ИКИ РАН и ИСЗФ СО РАН. При построении карты используются прореженные в четыре раза данные (4 км/пиксел), полученные в четвертом (инфракрасном) канале прибора AVHRR, установленного на спутниках NOAA. На эту карту накладываются береговые линии, крупные реки, маркеры крупных пожаров по данным, полученным из центральной авиабазы, и карта России, разбитая на регионы наблюдения, по которым спутниковые данные проходят детальную обработку. Данная карта строится ежедневно на протяжении всего пожароопасного сезона (рис. 1.3, см. цв. вкладку).

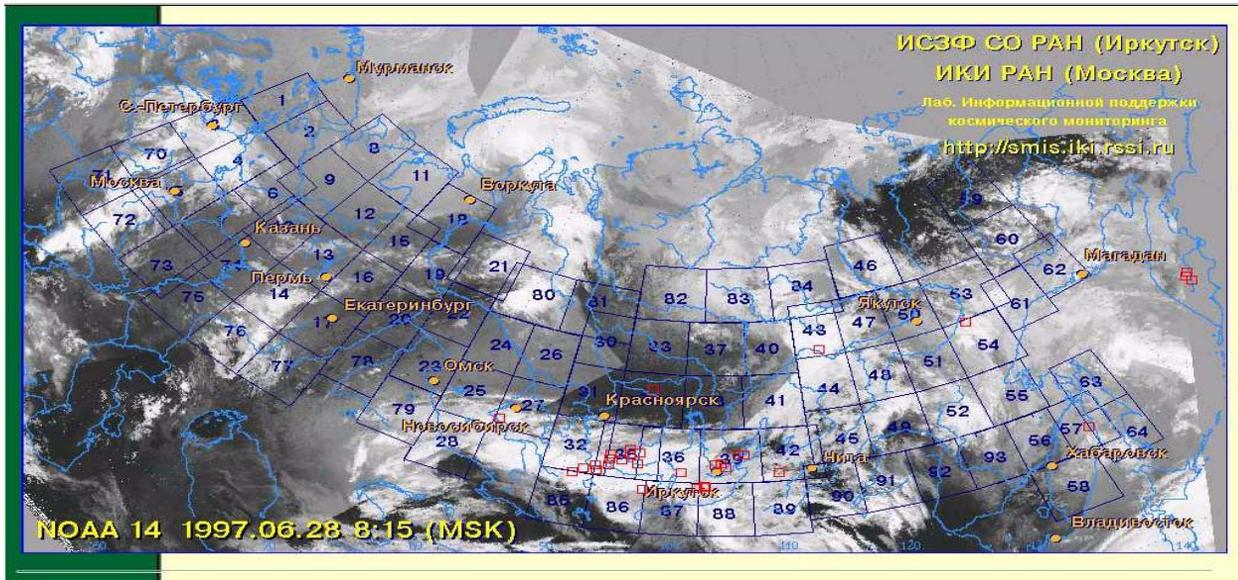


Рис. 1.3. Пример карты облачности, построенной по данным NOAA, с наложенной информацией о действующих крупных лесных пожарах

Для районов с высокой пожарной опасностью ежедневно по мере получения информации со спутников проводится детальная обработка данных полного разрешения (1 км/пиксел), в результате которой получаются следующие продукты:

Картографическое представление результатов детектирования пожаров с использованием алгоритмов ЦКМ ИСЗФ СО РАН.

На изображении красным цветом отмечены зоны с подозрением на действующие пожары, белым – области, закрытые плотной облачностью. Красными квадратами отмечены районы крупных пожаров по данным Центральной базы авиационной охраны лесов России. Данные представлены в картографической проекции с наложенной координатной сеткой, гидрологической сетью и названиями населенных пунктов (рис. 1.4, см. цв. вкладку). Эти данные имеют достаточно небольшой объем и легко передаются даже при использовании низкоскоростного коммутируемого подключения к Интернету.

Псевдоцветное изображение, построенное на основе третьего, четвертого и пятого каналов радиометра AVHRR.

Голубые участки на изображении соответствуют облачности или плотному дыму, зеленые – открытой подстилающей поверхности, красные – "перегретой" поверхности, ярко-красные – зонам пожаров. Красными квадратами отмечены районы крупных пожаров по данным Центральной базы авиационной охраны лесов России. Данные (рис. 1.5, см. цв. вкладку) представлены в картографической проекции с наложенной координатной сеткой, гидрологической сетью и названиями населенных пунктов.

Изображение, полученное на базе четвертого канала радиометра AVHRR, с результатами детектирования пожаров (красные участки) и отмеченными районами крупных лесных пожаров по данным Центральной базы авиационной охраны лесов России. Данные представлены в картографической проекции с наложенной координатной сеткой, гидрологической сетью и названиями населенных пунктов. Данный продукт используется для анализа облачности, которая не всегда может быть полностью детектирована при автоматической обработке.

Псевдоцветное изображение, построенное на основе первого, второго каналов радиометра AVHRR и результата детектирования пожаров по алгоритму, разработанному в ЦКМ ИСЗФ СО РАН (рис. 1.4). Голубые участки на изображении соответствуют облачности или плотному дыму, зеленые – открытой подстилающей поверхности, ярко-красные – зонам пожаров. Данные представлены в картографической проекции с наложенной координатной сеткой, гидрологической сетью и названиями населенных пунктов.

Синтезированное изображение первого и второго каналов радиометра AVHRR с результатами детектирования пожаров по алгоритму, разработанному в лаборатории дистанционного зондирования МИЛ. Белые и голубые участки изображения соответствуют облачности или плотному дыму, различные оттенки зеленого цвета – открытой подстилающей поверхности, ярко-красные – участкам с пожарами. Детектирование производится только по дневным изображениям. Ночные изображения представлены в виде синтеза третьего, четвертого и пятого каналов радиометра AVHRR. Данные представлены в географической проекции с сеткой географических координат, гидрологической сетью и названиями населенных пунктов. Как предыдущий, так и этот продукт позволяют наблюдать дымы от действующих пожаров (рис. 1.5).

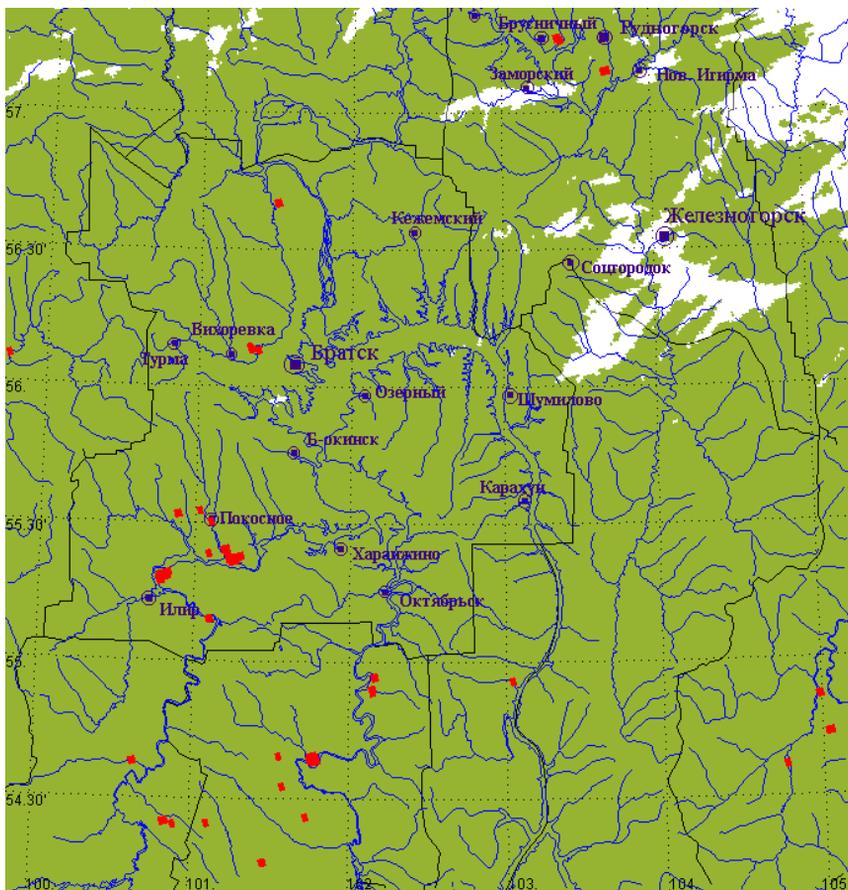


Рис. 1.4. Пример обработки данных с помощью алгоритмов ИСЗФ СО РАН выделения зон подозрений на пожары

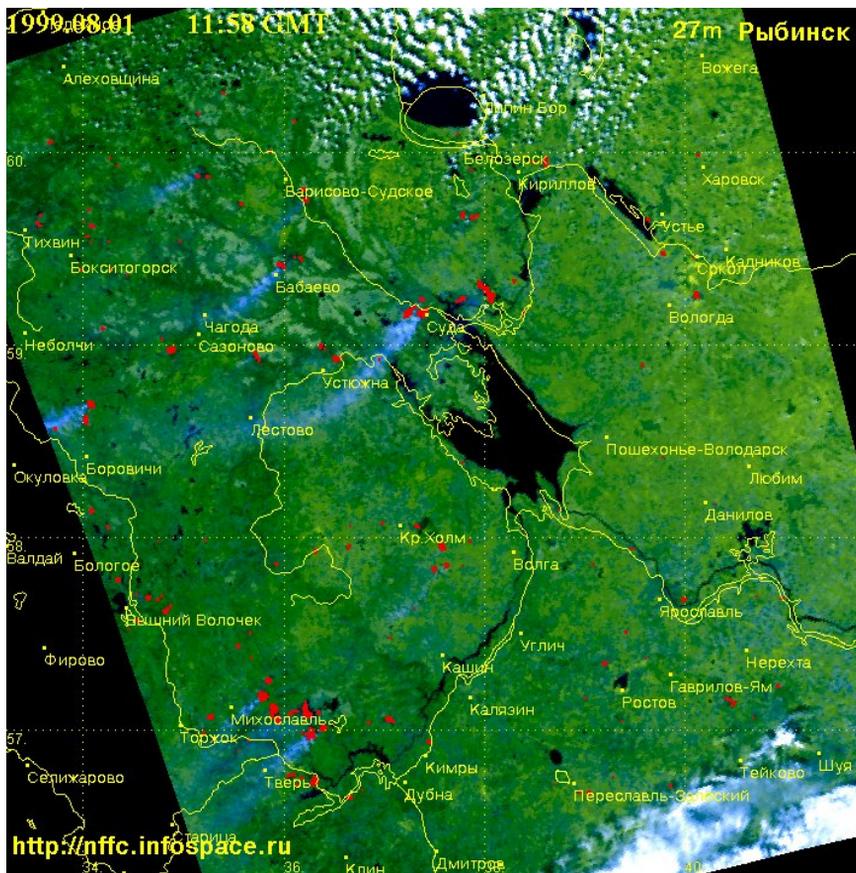


Рис. 1.5. Пример обработки данных с помощью алгоритмов МИЛ выделения зон подозрений на пожары

Данные, переведенные в картографическую проекцию и записанные в формате ERDAS Imagine 7.2 (LAN). Данные дополнены картами с углом стояния Солнца. Используются в дальнейшем в системе при необходимости проведения детальной обработки с участием оператора.

Список обнаруженных "горячих" пикселей с географическими координатами каждого пикселя. Список составляется для результатов детектирования по алгоритмам МИЛ и ИСЗФ СО РАН. Этот список в дальнейшем легко усваивается в ГИС. Эти данные используются также для представления на Веб-сервере "Авиалеосохрана" информации о том, в каких регионах за последние двое суток на спутниковых данных наблюдались пожары.

Как показал опыт эксплуатации ГИС "Авиалеосохрана" в 1997 – 2002 гг., система работает достаточно устойчиво и практически не требует специального персонала для ее ежедневного контроля. При этом подключение к системе новых пользователей практически не приводит к дополнительным затратам (исключая затраты на подключение к Интернету).

Система достаточно легко наращивается и модернизируется. Архитектура ее построения позволяет при необходимости добавлять в нее новые процедуры анализа, обработки и доступа к данным, не нарушая работы действующих элементов системы.

1.2.2. ГИС "Лесные пожары Иркутской области"

Оперативный мониторинг лесных пожаров с помощью спутниковых методов ведется в ИСЗФ г. Иркутска с 1994 г.

Организация спутникового мониторинга преследует идентичные цели и решает практически те же задачи, что и система на федеральном уровне. Различия двух систем заключаются в методиках обработки спутниковой информации с целью обнаружения и регистрации вероятных лесных пожаров, а также в формах и средствах представления результата тематической обработки.

Представление информации о лесных пожарах, их площадных и динамических характеристиках предъявляет определенные требования к продуктам обработки спутниковой информации (оперативность, информативность, достоверность и др.) и интегрирования представления этих продуктов (оперативной спутниковой информации) в общую систему принятия решений [20]. Учитывая пространственный контекст и банк продуктов оперативной обработки спутниковых данных и данных других средств наблюдений (при наличии цифрового представления информации), в качестве подходящего инструмента разработки такой системы использована технология ГИС. Конструкция ГИС делает возможным включение различных типов данных из многочисленных источников, при этом, где необходимо, сохраняя пространственное ориентирование.

В качестве программного обеспечения ГИС в системе спутникового мониторинга природной среды ИСЗФ использован пакет MapInfo, полученный в ГИС-центре Иркутского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (ИНЦ СО РАН).

ГИС спроектирована таким образом, чтобы пользователю для обновления тематического слоя, полученного по оперативной спутниковой, авиационной или наземной информации, достаточно было выполнить минимум простых операций.

В качестве электронной топоосновы используется цифровая карта местности масштаба 1:1000000 (планируется внедрение электронной топоосновы масштаба 1:200000). Основным тематическим слоем является векторный слой квартальной сети лесхозов и лесничеств северных районов Иркутской области, созданный в ИСЗФ СО РАН.

Результаты обработки спутниковой информации импортируются в ГИС через запрос результатов пользователями с WWW сервера ИСЗФ СО РАН (<http://ckm.iszf.irk.ru>) в виде файлов ГИС-формата. На основе данной ГИС сформирована база данных об обнаруженных лесных пожарах на основе спутниковых наблюдений, проводимых ИСЗФ СО РАН за 1997 – 2002 гг. на территории восточной части России. Очаги пожаров представлены в виде объектов полигонного типа, содержащих информацию о пространственно-временных характеристиках пожаров и физических значениях в каналах спутникового радиометра.

ГИС "Лесные пожары Иркутской области" позволяет оперировать информацией об очагах лесных пожаров, полученной наземными и авиационными методами наблюдения, проводить качественный и количественный анализ спутниковой и наземной информации, создавать файлы отчета.

ГИС "Лесные пожары Иркутской области" применяется в Иркутской базе авиационной охраны лесов и её районных отделениях, а также в административных органах и лесных отделах Братского, Усть-Илимского, Нижнеилимского, Усть-Кутского районов Иркутской области.

1.2.3. Региональная система спутникового мониторинга ГО и ЧС (г. Красноярск)

Эта система по своим функциональным возможностям отличается от других действующих систем мониторинга лесных пожаров. Основное ее отличие в том, что в ее состав входит подсистема оценки и прогноза пожарной опасности.

Более подробно методика и алгоритмы оценки индекса пожарной опасности рассмотрены в следующем разделе.

Здесь остановимся на обосновании необходимости включения этого блока в действующие или разрабатываемые системы мониторинга лесных пожаров и определении тех основных параметров и характеристик природной среды, которые необходимы для осуществления этих оценок и прогноза. Кроме того, рассмотрим вопросы, связанные с построением сценариев развития пожарной опасности, со статистической моделью пожароопасного сезона, с критерием неуправляемой пожарной опасности.

Подсистема оценки и прогноза пожарной опасности в лесах. Данная подсистема предназначена для оценки угрозы возникновения и развития лесных пожаров [21]. На основе получаемых оценок и прогнозов осуществляются: регулирование уровня хозяйственной деятельности в лесах и ограничение доступа к лесным массивам; назначение режимов воздушного и наземного патрулирования лесов, дежурства на пожарных наблюдательных пунктах и станциях; информирование общественности об угрозе возникновения и развития лесных пожаров [9].

Комплекс задач, проектируемых в рамках данной подсистемы, включает в себя: долгосрочное, среднесрочное и краткосрочное прогнозирование пожарной опасности в лесах по условиям погоды; определение границ снежного покрова и сроков наступления пожароопасного сезона; определение границ грозовой облач-

ности и интенсивности молниевых разрядов; определение текущего влагосодержания лесных горючих материалов; оценку напряженности пожароопасных периодов и сезонов.

Долгосрочное прогнозирование пожарной опасности в лесах осуществляется на основе долгосрочных (сезонных, месячных) прогнозов погоды с использованием прогностических зависимостей между нарастанием показателей пожарной опасности, количеством и длительностью засушливых периодов, температурой воздуха и количеством атмосферных осадков [21]. Целью долгосрочного прогнозирования является определение зон и периодов (сезонов) высокой и чрезвычайной пожарной опасности, требующих усиления профилактических противопожарных мероприятий.

Среднесрочное прогнозирование пожарной опасности осуществляется на основании среднесрочных (декада, трое суток) прогнозов погоды, прогнозов и предупреждений об особо опасных гидрометеорологических явлениях, специализированных прогнозов развития конвективной облачности. В качестве основных показателей пожарной опасности, наряду с показателями влагосодержания лесных горючих материалов (ЛГМ), используются интегральные характеристики интенсивности пожаров – скорость распространения огня и интенсивность тепловыделения [22].

Скорость распространения огня и интенсивность тепловыделения определяют структурными и теплофизическими характеристиками лесных горючих материалов, их влагосодержанием, рельефом местности и скоростью ветра. Приближенный характер прогноза основных метеоэлементов, значительное варьирование структурных и теплофизических характеристик ЛГМ оправдывает использование для оценки интегральных показателей скорости распространения огня и интенсивности тепловыделения упрощенных моделей динамики лесных пожаров [23].

Целью среднесрочного прогнозирования является построение прогностических карт пожарной опасности в лесах по условиям погоды, необходимых для текущего планирования работы лесопожарных служб и мероприятий по профилактике лесных пожаров.

Краткосрочное прогнозирование и оценка текущей пожарной опасности осуществляется на основе краткосрочных прогнозов погоды, данных метеостанций, данных дистанционного зондирования и показателей пожарной опасности за предшествующие сутки. В качестве основных показателей пожарной опасности, наряду с влагосодержанием ЛГМ и потенциальной интенсивностью лесных пожаров, используются вероятность возникновения и ожидаемое число пожаров.

Целью краткосрочного прогнозирования и оценки пожарной опасности является построение оперативных прогнозных карт, характеризующих пожарную обстановку на территории каждого структурного подразделения авиационной и наземной охраны.

Определение границ снежного покрова и сроков наступления пожароопасного сезона осуществляется на основе дешифрирования цифровых снимков с космических аппаратов, а также обработки данных многоканальных радиометрических снимков и прогнозов погоды. Перспективным является видимый диапазон 0,4 – 0,7 мкм. Цель установления границ снежного покрова – определение сроков наступления пожароопасного сезона.

Для определения границ грозовой облачности используют снимки с космических аппаратов и результаты обработки данных многоканальных радиометриче-

ских съемок. Перспективными являются видимый (0,4 – 0,7 мкм) и ближний инфракрасный (0,7 – 1,0 мкм) диапазоны. В качестве индикатора развития гроз используется кучево-дождевая облачность, которая имеет большую вертикальную мощность и значительные (до нескольких километров) поперечные размеры и поэтому хорошо видна на изображениях со средним пространственным разрешением. Вследствие низкой температуры верхней границы грозовых кучево-дождевых облаков они обнаруживаются и на ИК-снимках.

Дешифрирование крупномасштабных метеорологических явлений, выделение районов активной грозовой деятельности и прослеживание их перемещения по территории и во времени осуществляются с целью прогнозирования процессов возникновения лесных пожаров от природных источников.

Контроль траекторий прохождения гроз, сопряженный с активизацией деятельности лесопожарных служб и концентрацией их усилий в зонах повышенной молниевой активности, обеспечивает существенное повышение оперативности обнаружения и ликвидации массовых вспышек лесных пожаров.

Для определения текущего влагосодержания лесных горючих материалов осуществляют систематические съемки лесной территории в инфракрасном (ИК) и радиотепловом (РТ) диапазонах с последующей обработкой изображений [24]. Двумерная регистрация излучения территории производится в диапазоне 8 – 14 мкм, соответствующем максимуму излучения природных объектов, и в диапазоне 0,3 – 3,3 см с учетом "окон" прозрачности атмосферы.

Обработка заключается в пространственном совмещении изображений, вычислении радиационной и радиояркостной температур, разностей каждой из этих температур между смежными циклами съемки и последующей приближенной оценке влагосодержания лесных горючих материалов. Эти вычисления базируются на уравнениях связи между спектральными коэффициентами яркости лесных горючих материалов, тепловой инерцией и влагосодержанием ЛГМ.

Оценка напряженности пожароопасных периодов и сезонов осуществляется на основании данных краткосрочных прогнозов и результатов диагностики фактической пожарной опасности, а также данных учета горимости лесов в конкретном пожароопасном периоде и сезоне. Относительная напряженность пожароопасного периода определяется потенциальной длительностью распространения возникших пожаров и потенциальным объемом работ по борьбе с огнем с учетом скорости его распространения и интенсивности тепловыделения.

Сценарии развития пожароопасной ситуации. На основе данных метеостанций Красноярского края за период 1987 – 1998 гг., а также информации со спутников NOAA, полученной в 1995 – 1998 гг., были выявлены закономерности в сценариях развития пожароопасной ситуации в различных районах Красноярского края. Результатом исследований стала статистическая модель динамики пожарной опасности, а также критерий прогнозирования неуправляемой пожароопасной обстановки.

Статистические данные позволили провести классификацию пожароопасных сезонов в Красноярском крае. Исследовалась динамика показателя пожарной опасности в пожароопасные периоды 1992 – 1999 гг. по данным 15 метеостанций Красноярского края.

Исследования показали, что местные особенности развития пожароопасной ситуации проявляются в виде статистически устойчивой модальности кривой динамики показателя пожарной опасности.

Под модой понимается период сушки, в течение которого на определенном интервале времени показатель пожарной опасности устойчиво превышает верхний порог для 4-го класса пожарной опасности (ПО) с учетом местных шкал. При этом временной интервал составляет период, необходимый и достаточный для полного высыхания основных проводников горения. Эксперименты по оценке влагосодержания дают значение времени сушки в пределах 150 – 200 часов [25, 31]. С учетом времени солнечного сияния в течение суток и суточной динамики влагосодержания ЛГМ этот интервал, по полученным оценкам, должен включать в себя от 3 до 5 дней [32]. Начало и конец моды определяются нулевыми или соответствующими 1-му классу значениями показателя ПО.

Временные и количественные характеристики мод на кривой показателя ПО определяют три основных сценария развития пожароопасной ситуации. Модальность кривой наиболее ярко представлена во втором и третьем сценариях. Условие, определяющее тип сезона, выражено в соотношении площадей, ограниченных данной модой и разделенных пороговым значением показателя ПО.

Первый тип – сезоны с низкой пожарной напряженностью. Определяющим моментом является отсутствие мод на кривой показателя ПО ($S_1 = 0$). Данный сценарий характеризуется высокой частотой колебаний кривой пожарной опасности, низкими классами ПО. Абсолютные значения показателя ПО (2000 – 3000 единиц), как правило, колеблются в пределах 2-го – 3-го классов с учетом местных шкал. Отсутствуют периоды длительной сушки. Осадки равномерно распределены в течение всего пожароопасного периода. При этом ситуация с лесными пожарами успешно контролируется противопожарными службами.

Второй тип – сезоны с умеренными значениями показателя ПО. Преобладают 4-й – 5-й классы пожарной опасности. При таком сценарии развития пожароопасной обстановки наиболее ярко выражена модальность кривой показателя ПО. Определяющее условие: $0 < S_1 < S_2$. В течение сезона наблюдается до трех мод. Как правило, каждая мода сопровождается вспышкой лесных пожаров, но при этом ситуация не выходит из-под контроля.

Третий тип – экстремальные пожароопасные сезоны. Определяющее условие: $S_1 \geq S_2$. Такие сезоны характеризуются длительными засухами, редкими осадками, а также многократным превышением показателя пожарной опасности (9000 – 20000 единиц) над верхней границей 5-го класса ПО. При развитии пожароопасной ситуации по третьему сценарию кривая пожарной опасности, как правило, имеет две моды. Сезоны третьего типа представляют собой чрезвычайную пожароопасную ситуацию, сопровождающуюся вспышкой лесных пожаров.

Статистическая модель пожароопасного сезона. Проведенный анализ позволил построить статистическую модель пожароопасных сезонов, которая может быть применима к любому району края с учетом временных и количественных характеристик мод. Модель описывает динамику показателя пожарной опасности на основе прогноза средних температур воздуха и вероятных осадков за данный период. Наиболее часто встречаются трехмодальный умеренный пожароопасный сезон (сезон 2-го типа) и двухмодальный экстремальный сезон (сезон 3-го типа). Первый сценарий развития пожароопасной ситуации не требует соответствующей модели в связи с низкой пожарной опасностью, низкой активностью лесных пожаров и незначительным возможным ущербом. Однако своевременное прогнозирование такого сезона в конкретных районах края позволит заблаговременно перераспределять силы и средства лесопожаротушения.

Предлагаемая модель является итерационной. Коррекция последующего шага осуществляется на основе анализа предыдущего. Используя статистические сведения о длительности выделенных мод, а также о минимуме и максимуме температур за рассматриваемый период, получен интервал допустимых значений, внутри которого возможны отклонения, не вносящие существенных поправок в картину пожароопасной ситуации. Модели сезона позволяют оценить сроки наступления чрезвычайной ситуации – неконтролируемое увеличение числа действующих лесных пожаров.

Для создания пространственной карты пожарной опасности на территории края использовались спутниковые данные. Цифровые изображения со спутников серии NOAA в тепловом диапазоне дают поле радиационных температур поверхности земли. Разработаны методика и программное обеспечение, позволяющие ежедневно рассчитывать показатель пожарной опасности в каждой точке изображения и получать картосхемы распределения ПО на всю территорию края с пространственным разрешением $1,1 \text{ км}^2$ (рис. 1.6, 1.7, 1.8). Анализ, проведенный в 1997 – 1998 гг., показал тесную корреляционную связь между показателем ПО Нестерова, вычисляемым по данным метеостанций, и радиометрическим показателем ПО, полученным по спутниковым изображениям. Коэффициенты корреляции $0,8 - 0,9$ [27].

Это позволило проследить сезонную динамику пожароопасной ситуации и дать статистический прогноз изменения общей картины распределения показателя ПО в течение сезона на территории Средней Сибири. Картосхемы распределения показателя ПО на основе спутниковых данных выявили ландшафтные закономерности нарастания пожарной опасности в весенне-летний период.

Критерий неуправляемой пожароопасной обстановки. Исследуя зависимость "показатель ПО – действующие пожары", можно оценить критические значения показателя пожарной опасности для различных сценариев (рис. 1.9а, 1.9б). Получены значения для каждой из выделенных мод при умеренном и экстремальном сценариях развития пожароопасной ситуации.

По оценкам, критическое значение количества действующих пожаров в пределах авиаотделения составляет 10 – 12 единиц. Если данный порог превышен, необходимо привлечение дополнительных сил и средств, в том числе лесхозов и центральной авиабазы. Превышение порога нередко ведет к лавинообразному увеличению числа возникающих пожаров. Это ярко проявилось, например, в Богучанском авиаотделении в 1996 г., когда после 30-дневной засухи число пожаров увеличилось с 12 до 30 единиц в течение двух дней (рис. 1.9б). В предположении, что скорость ликвидации пожаров выходит на насыщение, как логарифмическая функция от показателя ПО (рис. 1.9в), были получены критические значения показателя ПО.

Откладывая это значение на среднестатистической модельной кривой динамики ПО, внутри выделенной моды можно оценить временной интервал, в течение которого ситуация поддается управлению посредством имеющихся сил. Далее начинается период предполагаемой чрезвычайной обстановки, т. е. выход лесных пожаров из-под контроля. По полученным оценкам, критические значения показателя ПО составляют 2800 – 3600 единиц, в зависимости от рассматриваемой моды и сценария развития ситуации. Такое значение достигается за 9 – 15 дней (рис. 1.9).

Оценки такого рода необходимы для заблаговременного манипулирования силами и средствами лесопожаротушения, а также привлечения дополнительной помощи, в том числе и сил МЧС.

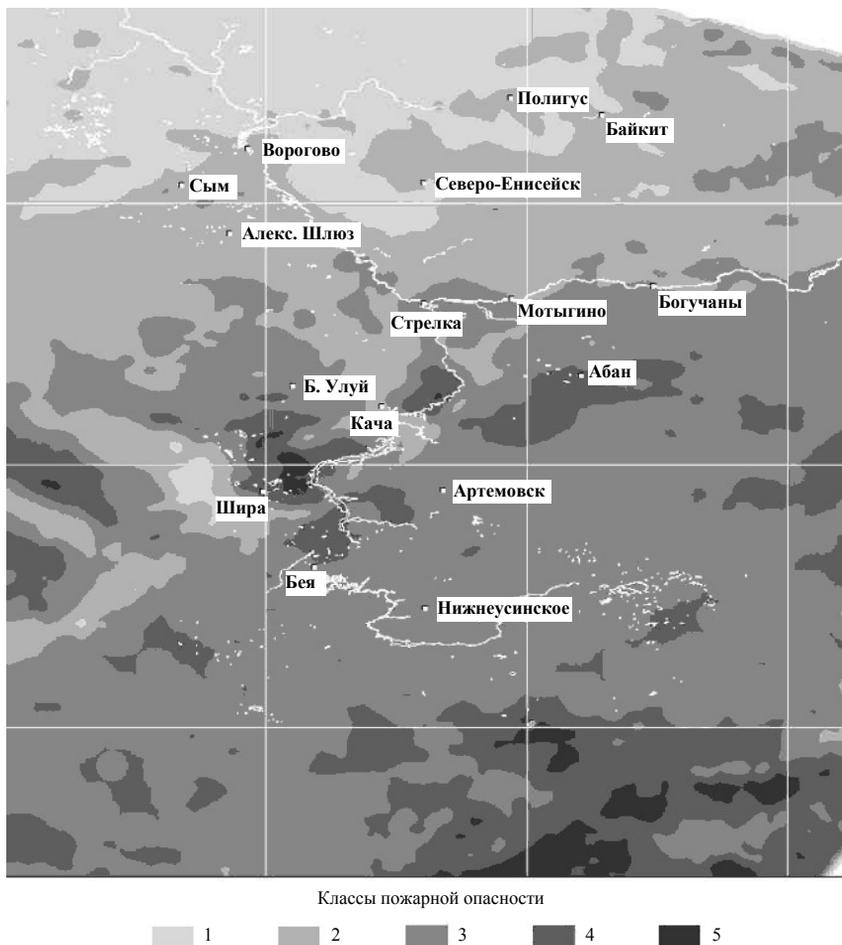


Рис. 1.6. Картограмма распределения показателя пожарной опасности на территории Красноярского края на 31 мая 1996 г. Дифференцирование по значениям суммы радиационных температур:

1-й класс – 0 – 100°C; 2-й класс – 100 – 200°C; 3-й класс – 200 – 300°C; 4-й класс – 300 – 400°C; 5 класс – 400 – 500°C.

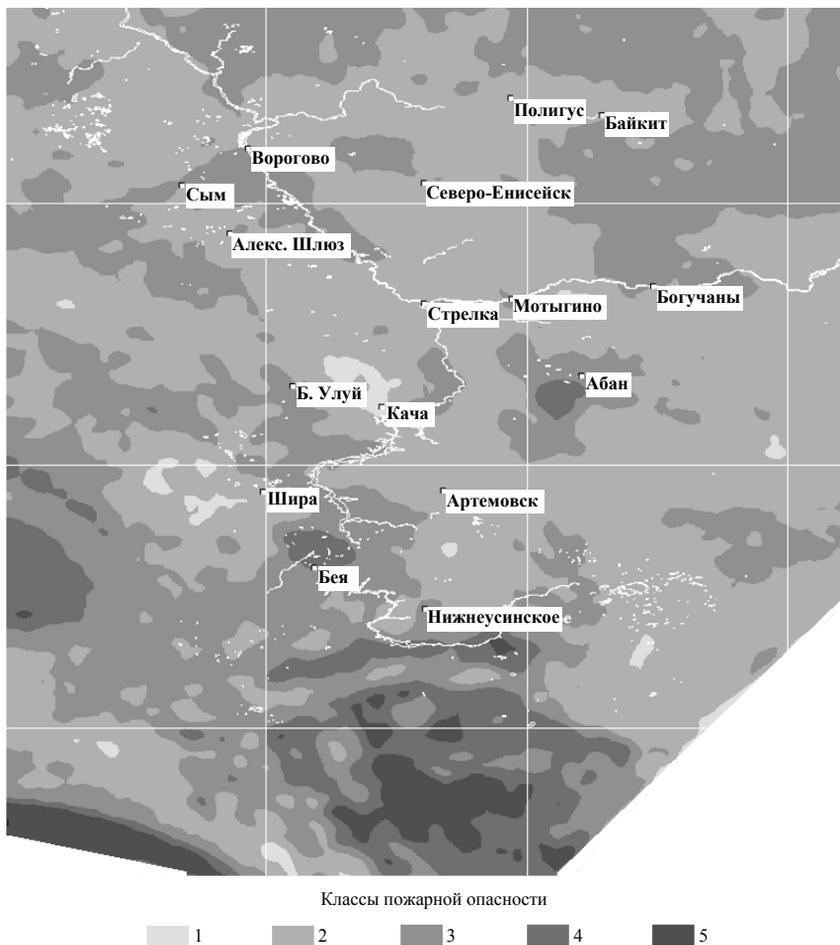


Рис. 1.7. Картограмма распределения показателя пожарной опасности на территории Красноярского края на 20 июня 1996 г. Дифференцирование по значениям суммы радиационных температур:

1-й класс – 0 – 100°C; 2-й класс – 100 – 200°C; 3-й класс – 200 – 300°C; 4-й класс – 300 – 400°C; 5-й класс – 400 – 500°C.

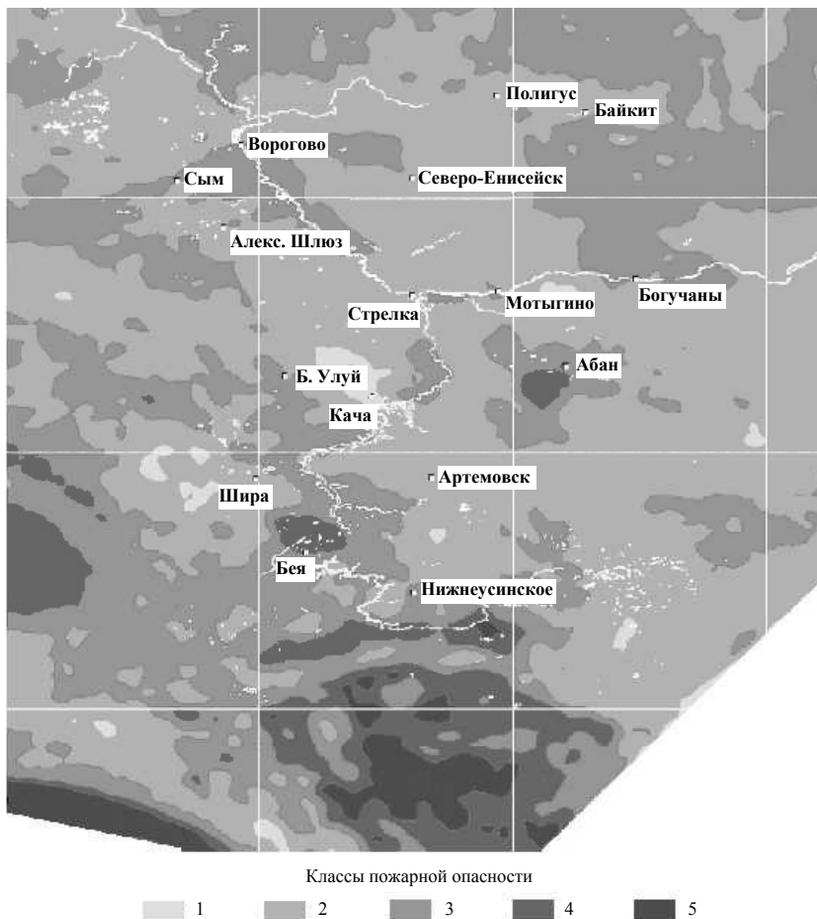


Рис. 1.8. Картограмма распределения показателя пожарной опасности на территории Красноярского края на 24 июля 1996 г. Дифференцирование по значениям суммы радиационных температур:

1-й класс – 0 – 100°C; 2-й класс – 100 – 200°C; 3-й класс – 200 – 300°C; 4-й класс – 300 – 400°C; 5-й класс – 400 – 500°C; 6-й класс – выше 600°C. Дополнительный 6 класс соответствует району с экстремальной пожароопасной ситуацией.

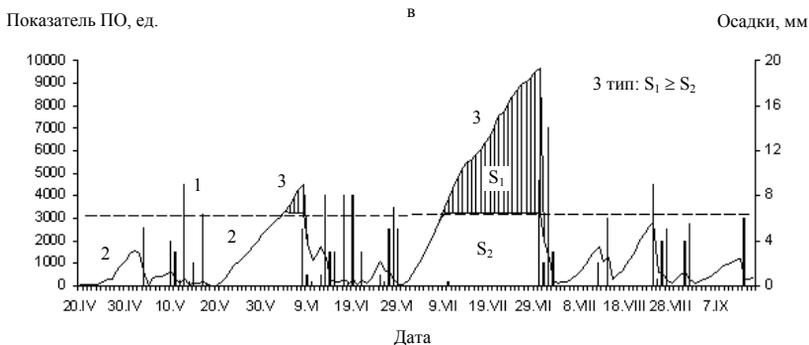
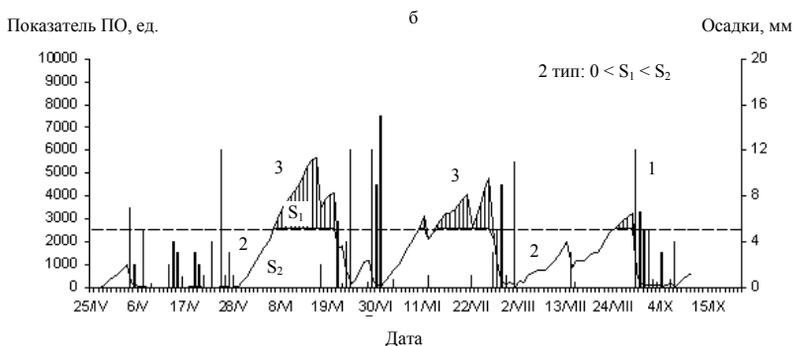
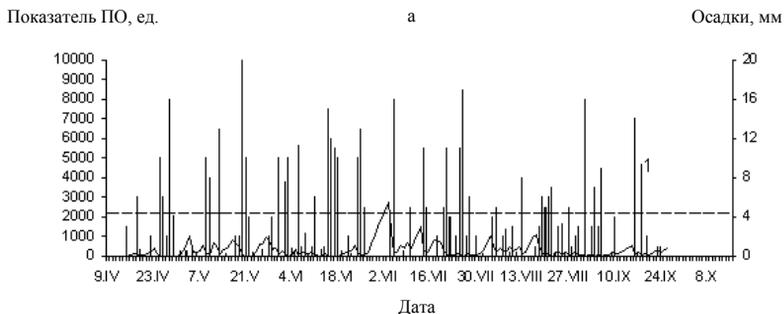


Рис. 1.9. Типовые сценарии развития пожароопасной ситуации:

а – низкая (м/п Неожиданный, 1995 г.), б – умеренная (м/п Северо-Енисейск, 1993 г.), в – экстремальная напряженность пожароопасного сезона (м/п Богучаны, 1993 г.);

1 – осадки, 2 – показатель ПО, ед., 3 – признак пожарного максимума по условиям погоды;
 ----- верхняя граница 4-го класса ПО.

Подсистема мониторинга процессов возникновения и развития лесных пожаров. Данная подсистема предназначена для регистрации возникающих и действующих лесных пожаров, оценки их параметров, ведения оперативных и архивных баз данных о лесных пожарах, слежения за состоянием и динамикой горимости лесов, формирования карт, сводок и отчетности о лесных пожарах, оперативного и ретроспективного анализа горимости лесов. На основе получаемой информации о процессах возникновения и развития лесных пожаров принимаются основные управленческие решения по организации их тушения и ликвидации последствий, а также обеспечивается информационная поддержка процессов проектирования и планирования противопожарных мероприятий на федеральном, региональном и локальном уровнях [9].

Базы оперативных данных о лесных пожарах ГИС локального и регионального уровней содержат информацию о каждом пожаре, обнаруженном на контролируемой ею территории, а также интегральные характеристики горимости лесов за каждый день пожароопасного сезона в разрезе структурных подразделений системы охраны леса.

Базы оперативных данных федеральной ГИС содержат информацию о каждом крупном лесном пожаре на территории страны, а также интегральные характеристики горимости лесов за каждый день пожароопасного сезона в разрезе областей (краев), республик в составе Российской Федерации и региональных авиабаз [9].

Оценка параметров лесных пожаров и контроль за их состоянием осуществляется в результате пространственной регистрации крупных лесных пожаров с определением контуров пожара и размеров пройденной огнем площади, энергетической диагностики кромок лесных пожаров с оценкой интенсивности тепловыделения, обработки данных о дымовых шлейфах в конвенционных колонках, образующихся при крупных лесных пожарах, а также сопоставления получаемых при этом оценок с данными визуальных наблюдений за крупными лесными пожарами [8].

Введение инструментальных методов контроля числа и площади крупных лесных пожаров, на долю которых приходится свыше 80% всей охватываемой огнем площади лесного фонда, обеспечит существенное повышение точности учета горимости лесов и объективности оценки последствий лесных пожаров, наносимого ими ущерба природе и обществу.

1.3. Организация баз данных по уровням ГИС

Информационной базой системы является единый банк пространственно совмещенных картографических и фактографических данных о лесном фонде и происходящих в нем изменениях. Структурно этот банк может состоять из набора взаимодействующих баз данных, обменивающихся между собой информационными потоками. По форме представления хранимой информации наиболее различающимися являются картографические и фактографические базы. В первых основными элементами являются данные, представленные в векторном и растровом виде, а во вторых – количественные и качественные данные, представленные в числовом и символьном виде [33, 34].

Связи ГИС различных уровней осуществляются через указанные ниже базы оперативных данных и последствий пожаров, причем информация об изменениях

на вышележащем уровне получается путем агрегирования данных соответствующей базы нижележащего уровня. Например, вызванные пожарами изменения на федеральном уровне отражаются путем агрегирования данных об изменениях на региональных уровнях.

Для каждого графического объекта в соответствующей таблице отводится строка, содержание которой состоит из характеристик объекта и координат его точек.

Хранение графической информации в базе данных производится в векторном формате для сохранения точности представления топоосновы в системе. Внесение изменений в графическую информацию может производиться как в векторном, так и в растровом формате, в зависимости от вида изменений.

Выдача картографических материалов также может производиться как в векторном, так и в растровом формате.

Такое гибкое использование форматов возможно благодаря использованию в системе ГИС программ эффективного перевода информации из одного формата в другой и обратно.

Для ГИС любого уровня ключевым моментом в организации данных является совмещение тематической и картографической информации. Совмещение состоит в присвоении тематическим данным номеров тех площадных объектов, которые они описывают. Это позволяет, например, изучать изображенный на экране картографический объект, указывая на него курсором и запрашивая его фактографические характеристики из совмещенной базы данных.

Исходя из этого применяемые в ГИС мониторинга лесных пожаров различных уровней картографические данные могут быть получены при наличии цифровых карт следующего масштабного ряда – 1:25000, 1:100000, 1:500000, 1:2500000 и 1:10000000. Общая структура совмещенных баз данных определяет потоки информации, действующие внутри ГИС каждого уровня при решении функциональных задач. Основное отличие таких структур на различных уровнях ГИС состоит в степени агрегированности используемой информации. Например, база тематических (фактографических) данных (БТД) содержит данные учета лесов, агрегированные соответственно на федеральном, региональном или локальном уровне.

Архив – база архивных данных содержит информацию о пожароопасном сезоне, коды (авиаотделения, области, края, лесхоза, лесничества, предприятия), данные о принадлежности лесов, координаты и номер пожара, время и способ его обнаружения, площадь и скорость ветра при обнаружении, причину пожара, пройденную огнем площадь с разделением ее на лесную и нелесную (и выделением площади, пройденной верховым и подземным пожаром), расстояния (до населенного пункта, транспортных путей и места высадки), преобладающая порода, почвенный покров, категория лесов и категория земель, количество совершенных прыжков и спусков на пожар, примененные способ и средства тушения, месяц и день выпадения фронтальных осадков, затраты авиабазы, стоимость работ по тушению, общий ущерб и т. д.

Таким образом, в заключение всего раздела отметим, что одним из основных элементов систем космического мониторинга лесных пожаров на территории России является геоинформационная система. В каждом центре спутникового мониторинга она имеет свои возможности, хотя все они предназначены для решения почти одних и тех же задач. Тем не менее ни одну из них нельзя считать полной. На-

пример, подсистема "Пожарная опасность" существует только в Красноярском центре приема и обработки спутниковых данных. В то же время ни в одной из описанных и существующих систем нет подсистемы прогноза развития пожара.

Некоторые ГИС функционируют в автоматическом режиме (система федерального уровня, например), другие – в полуавтоматическом, когда окончательное решение принимает оператор. Примером организации такой работы может служить система спутникового мониторинга лесных пожаров, существующая на базе Западно-Сибирского РЦПОД. На рис. 1.10 приведен пример завершающего этапа работы ГИС перед передачей по электронной почте результатов мониторинга в лесхозы и службу охраны лесов от пожаров. В табл. 1.1 приведен пример итогового сообщения работы ГИС в Западно-Сибирском РЦПОДе.

На рис. 1.11 (см. цв. вкладку) приведен еще один пример интерфейса ГИС обнаружения и мониторинга лесных пожаров, который используется в Красноярском центре спутникового мониторинга.

Таблица 1.1

Оперативная отчетность о точках вероятного возгорания
за 10 мая 2002 г. на 7:12:21 AM msk

№ п/п	Координаты		Район	Населенный пункт	Лесхоз	Лесничество	Квартал
	широта	долгота					

Кемеровская область

Точек вероятного возгорания не обнаружено

Облачность: 20%

Новосибирская область

1.	55°00'	76°17'			Татарский	Татарское	93
2.	54°58'	77°00'			Татарский	Чановское	73
3.	54°52'	79°00'			Здвинский	Верх-Каргатское	27

Омская область

1.	54°52'	79°00'	Оконешниковский	Октябрьское			
----	--------	--------	-----------------	-------------	--	--	--

Облачность: 30%

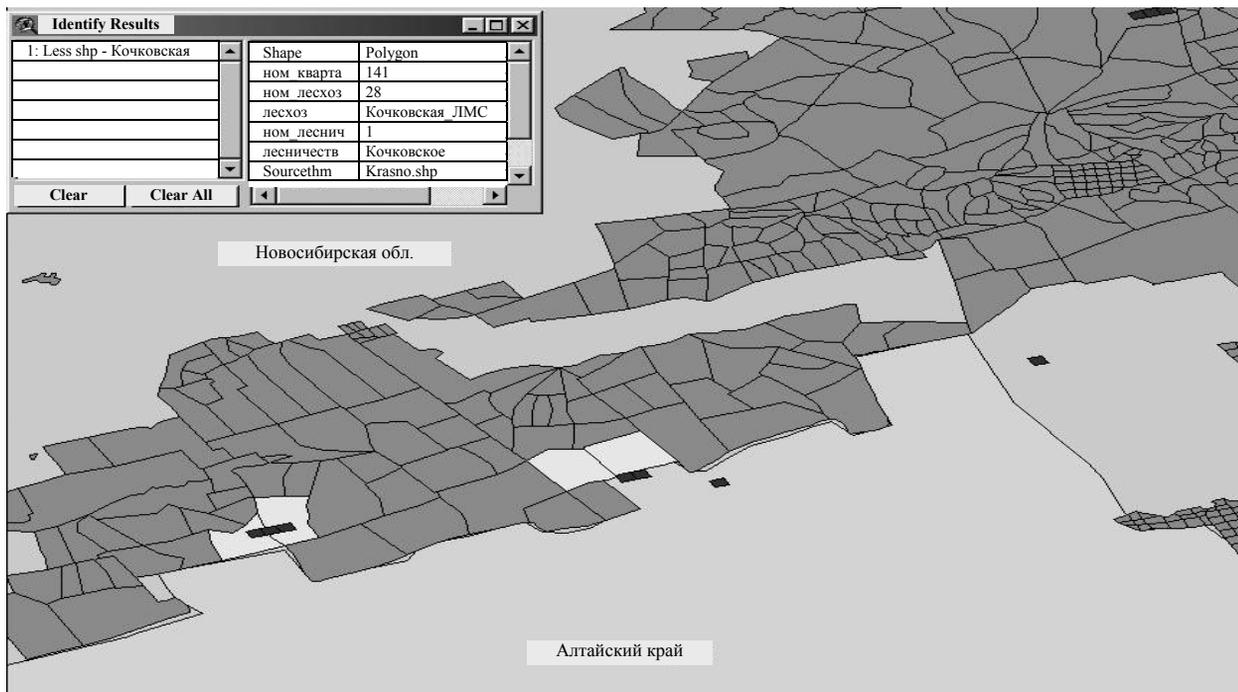


Рис. 1.10. Пример оперативной отчетности в ГИС "Лесные пожары Западно-Сибирского РЦПОД"

Глава 2. ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СО СПУТНИКОВ NOAA

В этом разделе рассмотрена возможность использования данных со спутников серии NOAA для пространственной оценки пожарной опасности (ПО) лесных территорий. На основе архивных данных за пожароопасный период 1996 г. исследована суточная динамика радиационной температуры поверхности, вычислены поправочные коэффициенты для корректирования спутниковых данных.

Обсуждается вопрос восстановления значений температуры поверхности в районах, закрытых облачностью. На основе информации с ИСЗ NOAA восстановлена динамика комплексного показателя пожарной опасности Нестерова за выбранный тестовый период времени. Проведен корреляционный анализ полученных значений с данными метеостанций.

Описана методика пространственной оценки ПО на основе показателя суммы радиационных температур. Представлены картосхемы пространственного распределения показателя пожарной опасности на основе спутниковых данных за пожароопасный период 1996 г. на территории Красноярского края.

2.1. Исходные требования к системе определения пожарной опасности

2.1.1. Охват территории

В течение пожароопасного периода 1996 г. ситуация с возникновением и распространением лесных пожаров на территории Красноярского края была крайне напряженной. К примеру, на территории одного Богучанского авиаотделения во время пика пожарной напряженности в июле 1996 г. были зарегистрированы 72 лесных пожара общей площадью свыше 168000 га. Поэтому именно этот пожароопасный период был выбран в качестве тестового для отработки методик прогноза пожарной опасности (ПО) с использованием данных со спутников NOAA. Этот прогноз особенно важен, когда наземная метеорологическая сеть не только не совершенствуется, но и сокращается, и когда этот процесс сопровождается сокращением средств, выделяемых на авиапатрулирование.

Показатель пожарной опасности характеризует собой готовность лесных горючих материалов (ЛГМ) к воспламенению и поддержанию горения. Решающим фактором здесь является влагосодержание ЛГМ. Таким образом, система определения индекса ПО должна ориентироваться на эти данные. На сегодняшний день

такая система базируется на информации, косвенно определяющей влагосодержание. Это данные метеорологических станций наземного базирования о температуре воздуха и температуре точки росы.

$$ПО = \sum T_{air}(x, y) (T_{air}(x, y) - T_{dpoint}(x, y)), \quad (2.1),$$

где ПО – индекс пожарной опасности; T_{air} – температура воздуха; T_{dpoint} – температура точки росы. Суммирование ведется за весь период наблюдения. В случае выпадения осадков показатель ПО Нестерова уменьшается пропорционально количеству выпавших осадков.

Однако интенсивность высыхания ЛГМ в большей мере определяется температурой горючего материала (T_m) [2, 31], поэтому влагосодержание более тесно коррелирует с T_m , чем с температурой воздуха T_{air} , поскольку последняя не отражает процесс радиационного теплообмена ЛГМ с окружающей средой. В этом видится одно из преимуществ дистанционных космических методов определения ПО, которые основываются на измерениях радиационной температуры подстилающей поверхности.

Рассмотрим возможность оценки ПО по показателю суммы радиационных температур путем исследования корреляционной связи между показателем суммы радиационных температур и показателем ПО Нестерова.

В течение пожароопасного периода 1996 г. на территории Красноярского края действовало 60 метеостанций. В среднем на территории одного авиаотделения находится не более 2. При таком количестве метеостанций, распределенных по территории площадью около 1,8 млн км², невозможно получить или спрогнозировать детальную картину пространственного распределения индекса пожарной опасности.

Таким образом, существующая сеть метеостанций не позволяет в полной мере удовлетворить потребность в создании крупномасштабных картосхем распределения индекса ПО. Причем практически неохранными остаются северные районы края в связи с отсутствием там метеостанций.

Необходимым охватом территории обладает информация, поступающая с ИСЗ НОАА. Эти данные принимаются Красноярской станцией HRPT, функционирующей в Красноярске с 1994 г. Полоса обзора за один сеанс связи достигает 2000 км, охват территории от Западной Сибири до Забайкалья и от озера Балхаш в Средней Азии до побережья Северного Ледовитого океана. Причем разрешение в подспутниковой точке составляет 1,1 км. Площадь обзора и разрешение в полной мере удовлетворяют требованиям системы определения пожарной опасности [2, 3].

2.1.2. Периодичность получения информации

Как показывают статистические данные, процесс нарастания показателя ПО под действием иссушающих факторов – таких, как солнечная радиация, ветер – монотонен и статичен. Резкие изменения могут происходить лишь в сторону уменьшения показателя ПО пропорционально количеству выпавших осадков. Существующая система определения ПО базируется на данных метеостанций, поступающих

на пункт диспетчера подразделений авиалесоохраны один раз в сутки. При этом существенно, что количество выпавших осадков фактически учитывается за предыдущие сутки. Таким образом, изменение ситуации в течение суток реально не фиксируется.

Информация со спутников NOAA, охватывающая данную территорию может быть получена до 10 раз в сутки с интервалом примерно в 2,5 часа. Следовательно, в случае экстремальной ситуации может быть организовано круглосуточное наблюдение с целью определения динамики изменения ПО, а также с целью краткосрочного прогнозирования развития пожароопасной ситуации.

2.1.3. Учет местных особенностей ЛГМ

Показатель пожарной опасности территории, помимо иссушающих и увлажняющих факторов, во многом определяется местными особенностями ЛГМ. Необходимо учитывать как состав и структуру ЛГМ, так и особенности природной зоны, лесорастительного района, ландшафта, анализировать статистические наблюдения.

Цифровая информация со спутников NOAA может быть скорректирована программными средствами и дополнена, в том числе данными о местных и сезонных особенностях ЛГМ. Следовательно, конечная информация, представляющая собой уже геоинформационную систему ПО, во многом может опережать по оперативности и информативности метеорологическую систему определения ПО. Учитывая это, возможно введение местных шкал в ГИС пространственной оценки пожарной опасности.

2.2. Возможности спутников NOAA для оценки индекса пожарной опасности

Спутники серии NOAA – полярноорбитальные спутники с периодом обращения 108 мин. Над данной территорией спутник бывает два раза в сутки, следовательно, период приема информации составляет 12 часов. На орбите функционируют, как правило, 3 – 4 спутника. Бортовая сканирующая аппаратура имеет каналы в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра.

Как уже отмечалось, в комплект бортового оборудования входят: сканирующий радиометр высокого разрешения AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), предназначенный для регистрации отраженного и собственного излучения подстилающей поверхности Земли в пяти спектральных каналах; он обеспечивает пространственное разрешение в надире 1,1 км, ширину полосы обзора более 2000 км. Радиометр TIROS-TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) представляет собой комплекс трех независимых систем, данные которых могут быть использованы для восстановления вертикальных профилей температуры, влажности воздуха, концентрации озона и других параметров.

Анализ основных характеристик спутников NOAA и бортовой системы наблюдения позволяет сделать вывод о возможности создания системы определения пожарной опасности на основе данных спутникового радиационного зондирования [35].

2.3. Анализ данных собранных за тестовый пожароопасный период

2.3.1. Оценка пространственного распределения температуры по данным AVHRR

На основе информации, собранной за пожароопасный период 1996 г., проведен корреляционный анализ данных метеонаблюдений и информации, полученной со спутника NOAA-12. Анализировались данные теплового (11,5 – 12,5 мкм) 5-го канала AVHRR. При анализе результатов учитывалась несинхронность данных метеостанций и дистанционного спутникового зондирования.

Сеансы приема информации со спутника в летнее время проходили с 0 до 1 по гринвичскому среднему времени, в то время как показания на метеостанциях берутся с 4 до 5 по гринвичскому среднему времени. Как показали наблюдения, процент облачности в информации дневного сеанса связи в среднем в 1,5 раза выше, чем в утреннем. Это вызвано повышенным испарением с поверхности в часы максимальных полуденных температур.

Таким образом, ввести поправку на суточное изменение радиационных температур поверхности проще, чем восстановить температуру в районах, закрытых облачностью. Несинхронность измерений во времени приводит к тому, что значения температурных параметров, полученных со спутника, систематически занижены относительно данных метеостанций. Эту систематическую ошибку удастся устранить на основе анализа статистических данных.

Исследовались данные, собранные за период с 29 мая по 31 июля 1996 г. В анализ были включены метеостанции, расположенные в центральных и южных районах Красноярского края, в Приангарье: Стрелка, Мотыгино, Богучаны, Абан, Ворогово, Александровский шлюз, Северо-Енисейск, Полигус, Байкит, Ванавара, Большой Улуй, Кача, Артемовск, Бея, Нижнеусинское. Выбор данного района осуществлен по причине наибольшей пожарной напряженности в течение пожароопасного периода 1996 г. Таким образом, все результаты были получены при обработке данных за 62 дня по 15 метеостанциям, т. е. около 900 значений.

Исходным материалом послужили база данных Красноярского регионального пункта авиалесоохраны, содержащая информацию метеостанций, и база данных Красноярской станции приема спутниковой информации, собранная весной – осенью 1996 г.

На основе проведенного анализа установлена связь между показаниями метеостанций и данными о радиационной температуре, полученными со спутника. Коэффициент корреляции $r = 0,75$, при этом среднее систематическое отклонение в показаниях температур составляет 9,9 градуса. По экспериментальному распределению точек методом наименьших квадратов вычислены коэффициенты линейного уравнения для учета квазисинхронности измерения температур. Полученная зависимость имеет следующий вид:

$$T_{\text{air}} = 1,05T_{\text{AVHRR}} + 9,34, \quad (2.2),$$

где T_{air} – данные метеостанций о температуре воздуха, T_{AVHRR} – радиационная температура по данным радиометра AVHRR.

В силу того, что 5-й тепловой канал радиометра AVHRR не прозрачен для оптически плотных атмосферных образований (таких, как облака) и дает радиацион-

ную температуру видимой поверхности, в экспериментальных данных могут содержаться ошибки, связанные с наличием облачности в кадре. Для исключения этих данных использовались данные измерений в видимом, ближнем инфракрасном и тепловом диапазонах. Пороговая температура была выбрана на основе анализа показаний метеостанций как минимальная температура, зафиксированная за данный период времени.

Второй этап – восстановление температуры подоблачного слоя. Можно воспользоваться данными метеостанций, внося экстраполированные значения температуры. Однако в рассматриваемом случае использовались данные микроволнового зондирования атмосферы бортовой системой TOVS, что позволило оперировать только спутниковыми данными.

2.3.2. Оценка температуры воздуха по данным TOVS

В отличие от ИК-канала радиометра AVHRR, данные радиометра TIROS-TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) можно использовать для оценки температуры в районах, закрытых облаками. Один сеанс приема позволяет восстановить вертикальные профили 15 параметров (в том числе температуры воздуха и температуры точки росы) в 600 точках, распределенных по территории в зоне видимости спутника.

На один кадр AVHRR, охватывающий район 1000×1000 км² (примерно половина площади Красноярского края), приходится до 150 точек зондирования. Это превосходит количество метеостанций, распределенных по краю. Следовательно, в плане охвата территории и разрешения радиометр TOVS – источник, существенно дополняющий данные метеостанций.

Вследствие того, что точки зондирования, как правило, не совпадают с координатами метеостанций, необходимо вычислять интерполированные значения параметров в данных точках. При этом можно, например, использовать метод взвешенного усреднения:

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n W_i f(x_i, y_i), \quad (2.3),$$

где $W_i = \frac{1}{R_i} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}$ – весовые коэффициенты; $F(x, y)$ – значение параметра в данной точке; $f(x_i, y_i)$ – значение параметра в i -ой точке зондирования; причем выполняется условие $\sum_{i=1}^n W_i = 1$.

Установлена устойчивая связь значений температуры воздуха, полученных со спутника, с данными температуры воздуха по метеостанциям. В среднем по данному набору метеостанций коэффициент корреляции $r = 0,88$, а среднее систематическое отклонение температуры воздуха составило 7,9 градуса. Необходимо отметить, что в данном случае также присутствует проблема несинхронности измерений температуры со спутника и на метеостанциях. Это объясняет сдвиг в показаниях температур TOVS по отношению к данным метеостанций.

На основе экспериментального распределения методом наименьших квадратов определены коэффициенты линейной зависимости показаний температур

$$T_{\text{air}} = 0,84T_{\text{TOVS}} + 10,43, \quad (2.4),$$

где T_{TOVS} – температура воздуха на высоте 1000 мбар по данным TOVS; T_{air} – температура воздуха по данным метеостанций.

Таким образом, данные TOVS могут использоваться для восстановления температур в подоблачном слое как самостоятельный или дополнительный к метеостанциям источник информации о температуре. Это позволяет проводить экстраполяцию температур на данный район, тем самым корректируя показания AVHRR. Причем большее количество точек зондирования атмосферы по сравнению с количеством метеостанций позволяет более детально анализировать распределение температур, что немаловажно для системы определения пожарной опасности по условиям погоды.

2.3.3. Температура точки росы по данным TOVS

Необходимым параметром для определения пожарной опасности лесных территорий является температура точки росы в (2.1). В системе метеостанций эта характеристика ежедневно измеряется наряду с температурой воздуха. Спутниковая бортовая система TOVS позволяет восстанавливать профили параметров атмосферы в зависимости от высоты, в том числе и восстанавливать температуру точки росы на различных высотах.

Установлено, что коэффициент корреляции между спутниковыми данными и показаниями метеостанций $r = 0,77$, при этом среднее систематическое отклонений температур точки росы составляет 3,8 градуса. Для учета этой систематической ошибки, связанной с несинхронностью измерений, определены коэффициенты линейного уравнения

$$T_{\text{dpoint}} = 0,9T_{\text{TOVSdpoint}} + 2,37, \quad (2.5),$$

где T_{dpoint} – значение температуры точки росы по данным метеостанций; $T_{\text{TOVSdpoint}}$ – данные дистанционного спутникового зондирования на высоте, соответствующей давлению 1000 мбар.

Итак, по крайней мере для лесных районов Красноярского края можно сделать вывод о возможности использования спутниковых данных в качестве исходной информации при оценке состояния ПО. Определены коэффициенты уравнений (2.2, 2.4, 2.5), учитывающие динамику изменения метеорологических параметров в течение суток. Разработана методика экстраполяции растровых данных комплекса микроволнового зондирования TOVS на всю территорию Красноярского края. Таким образом, представляется возможность оценивать показатель ПО Нестерова (2.1) спутниковыми дистанционными методами по крайней мере в масштабах регионов.

2.4. Показатель ПО Нестерова, восстановленный по данным NOAA

Поскольку методика оценки количества выпавших осадков на основе спутниковых данных находится на стадии разработки, данные об осадках, необходимые для расчета показателя ПО Нестерова, берутся из базы данных метеостанций. Хотя эта величина и не входит в уравнение индекса ПО Нестерова, она играет значительную роль в изменении ПО обратно пропорционально количеству выпавших осадков (рис. 2.1, 2.2, 2.3). В существующей системе определения ПО такая корректировка вносится в соответствии с поправочными коэффициентами, разработанными В.А. Жданко и М.В. Гриценко и проверенными на большом статистическом материале [36]. Ниже приведена табл. 2.1 этих поправочных коэффициентов.

Из табл. 2.1 видно, что в случае отсутствия осадков показатель ПО не претерпевает каких-либо изменений, но сбрасывается на ноль в случае выпадения осадков количеством 20 мм и более. В целях упрощения вычислений применена методика сброса коэффициента пожарной опасности пропорционально количеству осадков, так что поправочный коэффициент имеет вид:

$$K = \begin{cases} 1/h, & \text{при } h \geq 2 \\ 0,8, & \text{при } 0 < h < 2 \end{cases} \quad (2.6).$$

Здесь h – значение количества выпавших осадков в миллиметрах. Как показал анализ, это не сказалось на качестве полученных оценок ПО, но несколько упростило саму процедуру коррекции результатов и дало возможность более дифференцировано подходить к оценке влияния осадков на показатель ПО.

В табл. 2.2 приведены результаты анализа корреляции показателя Нестерова (КПН), восстановленного по данным спутников NOAA, со значениями индекса ПО Нестерова по данным метеостанций.

В [37] показано, что учет суточной динамики метеорологических параметров, в том числе температуры и температуры точки росы, является существенным моментом в системе оценки ПО. В предположении линейной зависимости $T(t)$ (см. уравнения 2.2, 2.4, 2.5) получено существенное повышение коэффициента корреляции между показателем ПО Нестерова, восстановленным по данным ИСЗ NOAA, и данными метеостанций до $r = 0,88$.

Таблица 2.1

Поправочные коэффициенты

Осадки, мм	Нет или есть	0,1 – 0,9	1,0 – 2,9	3,0 – 5,9	6,0 – 14,9	15,0 – 19,9	20,0 и более
Поправочный коэффициент	1,0	0,8	0,6	0,4	0,2	0,1	0

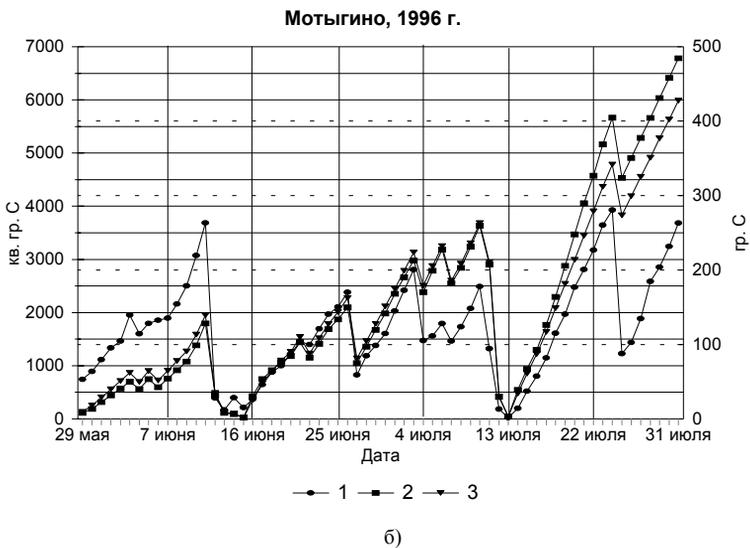


Рис. 2.1. Модификация показателя Нестерова по данным ИСЗ NOAA.
 Пожароопасный период 1996 г. Богучаны (а), Мотыгино (б)

1 – показатель Нестерова по данным метеостанции, кв. гр. С; 2 – показатель Нестерова, восстановленный по данным ИСЗ NOAA, кв. гр. С; 3 – показатель аккумулятивной температуры по данным ИСЗ NOAA, гр. С.

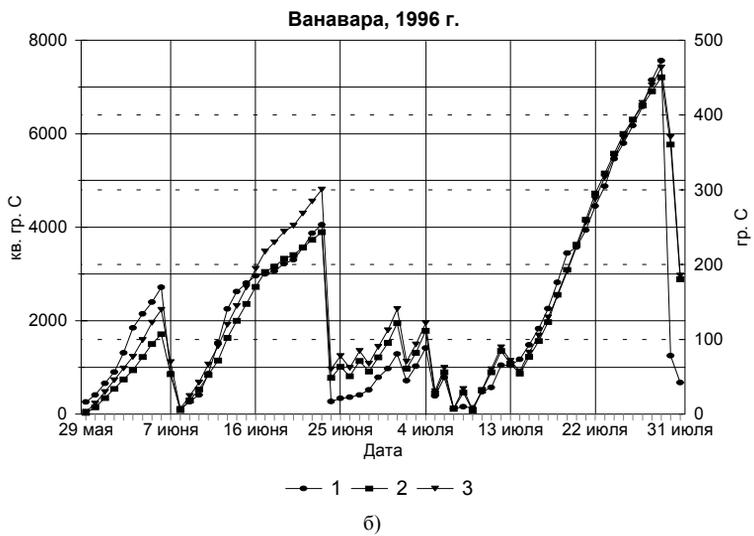
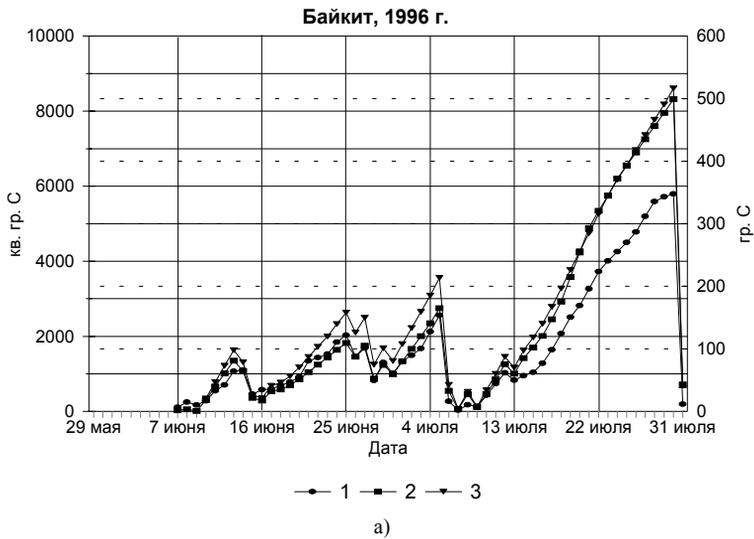


Рис. 2.2. Модификация показателя Нестерова по данным ИСЗ NOAA.
Пожароопасный период 1996 г. Байкит (а), Ванавара (б)

1 – показатель Нестерова по данным метеостанции, кв. гр. С; 2 – показатель Нестерова, восстановленный по данным ИСЗ NOAA, кв. гр. С; 3 – показатель аккумулятивной температуры по данным ИСЗ NOAA, гр. С.

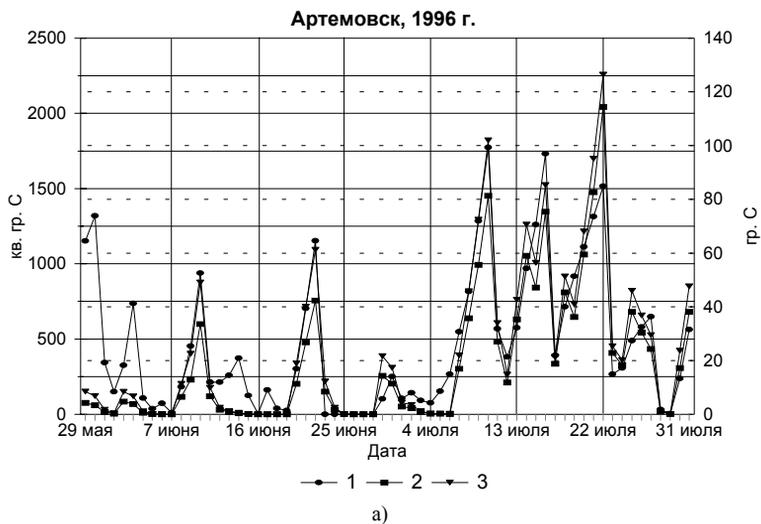


Рис. 2.3. Модификация показателя Нестерова по данным ИСЗ NOAA.
Пожароопасный период 1996 г. Артемовск (а), Нижнеусинское (б)

1 – показатель Нестерова по данным метеостанции, кв. гр. С; 2 – показатель Нестерова, восстановленный по данным ИСЗ NOAA, кв. гр. С; 3 – показатель аккумулятивной температуры по данным ИСЗ NOAA, гр. С.

Таблица 2.2

Коэффициенты корреляции между показателями ПО на основе индекса
 аккумулятивной радиационной температуры и восстановленного по данным
 ИСЗ NOAA показателя ПО Нестерова с данными по метеостанциям

Группа районов	Метеостанция	КПН и восстановленный показатель Нестерова	КПН и индекс аккумуля- тивной температуры
Ангарская	Стрелка	0,87	0,86
	Мотыгино	0,71	0,74
	Богучаны	0,98	0,97
	Абан	0,91	0,88
Северная	Ворогово	0,89	0,97
	Александровский шлюз	0,96	0,97
	Северо-Енисейск	0,95	0,96
	Полигус	0,98	0,98
	Байкит	0,99	0,99
	Ванавара	0,92	0,93
Южная	Б. Улуй	0,85	0,88
	Кача	0,88	0,89
	Артемовск	0,84	0,86
	Бея	0,65	0,67
	Нижнеусинское	0,86	0,89

Высокие коэффициенты корреляции данных, полученных на метеорологических станциях ангарской и северной групп районов, вероятно, можно объяснить редким выпадением осадков за период наблюдений. Следовательно, единственным фактором, влиявшим на динамику индекса ПО, было количество аккумулятивной солнечной радиации. Устойчивая корреляционная связь с показателем аккумулятивной температуры еще раз подтверждает предположение о возможности использования радиационных температур для оценки ПО. Результаты сравнения показателя ПО на основе индекса аккумулятивной температуры с наземными данными также представлен в табл. 2.2 Среднее значение коэффициента корреляции $r = 0,89$.

Таким образом, установлена зависимость суточного изменения регистрируемых параметров, это позволило оценить коэффициент пожарной опасности на основе спутниковых данных. Следовательно, используя эти данные, с большой степенью надежности можно судить о пожароопасном состоянии лесов. То есть существует возможность создания системы пространственной оценки пожарной опасности в дополнение к имеющейся, основанной на показаниях метеостанций.

2.5. Пространственное представление индекса ПО

В настоящее время на основе информации, получаемой на станциях приема данных со спутников серии NOAA, разрабатывается методика пространственной оценки пожарной опасности (ПО) в лесу. В основу положены данные спутникового дистанционного зондирования в тепловом (инфракрасном) и микроволновом диапазонах.

В соответствии с необходимостью может быть выбран тот или иной район. Для этого из первичных данных вырезается кадр и переводится в проекцию, которую можно выбирать в соответствии с требованиями. Такой кадр представляет собой цифровое изображение 1024×1024 пиксела с разрешением $1,1 \times 1,1 \text{ км}^2$, либо $2,2 \times 2,2 \text{ км}^2$ при половинном разрешении.

Предлагаемая методика определения индекса ПО заключается в оценке величины солнечной энергии, аккумулированной ЛГМ. Для этого программными средствами осуществляется попиксельное суммирование изображений (2.7), собранных за определенный период времени. В результате на каждый день можно получать картосхему распределения накопленной за предыдущий период времени температуры и величины, характеризующей ПО.

$$ПО = \sum T_n(x, y), \quad (2.7),$$

где T_n – радиационная температура подстилающей поверхности (данные ИК канала радиометра AVHRR, 11,5 – 12,5 мкм). Суммирование ведется за весь период наблюдения.

В отличие от метеорологической системы определения показателя ПО предлагаемый метод позволяет получать картосхемы пространственного распределения индекса ПО на большие районы, в том числе и на неохранные территории. Причем детальность таких картосхем во много раз выше, чем у данных сети метеостанций. В случае пика пожарной напряженности существует возможность контролировать суточную динамику ПО.

Для восстановления температурного поля на территории, закрытой облачностью, применяются данные комплекса микроволнового зондирования TOVS.

Для восстановления значений температуры воздуха по данным нерегулярной сети точек зондирования TOVS в любой точке пространства использовался метод, основанный на кусочно-линейной аппроксимации, при которой поверхность, определяемая функцией, аппроксимируется кусочно-линейной поверхностью, состоящей из треугольников. Для этого на плоскости (x, y) создается сеть из непересекающихся треугольников. Проекция каждой точки пространства на плоскость (x, y) принадлежит лишь одной из треугольных граней, и значение функции $f(x, y)$ аппроксимируется кусочно-линейной функцией, принимающей заданные значения в точках опорного множества [28]. Процесс триангуляции состоит в создании сети непересекающихся треугольников с вершинами в заданных точках. Такими опорными точками служат, например, точки зондирования TOVS, а также точки расположения метеостанций.

В частности, разработчиками средств аппроксимации значений температуры в Красноярской ГИС была реализована триангуляция Делоне. Она строится одно-

значно и соединяет исходные точки в сеть наиболее правильных треугольников. Триангуляции Делоне исходных данных соответствует непрерывная кусочно-линейная поверхность в пространстве, состоящая из треугольников.

Таким образом, сечение полученной непрерывной кусочно-линейной поверхности дает изолинию того или иного параметра. Линейная экстраполяция по трем ближайшим точкам – вершинам треугольной грани, содержащей данную точку, – позволяет восстановить значение параметра в любой заданной точке. Эта методика использовалась для восстановления температурного поля в районах, закрытых облачностью, на основе нерегулярного распределения точек вертикального зондирования атмосферы TOVS.

Полученные картосхемы распределения показателя аккумулированной температуры явились основой для создания в Красноярском центре подсистемы определения пожарной опасности. Программные средства ARC/INFO 3.4.2 и ArcView 2.0 позволяют дополнить эту информацию географической базой данных, картой лесов, территориальным и административным районированием.

Полученные картосхемы представлены на рис. 1.6, 1.7, 1.8. Они отображают сезонные изменения распределения классов пожарной опасности на территории Красноярского края за пожароопасный период 1996 г. По величине показателя аккумулированной температуры выделены 5 классов пожарной опасности, в соответствии с используемыми классами пожарной опасности на основе показателя Нестерова. Однако на картосхеме, содержащей ситуацию за июль 1996 г. – пик пожарной напряженности (рис. 1.8), дополнительно введен 6-й класс пожарной опасности. Он отражает район экстремальной пожароопасной обстановки. По данным метеостанций, именно в этом районе (Богучаны) было достигнуто максимальное значение показателя Нестерова (рис. 1.6). Здесь же были зафиксированы в этот год 72 лесных пожара.

Глава 3. ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

3.1. Физические основы алгоритмов обнаружения лесных пожаров из космоса

Обнаружение лесных пожаров и прежде всего на ранней стадии их возникновения – наиболее сложная и ответственная часть лесопожарного мониторинга с использованием искусственных спутников Земли [2, 23, 39 – 41].

В основе построения различных алгоритмов решения этой задачи лежат два фундаментальных физических закона. Это закон отражения световых потоков и закон излучения телами оптической энергии. Для обнаружения тепловых источников прежде всего важно знать его излучательную способность.

По формуле Планка поток энергии, излучаемой в состоянии термодинамического равновесия единицей поверхности абсолютно черного тела с температурой T в интервале длин волн $\lambda, \lambda+d\lambda$:

$$L_j(T) = \frac{10^{-6} \int_0^{\infty} \varepsilon_{\lambda} \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda \cdot T)] - 1} Y_j(\lambda) d\lambda}{\pi \int_0^{\infty} Y_j(\lambda) d\lambda}, \quad (3.1),$$

где $c_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт · м² – первая постоянная Планка;

$c_2 = 1,43876 \cdot 10^{-2}$ м · К – вторая постоянная Планка;

T – термодинамическая температура, К;

ε_{λ} – излучательная способность;

λ – длина волны, мкм;

$Y_j\lambda$ – функция спектрального отклика датчика j -го канала.

Полная энергия во всем интервале длин волн описывается формулой Стефана-Больцмана:

$$\int_0^{\infty} B(\lambda, T) d\lambda = aT^4, \quad (3.2),$$

где $a = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт · м⁻² · К⁻⁴.

При наблюдении Земли из космоса при длинах волн короче 2 – 3 мкм регистрируется энергия Солнца, отраженная и рассеянная поверхностью суши, воды и облаков. Температура поверхности (фотосферы) Солнца равна 5785 К, максимум излучения приходится 0,5 мкм.

Эта формула дает возможность оценить и сравнить интенсивность излучения различных объектов на земной поверхности (растительность, вода, лесные пожары и т. п.) без учета отражательных их свойств. Корректное решение задачи выделения лесного пожара на фоне других объектов требует учета как процесса отражения оптических потоков от элементов земной поверхности, так и учета еще как минимум двух физических процессов, сопровождающих распространение света в атмосфере. Это процессы рассеяния и поглощения света молекулярной и аэрозольной ее составляющей.

Обратимся к двум наиболее ярким иллюстрациям искажающего влияния атмосферы на данные наблюдения земной поверхности из космоса, которое обусловлено именно этими двумя процессами.

Первая воспроизведена на рис. 3.1 из работы Ю. Кауфмана [38]. На нем представлены результаты оценки влияния аэрозольной атмосферы на работу штатного алгоритма распознавания образов при тематической обработке многоканальной информации со спутника Landsat. Левый фрагмент рисунка – тест-участок (квадратный пруд со стороной 110 м, окруженный соевым полем). Центральный – спектральная отражательная способность воды и соевого поля. Правый – наблюдаемые из космоса спектральные образы тестового участка, поля скошенной пшеницы (равного по размеру тестовому участку) на фоне песчаной поверхности и воды на фоне песка.

Очевидно, что в данном случае атмосфера так трансформирует спектральные образы объектов наблюдения, что вода на фоне соевого поля воспринимается как поле скошенной пшеницы. Важно подчеркнуть, что этот результат соответствует модели безоблачной средней замутненности атмосферы.

Второй пример (рис. 3.2) взят из результатов исследований Института оптики атмосферы СО РАН, опубликованных в [39].

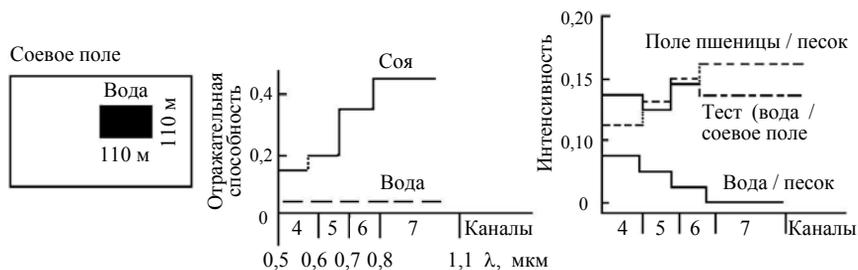


Рис. 3.1. Изменение спектрального образа и распознавание тест-участка земной поверхности при наблюдении его из космоса (4 оптических канала спутника Landsat) через аэрозольную атмосферу средней мутности

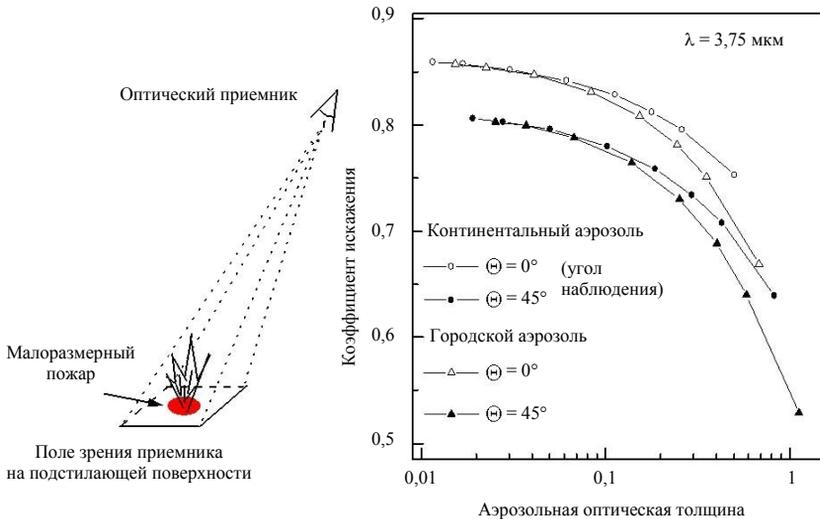


Рис. 3.2. Коэффициент искажения атмосферой линейного размера очага пожара

На этом рисунке показано, что процессы рассеяния в атмосфере могут искажать восстанавливаемые из космических изображений характеристики малоразмерных температурных аномалий (в частности, их размеров) почти в два раза при средней замутненности атмосферы аэрозолями.

3.2. Подходы к постановке задачи о спутниковом мониторинге очагов лесных пожаров

Общий подход к решению задачи детектирования очагов лесных пожаров со спутников можно сформулировать как классическую задачу обнаружения объекта на земной поверхности из космоса при сложной фоновой обстановке. При этом подходе задается некоторое решающее правило $P\{x\} > dP$, где величина dP – это пороговое значение функции $P\{x\}$, а ее параметры $\{x\}$ обычно являются спутниковыми измерениями или их функциями.

В качестве наиболее простых и часто применяемых на практике (см., например, обзор в работах [43, 44]) можно привести два спутниковых алгоритма обнаружения очагов пожаров – Fixed Threshold Techniques и Spatial Analysis Techniques. Здесь для получения решающего правила используются радиационная температура T_3 в спектральном канале 3,75 мкм (или 4 мкм), T_4 – в канале 11 мкм, а также их разница $T_{34} = T_3 - T_4$.

В Fixed Threshold Techniques для обнаружения очагов применяются фиксированные пороговые величины T_3^{\min} и T_{34}^{\min} , для которых должны выполняться два условия вида $T_3 > T_3^{\min}$ и $T_{34} > T_{34}^{\min}$. Значения пороговых величин, как правило, отличаются для дневных и ночных условий измерений. Для отбраковки облачных пикселей часто используют порог A^{\max} для значений альbedo, измеряемых в видимых каналах прибора, и порог T_4^{\min} для радиационной температуры T_4 . В работе [45] авторы предложили использовать четыре градации порогов в зависимости от величины альbedo, измеряемого в канале 1 AVHRR. Необходимо также отметить заметные различия пороговых величин у разных авторов, что, по-видимому, можно связать с региональным фактором.

В Spatial Analysis Techniques обнаружение события "пожар" осуществляется при выполнении двух условий вида $T_3 > \mu_3 + C \cdot \sigma_3$ и $T_{34} > \mu_{34} + C \cdot \sigma_{34}$, где μ – средние значения T_3 или T_{34} , σ – среднеквадратичное отклонение (СКО) этих величин, а C – числовой коэффициент в диапазоне значений 1,5 ÷ 4. Значения μ и σ вычисляются в окне размером $N \times N$ пикселей ($N = 3 \div 21$) вокруг "потенциального" очага. Довольно часто спутниковые алгоритмы состоят из двух этапов, где последовательно используются оба подхода.

В последнее время появились более сложные методы решения этой задачи. В качестве такого примера можно привести алгоритм [46], разработанный в Институте солнечно-земной физики (ИСЗФ СО РАН), в котором используется метод потенциальных функций и восьмимерное пространство признаков (измерения в пяти каналах AVHRR и их контрасты). Этот алгоритм ниже будет рассмотрен более подробно.

Из приведенных выше примеров следует, что, несмотря на существование различных (достаточно сложных) реализаций спутниковых алгоритмов обнаружения пожаров, их решающие правила не учитывают информацию об оптическом состоянии атмосферы на момент проведения спутниковых измерений. То есть обнаружение пожаров из космоса производится на практике без атмосферной коррекции спутниковых данных.

В качестве редкого исключения можно привести MODIS Fire Products [43], где есть этап учета поглощения инфракрасного излучения атмосферными газами для коррекции данных в каналах 4 мкм и 11 мкм (например, на основе климатических данных). Однако, эта процедура атмосферной коррекции всё же не учитывает искажающее влияние атмосферного аэрозоля и отраженное от поверхности солнечное излучение в канале 4 мкм. Кроме того, в работе не обсуждается вопрос о требованиях к качеству метеорологической информации, используемой для атмосферной коррекции.

Анализ литературных данных позволяет сделать следующие выводы.

1. Известны лишь единичные работы [47, 48], в которых выполнены *теоретические* исследования по проблеме спутникового мониторинга лесных пожаров.
2. Мониторинг лесных пожаров из космоса осуществляется на практике, как правило, без атмосферной коррекции спутниковых данных.
3. Существуют единичные примеры [43] процедур приближенного учёта оптико-геометрических условий наблюдений в алгоритмах спутникового мониторинга лесных пожаров, однако в них, к сожалению, не исследуется влияние этого фактора на результативность раннего обнаружения очагов пожаров из космоса.

Следовательно, корректное решение проблемы раннего обнаружения очагов пожаров из космоса предполагает создание алгоритмов, которые:

(А) либо включают в явном виде этап атмосферной коррекции, которая позволяет сделать решающее правило независимым от оптико-геометрических условий наблюдения земной поверхности из космоса;

(В) либо адаптированы к атмосферным условиям (как-то учитывают их в своей внутренней структуре).

Прежде чем приступить к обзору наиболее часто используемых или перспективных алгоритмов обнаружения лесных пожаров, оценке их эффективности, рассмотрим возможности реализации пути (А).

Этот подход привлекателен еще и потому, что применение его дает возможность использовать искажающую вуаль атмосферы (при ее выделении из много-спектральных спутниковых изображений) системы земная поверхность – атмосфера) для количественного описания пространственного распределения оптических и микрофизических свойств атмосферного аэрозоля (в том числе и дымовых шлейфов).

3.3. Информационно-методические основы подсистемы атмосферной коррекции AVHRR-изображений

Итак, в постановке (А) решение задачи раннего обнаружения со спутников малоразмерных очагов лесных пожаров требует следующего информационно-алгоритмического обеспечения.

1. Алгоритмы восстановления яркостных характеристик очага пожара.

2. Характеристики подстилающей поверхности (ПП) – температура и альbedo ПП.

3. Характеристики оптического состояния атмосферы (оптическая погода).

3.1. Метеорологические параметры атмосферы – вертикальные профили температуры и влажности воздуха.

3.2. Характеристики атмосферного аэрозоля.

4. Алгоритмы оценки по спутниковым данным характеристик оптического состояния атмосферы в момент съемки.

3.3.1. Алгоритмы восстановления яркостных характеристик очага пожара

Пусть на некотором участке подстилающей поверхности площадью S_0 , соответствующей углу поля зрения радиометра, и температурой T_0 есть малоразмерный очаг пожара площадью S_F ($S_F \ll S_0$, $S_F = 10 \div 10000 \text{ м}^2$) и температурой T_F ($T_F = 600 \div 1200 \text{ К}$).

Интенсивность J_n (n-номер канала) восходящего потока ИК-излучения можно записать следующим образом:

$$J_n = B_\lambda(T_n), \quad J_n = J_{\text{НОТ}} + J_{\text{БГ}},$$

где $B_\lambda(T_n)$ – функция Планка, T_n – радиационная температура в n-ом ИК-канале прибора; $J_{\text{НОТ}}$ – интенсивность ослабленного атмосферой излучения очага, $J_{\text{БГ}}$ – интенсивность излучения фона.

Вклад теплового излучения в измеряемую интенсивность J_n можно записать в виде:

$$J_{\text{НОТ}} = B_{\text{НОТ}} \cdot P_{\lambda}, \quad B_{\text{НОТ}} = R(\theta) \cdot \varepsilon_{\lambda}^F \cdot B_{\lambda}(T_F), \quad R(\theta) = S_F/S_0(\theta),$$

где $P_{\lambda} = \exp\{-\tau_{\lambda}/\cos(\theta)\}$ – пропускание атмосферы, τ_{λ} – оптическая толщина атмосферы, θ – угол сканирования оси прибора, ε_{λ}^F – излучательная способность теплового источника.

Вклад фона в измеряемую интенсивность J_n можно представить в виде суммы четырех слагаемых:

$$J_{\text{BG}} = J_{\text{SRF}} + J_{\text{ATM}} + J_{\text{RFL}} + J_{\text{SCT}},$$

где J_{SRF} – вклад ослабленного атмосферой теплового излучения поверхности, J_{ATM} – вклад теплового излучения атмосферы, J_{RFL} – вклад отраженных от поверхности падающих на нее потоков теплового и солнечного излучений, J_{SCT} – вклад рассеянных атмосферой потоков теплового и солнечного излучений.

Отметим, что

$$J_{\text{SRF}} = (1 - R) \cdot \varepsilon_{\lambda}^0 \cdot B_{\lambda}(T_0) \cdot P_{\lambda}, \quad (3.3),$$

где ε_{λ}^0 – излучательная способность ПП;

$$J_{\text{ATM}} = f\{\theta, T(h), \tau_{\lambda}(h)\}, \quad (3.4)$$

зависит от вертикальных профилей температуры и характеристик ослабления атмосферы;

$$J_{\text{RFL}} = A_{\lambda} \cdot P_{\lambda} \cdot f_{\lambda}^{\text{RFL}}(Z, \text{met}, \text{ext}, \text{sct}), \quad (3.5),$$

где A_{λ} – альbedo ПП;

$$J_{\text{SCT}} = f_{\lambda}^{\text{SCT}}(\theta, \varphi, Z, \text{met}, \text{ext}, \text{sct}), \quad (3.5a).$$

В выражениях (3.3 – 3.5a) использованы обозначения геометрических параметров наблюдений (θ, Z, φ) и характеристик атмосферы: метеорологических (*met*), ослабляющих оптическое излучение (*ext*) и рассеивающих его (*sct*).

С точки зрения корректного учета оптико-геометрических условий наблюдений проблему обнаружения из космоса малоразмерного очага следует формулировать как задачу восстановления в канале 3 AVHRR интенсивности $B_{\text{НОТ}}$ излучения малоразмерного теплового источника:

$$B_{\text{НОТ}} = (J_3 - J_{\text{BG}})/P_3,$$

где J_3 – измеряемая интенсивность теплового излучения; J_{BG}, P_3 – интенсивность излучения фона и функция пропускания атмосферы, вычисляемые на основе априорной оптико-геометрической информации.

В этом случае решающее правило обнаружения очага лесного пожара из космоса $B_{\text{нот}} > \text{dB}$ будет *независимым* от оптико-геометрических условий наблюдений. Для достижения этой цели необходима информация о характеристиках подстилающей поверхности и метеопараметрах.

3.3.2. Характеристики подстилающей поверхности (ПП)

Температуру подстилающей поверхности (ТПП) можно задать на основе:

а) проводимых на гидрометеостанциях регулярных измерений температуры почвы;

б) данных восстановления ТПП из спутниковых ИК-измерений.

Информация о спектральной излучательной способности (или альбедо) различных типов ПП, характерных для заданного региона, определяется на основе спутниковых данных и дополняется результатами наземных и самолетных спектрофотометрических измерений. Кроме непосредственных измерений характеристик ПП привлекаются статистические региональные модели их пространственной и временной изменчивости, а также литературные источники.

3.3.3. Характеристики оптического состояния атмосферы (оптическая погода)

3.3.3.1. Метеорологические параметры атмосферы

Метеорологические параметры атмосферы (главным образом вертикальные профили температуры и влажности воздуха) являются априорной информацией для расчета, в первую очередь, функций пропускания атмосферы и интенсивности теплового излучения атмосферы в спектральных каналах спутниковых измерений.

На практике для получения априорной метеорологической информации могут быть использованы:

- данные региональной сети гидрометеостанций, на которых производятся регулярные измерения приземных значений температуры и влажности воздуха;
- данные со станций вертикального зондирования температуры и влажности воздуха (для Томского региона, например, где рассматриваемый подход реализуется – станции Новосибирск, Александровское, Колпашево);
- информация спутниковых зондировщиков атмосферы (например, NOAA/ATOVS);
- статистические региональные метеорологические модели атмосферы.

Очевидно, что существенное влияние на эффективность процедуры атмосферной коррекции имеет "возраст" метеорологической информации (интервал времени между измерениями метеопараметров и наблюдением земной поверхности из космоса).

С помощью численного моделирования в [41] были проведены исследования степени этого влияния. С этой целью проведены расчеты пропускания атмосферы и характеристик восходящего излучения в ИК-каналах AVHRR/NOAA для условий Томска с учетом реальной геометрии спутниковых наблюдений.

Метеопараметры атмосферы задавались на основе данных ИОА СО РАН за период май – сентябрь 1998 – 2000 гг. Спутниковые измерения имитировались расчётами с использованием метеоданных, ближайших по времени к моментам

проведения спутниковых наблюдений. В поле зрения прибора на земной поверхности имитировался источник теплового излучения с температурой $800 \div 1200 \text{ K}$ и площадью $10 \div 1000 \text{ м}^2$.

С целью атмосферной коррекции модельных спутниковых измерений и вычисления требуемых для этого характеристик использовались различные типы априорной метеорологической информации (АМИ): 1) метеоизмерения, выполненные на 1 час раньше момента проведения космомониторинга; 2) "стандартные" метеоизмерения, производимые с интервалом 3 часа на метеостанциях; 3) метеоизмерения, выполненные сутками раньше момента проведения мониторинга; 4) среднемесячные метеоданные.

Результаты расчетов (рис. 3.3) показывают, что для тепловых источников площадью менее $100 - 200 \text{ м}^2$ "возраст" АМИ оказывает заметное влияние на результаты восстановления. В зависимости от типа АМИ среднеквадратическая ошибка восстановления интенсивности излучения очага может отличаться в несколько раз, но остаётся как минимум в 2 раза ниже, чем без проведения атмосферной коррекции.

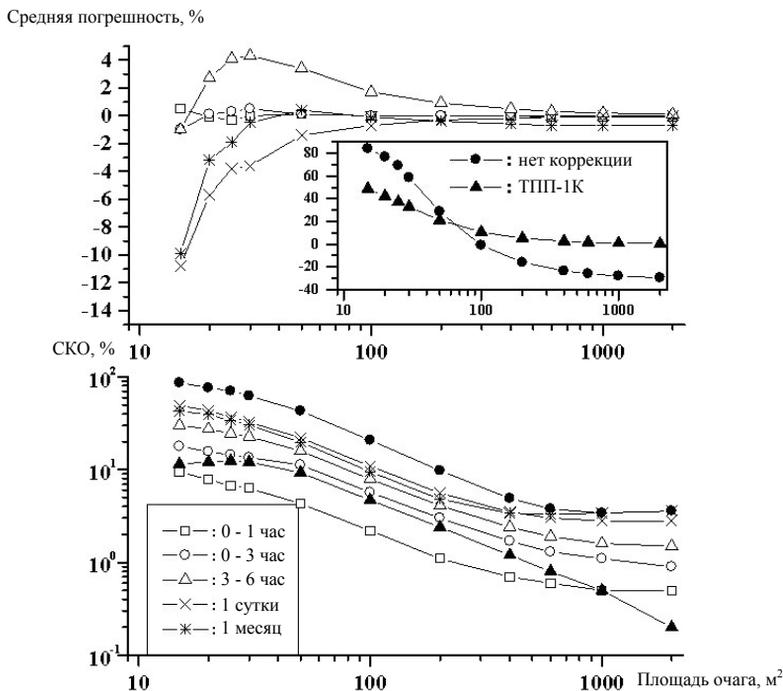


Рис. 3.3. Влияние характеристик априорной метеоинформации на точность восстановления интенсивности излучения очага пожара

Наряду с оценками влияния типа АМИ на результаты обнаружения малоразмерных очагов получены данные об их зависимости от точности задания фоновой температуры подстилающей поверхности T_0 (ТПП), используемой для расчёта входящей в J_{BG} величины J_{SRF} (см. раздел 3.3.2). Эти данные приведены на рис. 3.3 в выделенном окне и отражают достаточно жёсткие требования (на уровне $\pm 1^\circ$) к точности задания априорной информации о ТПП.

Следовательно, необходима разработка алгоритмов оперативного получения этой информации, ориентированных на совместное использование спутниковых данных и регулярных измерений на региональных метеостанциях.

3.3.3.2. Характеристики атмосферного аэрозоля

Данные об оптическом состоянии атмосферы являются одним из ключевых компонентов для достижения заметного прогресса в повышении эффективности решения задачи раннего обнаружения со спутников малоразмерных очагов лесных пожаров. К настоящему моменту в мире накоплен опыт применения спутниковых систем для мониторинга атмосферного аэрозоля и дымов лесных пожаров (например, [49 – 51]), однако для задачи обнаружения очагов пожаров из космоса этот опыт не используется.

Для получения оперативной информации об оптическом состоянии атмосферы (для её использования в целях атмосферной коррекции) необходимо восстанавливать в реальном масштабе времени ключевые характеристики атмосферного аэрозоля по спутниковым данным с помощью алгоритмов, адаптированных к региональным условиям проведения измерений.

Целесообразно (по возможности) обеспечить оперативный контроль результатов восстановления и для этого можно использовать данные наземных локальных измерений аэрозольных характеристик в регионе. Отметим, что в настоящее время (по крайней мере, в Сибири) формируется сеть измерителей оптического состояния атмосферы (приборная основа которой – стандартные датчики сети AERONET и автоматизированный многоволновый солнечный фотометр SP-6 (Институт оптики атмосферы СО РАН). В ближайшее время, кроме Томского центра космомониторинга, такими приборами будут обладать Иркутский, Красноярский и Якутский центры.

3.3.4. Восстановление характеристик атмосферного аэрозоля по спутниковым данным

Одна из возможных процедур восстановления характеристик атмосферного аэрозоля $\{aer\}$ по спутниковым измерениям в видимых каналах AVHRR/NOAA, адаптированного к условиям AVHRR-наблюдений в Томском регионе Западной Сибири, описана в [52] и состоит из следующих основных этапов:

А) расчет таблиц (Look-Up-Table или LUT) характеристик искажения спутниковых измерений с учетом реальных для региона диапазонов опико-геометрических условий наблюдений;

В) проведение статистического анализа временных рядов спутниковых снимков и получение региональных карт $A(x,y)$ характеристик отражения подстилающей поверхности (ПП);

С) выделение "аэрозольной составляющей" J_{AER} спутниковых измерений на основе таблиц LUT и с учетом реальных или оцененных на момент проведения измерений метеопараметров атмосферы (на основе данных наземных метеорологических измерений, TOVS/NOAA и др.), геометрии наблюдений и сезонных карт характеристик отражения ПП;

Д) получение аппроксимационных зависимостей $\{aer\} = F(J_{\text{AER}})$ для заданной аэрозольной характеристики;

Е) применение полученных аппроксимаций для восстановления $\{aer\}$ и картирование на основе спутниковых данных пространственного распределения $\{aer\}$ в заданном регионе.

Краткий анализ зависимостей характеристик искажения спутниковых измерений (представленных в LUT) от оптико-геометрических условий спутниковых измерений представлен в работе [53].

Некоторые пояснения работы алгоритма.

Выразим измеряемую на спутнике интенсивность восходящего излучения $J_{\text{SAT}}(x,y)$ следующим образом:

$$J_{\text{SAT}}(x,y) = J_{\text{SCT}}(x,y,aer) + J_{\text{RFL}}(x,y,aer) = J_{\text{SCT}}(x,y,aer) + A(x,y) \times J_{\uparrow}(x,y,aer),$$

где J_{SCT} и J_{RFL} – интенсивности потоков солнечного излучения, рассеянного атмосферой и отраженного ПП, $A(x,y)$ – альbedo ПП, J_{\uparrow} – интенсивность потока солнечного излучения, отраженного от ПП при $A = 1$.

На первых этапах обработки спутниковых снимков выполняются следующие действия:

- калибровка, географическая привязка и визуализация данных;
- вычисление для каждого спутникового снимка "молекулярных" (условие отсутствия аэрозоля) значений интенсивностей $J_{\text{SCT}}(x,y,0)$ и $J_{\uparrow}(x,y,0)$ на основе реальных или оцененных для времени проведения спутниковых измерений метеоданных и реальной геометрии наблюдений;
- Далее последовательно осуществляются следующие шаги.

(1) Для повышения точности восстановления $\{aer\}$ расчет "молекулярных" LUT производится фактически для каждого спутникового снимка с учетом требуемых именно для этого снимка диапазонов входной информации, необходимой для расчета таблиц.

(2) Реализация пункта В и получение региональных карт $A(x,y)$ характеристик отражения ПП осуществляется на базе статистического анализа временного ряда спутниковых снимков $J_{\text{SAT}}(x,y)$. При этом каждая точка $A(x,y)$ должна удовлетворять условию минимальности значения измеренной в канале $\lambda = 0,63$ мкм интенсивности излучения для всего заданного временного ряда спутниковых снимков.

(3) Статистический анализ временных рядов снимков и построения карт $A(x,y)$ включает:

- отбор безоблачных изображений, соответствующих условиям максимально высокой прозрачности атмосферы (для контроля здесь привлекаются данные наземных измерений аэрозольных характеристик);
- вычисление значений альbedo $A(x,y)$ с использованием выражения

$$A(x,y) = [J_{\text{SAT}}(x,y) - J_{\text{SCT}}(x,y,0)] / J_{\uparrow}(x,y,0);$$

- поиск "оптимальных" для мониторинга аэрозоля участков ПП, характеризующихся малыми значениями $A(x,y)$ и пространственной квазиоднородностью (для минимизации влияния ПП и ошибок геопривязки на результаты обработки спутниковых измерений).

(4) Выделение "аэрозольной составляющей" J_{AER} измерений AVHRR/NOAA на основе "молекулярных" LUT, с использованием реальных на момент спутниковых измерений метеоданных и геометрии наблюдений осуществляется с помощью простого соотношения:

$$J_{AER}(x,y) = J_{SAT}(x,y) - J_{SCT}(x,y,0) - A(x,y,\Theta,H_S) \times J^0_{\uparrow}$$

Необходимо отметить, что при этих вычислениях проводится приближенный учет влияния на $A(x,y)$ геометрии наблюдений (угла сканирования Θ и угловой высоты Солнца H_S) как $A(x,y,\Theta,H_S) = A(x,y) \times g(\Theta,H_S)$, где вид и параметры функции $g(\Theta,H_S)$ выбираются на основе литературных данных.

(5) На этапе D алгоритма определяется вид аппроксимационной зависимости аэрозольной характеристики от J_{AER} . В основе этого лежат результаты регрессионного анализа данных наземных измерений ИОА СО РАН за 1999 г. (г. Томск, с. Киреевск) и спутниковых снимков, безоблачных в окрестностях этих пунктов. Результаты регрессионного анализа приведены в работе [53] и позволяют сделать вывод о статистически значимой положительной корреляционной связи спутниковых данных и наземных измерений.

Высокий коэффициент корреляции (свыше 0,9) между аэрозольной оптической толщиной (АОТ или τ) и обработанными спутниковыми данными J_{AER} показал, что аэрозольная оптическая толщина наиболее адекватна J_{AER} , и для нее может быть построена достаточно простая и точная аппроксимационная зависимость $\tau = F(J_{AER})$.

Оценка точности полиномиальной аппроксимации показала, что, в зависимости от степени полинома ($n = 1,2$), ее ошибка составляет 0,03 – 0,05 (СКО) при максимальных ошибках 0,08 – 0,1, а относительная погрешность в среднем равна 12 – 18%. Результаты валидации алгоритма хорошо согласуются с литературными данными (например, [50, 51]). Следовательно, данный алгоритм по своей точности удовлетворяет характеристикам других спутниковых методов определения АОТ, а его расчетная схема адаптирована к условиям спутниковых наблюдений, соответствующих конкретному региону (в данном случае Томскому).

Для иллюстрации результатов работы алгоритма была проведена обработка спутниковых данных (NOAA-14) для Томской области и получены карты $\tau(x,y)$ АОТ в канале $\lambda = 0,63$ мкм за период 25 – 30 июля 1999 г., когда через территорию региона проходил мощный дымовой шлейф от крупных лесных пожаров в Восточной Сибири. В табл. 3.1 представлены частотные распределения АОТ для $\tau \leq 1,0$ и средние по региону спутниковые значения АОТ. Там же для сравнения приведены результаты наземных измерений АОТ в фоновом пункте измерений, расположенном в с. Киреевск, в 70 км от г. Томска.

Данные в табл. 3.1 отражают динамику изменения среднего значения АОТ, максимум которого приходится на 27 июля. Расхождение среднего значения в этот день по сравнению с "прозрачными" ситуациями 25 и 30 июля составляет около двух раз. Они же позволяют наблюдать трансформацию частотного распределения

Таблица 3.1

Частотные распределения аэрозольной оптической толщины ($AOT \leq 1$),
восстановленной в канале $\lambda = 0,63$ мкм по спутниковым снимкам (NOAA-14)
в Томском регионе за период 25 – 30 июля 1999 г., %

AOT	Даты (июль 1999 года)					
	25.07	26.07	27.07	28.07	29.07	30.07
0,0 – 0,1	19,49	8,63	0,94	3,40	11,54	19,29
0,1 – 0,2	26,30	20,73	6,79	20,99	23,68	44,12
0,2 – 0,3	15,60	15,31	11,39	12,59	19,61	14,17
0,3 – 0,4	10,51	14,84	11,03	9,59	14,41	6,43
0,4 – 0,5	7,67	11,07	11,64	10,73	8,28	4,30
0,5 – 0,6	5,72	7,95	10,85	13,38	6,10	3,26
0,6 – 0,7	4,53	6,20	11,09	9,88	4,92	2,61
0,7 – 0,8	3,88	5,59	12,46	8,35	4,35	2,24
0,8 – 0,9	3,41	5,15	12,32	6,41	3,76	1,94
0,9 – 1,0	2,90	4,51	11,49	4,67	3,34	1,64
Среднее	0,309	0,389	0,570	0,446	0,341	0,238
Киреевск	0,241	–	0,764	0,553	0,179	0,092

AOT – переход от одномодового в случае "прозрачной" атмосферы к двухмодовому и почти равномерному распределению с ростом содержания дымового аэрозоля в атмосфере.

Хорошее совпадение изменчивости средних по территории спутниковых значений AOT с данными наземных измерений дает основание считать спутниковые данные презентабельными. Дополнительной к табл. 3.1 иллюстрацией возможностей алгоритма восстановления AOT является представленная на рис. 3.4 (см. цв. вкладку) спутниковая карта $\tau(x,y)$ пространственного распределения аэрозольной оптической толщины в Томском регионе 27 июля 1999 г.

Рассмотрим алгоритмы обнаружения тепловых источников, в которых предпринимается попытка адаптации к атмосферно-оптическим условиям наблюдения (т. е. они каким либо образом учитываются во внутренней структуре самих алгоритмов).

3.4. Пороговый алгоритм

Обнаружение пожаров с использованием AVHRR-данных основано на том, что тепловой источник, попадая в поле зрения сканирующей аппаратуры в ИК-диапазоне, вызывает наибольшее увеличение температуры в 3-м канале AVHRR. Согласно закону Вина

$$\lambda_m T = c,$$

где $c = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К} = 2897,8 \text{ мкм} \cdot \text{К}$.

Тогда для лесного пожара с температурой зоны горения порядка $500 - 1000^\circ\text{К}$ увеличение температуры в третьем канале (длина волны $3,7 \text{ мкм}$), будет больше, чем в четвертом (длина волны 11 мкм) или пятом (длина волны 12 мкм) каналах. Задавая температурный порог для третьего канала, можно обнаружить высокотемпературный источник собственного излучения.

При этом тепловыми источниками могут быть и другие объекты с высокой температурой, как природные – такие, как нагретые солнцем открытые поляны, камни, песок и др., так и искусственного происхождения – трубы заводов, города и т. п. Эти источники принято называть ложными, а их обнаружение при обработке спутниковых данных – ложными тревогами.

Чтобы выделить лесные пожары среди ложных тревог, могут применяться различные методы обработки получаемой информации.

Температура относительно небольших по площади, но высокотемпературных объектов может быть такой же, как для больших, но имеющих сравнительно небольшую температуру объектов. Это происходит из-за конечного разрешения радиометра, когда суммарная температура захватываемого фона и пожара равна, например, температуре нагретой поляны, полностью занимающей мгновенное поле зрения.

Для идентификации таких тепловых аномалий ведется обработка AVHRR-изображений одних и тех же участков в двух каналах – третьем и пятом. Разность температур, определенная в этих каналах для пожаров (для абсолютно черного тела, нагретого до температуры 900°К), будет больше такой же разности для нагретых участков, хотя на снимке 3-го канала и те и другие могут выглядеть одинаково.

3.5. Особенности обнаружения малоразмерных пожаров в пороговых алгоритмах

Самым существенным недостатком сканера AVHRR является сравнительно большое мгновенное поле зрения и, соответственно, невысокое разрешение – $1,1 \times 1,1 \text{ км}$, один пиксел вмещает изображение с 121 га при наблюдении в нади́р. Для наиболее успешного тушения ЛП необходимо оперативно обнаруживать пожары площадью не более 1 га . Опыт авиационной охраны лесов показывает, что средняя площадь обнаруживаемых с самолета пожаров составляет $3 - 5 \text{ га}$. Такие пожары ликвидируются десантом из $4 - 6$ человек. Площадь свыше 25 га для одного и даже двух десантов считается критической, и пожары зачастую выходят из-под контроля.

При малоразмерном пожаре в мгновенное поле зрения радиометра попадает как высокотемпературная зона лесного пожара, которая занимает некоторую долю p пиксела ($0 \leq p \leq 1$) и имеет температуру $T_{II} \sim 800 \text{ К}$, так и "холодный" фон, который занимает остальную часть пиксела ($1 - p$) и имеет температуру T_{ϕ} .

Пусть f_3 – яркость некоторого пиксела в 3-м канале. При наличии малоразмерного пожара без учета влияния атмосферы

$$f_3 = pf_{3\Pi} + (1-p)f_{3\Phi}, \quad (3.6),$$

где $f_{3\Pi}$ – яркость от пожара, если бы он занимал весь пиксел, $f_{3\Phi}$ – яркость от фона, если бы он занимал весь пиксел.

По измеренному значению f_3 с использованием формулы Планка можно оценить эффективную температуру T_3 исследуемого пиксела. Наличие пожара вызывает увеличение T_3 .

На первом этапе обнаружения пожара значение T_3 сравнивается с порогом T_0 . Если $T_3 > T_0$, то возникает гипотеза о наличии пожара в пределах этого пиксела. Обычно пороговое значение температуры $T_0 = 310 - 320$ К. Более точный подбор T_0 обусловлен временем наблюдения и погодой. Днем в ясную солнечную погоду порог должен быть более высоким, чем вечером или ночью.

Однако обнаружение пожаров только по значению температуры в 3-м канале затруднено наличием засветок из-за отражения солнечного излучения от облачного покрова и водной поверхности. К тому же высокое значение T_3 может быть вызвано, например, приемом излучения от нагретой солнцем поляны, полностью занимающей весь пиксел.

На втором этапе анализируются координаты пиксела. Если пиксел попадает на водохранилище, озеро, реку, то это, вероятнее всего, ложная засветка от водной поверхности. Для распознавания облаков используют 1-й и 2-й каналы сканера AVHRR.

На третьем этапе информация 4-го или 5-го каналов позволяет отличить малоразмерный пожар от нагретой поляны или аналогичного объекта. Для пожаров с температурой $T_{II} = 800$ К разность температур 3-го и, например, 5-го каналов $I_{II} = T_3 - T_5$ будет больше такой же разности для нагретой поляны. Здесь учтено, что радиационная температура пиксела, вычисленная по яркости f_4 в 4-м или f_5 в 5-м канале, определяется в основном температурой фона T_Φ , а излучение от пожара или отражение от облачного покрова не оказывают существенного влияния на f_4 и f_5 .

При наличии пожара I_{II} лежит в пределах 8 – 14 К. Величину I_{II} можно использовать как пожарный индекс, характеризующий интенсивность лесного пожара и зависящий от времени суток, погодных условий и времени года.

На последнем этапе уточняется площадь высокотемпературной зоны пожара. Соотношение (3.6) следует решать относительно p , так как $f_{3\Pi}$ можно заранее вычислить с помощью формулы излучения Планка (3.1) при стандартной T_{II} ; яркость фона $f_{3\Phi}$ можно оценить по интенсивности излучения от пикселов с низким значением T_3 . Из (3.6) находим, что относительная площадь высокотемпературной зоны

$$p = (f_{3\Pi} - f_\Phi) / (f_3 - f_{3\Phi}),$$

а абсолютная площадь $S_{II} = pS_0$, где $S_0 = 121$ га для спутника NOAA при наблюдении в надир. Площади высокотемпературной зоны соседних пикселов суммируются.

К сожалению, проблема обнаружения и оценки площади малоразмерных тепловых аномалий значительно усложняется, если принимается во внимание влияние атмосферы на световые потоки, регистрируемые оптико-электронными приборами, размещаемыми на борту космических летательных аппаратов.

Иллюстрацией этому может служить рис. 3.2. Устранение этих атмосферных искажений (с помощью, например, лидарных систем космического базирования или рассмотренных выше программно-информационных средств) повышает вероятность обнаружения очагов лесных пожаров на ранней стадии их развития и, следовательно, расширяет перспективы эффективной борьбы с этим стихийным бедствием.

Выше рассмотрена типичная схема порогового алгоритма обнаружения тепловых аномалий на спутниковых многоканальных изображениях, в которых пороговое значение или остается постоянной величиной, или дискретно изменяется в зависимости от времени суток, например. В некоторых центрах этот порог подбирается оператором, исходя из опыта его работы (например, Западно-Сибирский РЦПОД).

В работе [52] показано, что корректный способ задания оптимального значения порога принятия решения (для дневного времени суток), обеспечивающий максимальную вероятность обнаружения малоразмерных источников теплового излучения, требует более тонкого учета оптико-геометрических условий съемки. В частности, необходим учет влияния на отраженные атмосферой и поверхностью световые потоки аэрозольной оптической толщины атмосферы, угла (не только зенитного, но и азимутального) между направлением падения солнечных лучей и направлением на наблюдаемую точку земной поверхности.

На рис. 3.5 приведен пример этой зависимости, полученной в модельных численных экспериментах. В них имитировалось наблюдение территории Томской области с помощью сканера AVHRR в условиях безоблачной атмосферы (при фиксированной ее аэрозольной оптической толщине) для различных угловых условий наблюдений (соответствующих реальным для данного географического района).

Из этого примера следуют два важных вывода. Первый – возможно появление *аэрозольных* (не от водной поверхности или краевых зон облаков) атмосферных бликов. Этим бликам соответствует максимум на верхней части рис. 3.5 (его появление физически несложно объяснить). Второй вывод состоит в том, что для корректного учета влияния оптико-геометрических условий наблюдения при организации пороговой процедуры обнаружения тепловых аномалий при обработке ИК-изображений земной поверхности необходимо выбирать пороговое значение для заданных геометрических условий и оптического состояния атмосферы, исходя из зависимостей, подобных тем, которые приведены на рис. 3.5.

3.6. Алгоритм составной модели пожара

В основе алгоритма составной модели пожара (АСМП) лежит контекстный алгоритм Объединенного Исследовательского Центра Европейской Комиссии, модифицированный специалистами ЦЭПЛ РАН и Международного Института Леса для сильно задымленных от пожаров территорий.

Для детектирования теплового источника в условиях сильной задымленности используется многопороговый подход, основанный на составной модели пожара. В данном алгоритме пиксели, подозрительные на принадлежность к классу "пожар" делятся на несколько классов, различающихся температурами и альбедо.

Выбор данных классов обосновывается анализом ошибок первого рода при детектировании – пропуска цели. Для уменьшения числа "ложных тревог", вызываемых

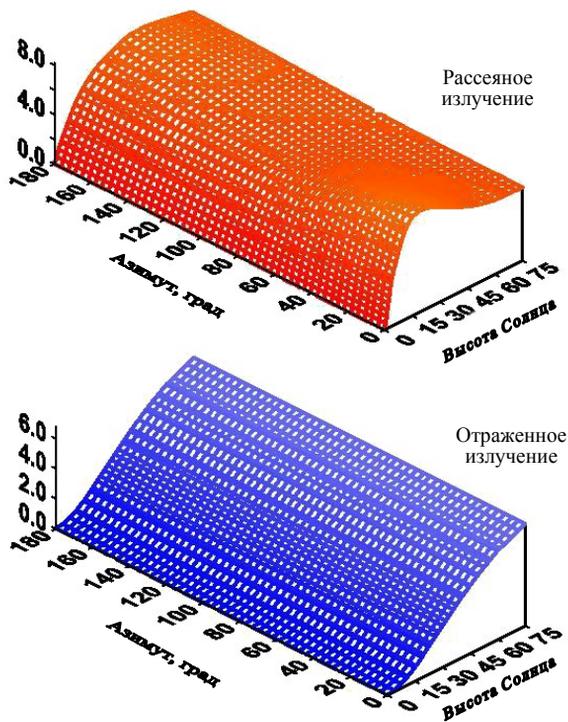


Рис. 3.5. Интенсивность (%) потоков рассеянного и отраженного от земной поверхности солнечного излучения в зависимости от геометрии наблюдений. Канал 1 AVHRR/NOAA ($\lambda = 0,63$ мкм), rural aerosol (МДВ = 10 км).

отражением солнечного излучения от облачности, пиксель с высокими значениями альbedo первого или второго каналов исключаются из класса "пожар" во всех известных алгоритмах [54]. Интенсивные пожары приводят к значительным выбросам аэрозоля с высокими значениями альbedo. При этом часть пикселей при небольшом ветре не покрыта дымовым шлейфом и проходит тест на альbedo. Большая часть активного пожара покрыта дымовым шлейфом и не детектируется.

Использование высокой вероятности принадлежности "горячих" пикселей с высокими значениями альbedo к классу "пожар" при наличии в некоторой ближайшей окрестности пикселей, с большой вероятностью детектируемых как "пожар", и составляет усовершенствование алгоритма, которое заключается в уменьшении вероятности пропуска "пожара" при сохранении вероятности "ложной тревоги" на прежнем уровне.

Степень повышения вероятности детектирования в условиях задымления значительна. Это объясняется тем, что выигрыш от использования данного признака особенно заметен на крупных очагах горения. Учитывая, что именно такие пожары приводят к 95% всех сгоревших площадей, следует, что эффект от данного признака существенен прежде всего при оценке площади, охваченной крупным пожаром.

Реализация признака близости.

На первом этапе выполняется формирование 3 основных множеств пикселей, характеризующих различные вероятности принадлежности к пожару $\{fireWhite\}$, $\{fire\}$ и $\{fireHot\}$. Формирование множеств пикселей для каждого класса пожара происходит на основании следующих тестов:

1. $fireWhite = \{ (i,j) | (i,j) \in I \ \& \ t3(i,j) > 315 \text{ K} \ \& \ (t3(i,j) - t4(i,j)) > 10 \text{ K} \}$;
2. $fire = \{ (i,j) | (i,j) \in fireWhite \ \& \ b2(i,j) < 25\% \ \& \ (t3(i,j) - t4(i,j)) > 14 \text{ K} \}$;
3. $fireHot = \{ (i,j) | (i,j) \in fire \ \& \ b2(i,j) < 25\% \ \& \ (t4(i,j) - t5(i,j)) < 4,1 \text{ K} \}$.

Уровень порогов для класса "fire" соответствует среднему уровню строгости относительно общего уровня алгоритмов детектирования пожаров [54]. Пиксели, включенные в класс "fireHot", удовлетворяют одному из самых жестких требований относительно общего уровня алгоритмов детектирования пожаров. Большая часть пикселей класса "fireWhite" не будут включена в класс пожаров ни одним из общепринятых алгоритмов детектирования в связи с отсутствием ограничения на альbedo видимого (0,58 – 0,68 мкм) или ближнего инфракрасного (0,725 – 1,1 мкм) канала.

Использование эталонов класса "fireWhite" для детектирования пожаров, пикселей классов "fire" и "fireHot" в ближайшей окрестности с классом "fireWhite".

Таким образом, рассматривается следующая последовательность действий по формированию множества пикселей класса "пожар", учитывающая составную модель пожара и разную априорную вероятность их появления:

1. $fireHot1 = \{ (i,j) | (i,j) \in fireHot \}$.

2. Формирование матриц 8 связанных объектов из изображений-масок "fire", "fireHot" и "fireWhite", с числом 8 связанных объектов $n1$, $n2$ и $n3$. Результатами данной операции являются массивы изображений-масок с условными названиями FIREHOT 8, FIRE 8 и FIREWHITE 8. Операция формирования n -связанных объектов из бинарного массива, состоящего из элементов 0 и 1 размером $m \times n$, единицы меняют свое значение на число, соответствующее номеру n -связанного объекта, которому он принадлежит.

3. Формирование множества точек $\{fireResultMatrix\}$, которые составлены из тех объектов матрицы FIRE 8, чья площадь пересечения с объектами в матрице FIREHOT 8 превышает некоторый порог. Данная операция выполняется за несколько этапов:

- а) для каждого из 8-ми связанных объектов матрицы FIRE 8 найти пересечение 8 связанных объектов матрицы FIREHOT 8, индексы которых поместить в таблицу $T[1...n2]$:

$$T(j) = \{ \text{индексов } i | fireHot8(i) \cap fire8(j) = \emptyset, j = 1...n2, i = 1...n1, \quad (3.7),$$

где операция $fireHot8(k) = \{ (i,j) | fireHot8(i,j) = k \}$;

б) вычислить суммарную площадь объектов в таблице T и результат поместить в таблицу A[1...n2]:

$$A(j) = \sum_{T(i)} S(\text{fireHot8}(i)), j = 1 \dots n2, \quad (3.8),$$

где $S(M)$ является площадью множества M ;

в) из матрицы *FIRE 8* выбрать объекты, площадь которых не более чем в 5 раз превышает площадь пересечения этого объекта с матрицей *FIREHOT 8*:

$$\text{fireresultmatrix} = \{ \text{fire8}(i) | S(\text{fire8}(i)) \leq 3 \times A8(i) \}, i = 1 \dots n2, \quad (3.9).$$

Данный шаг эквивалентен предыдущему, только выполняется для матриц *fireresultmatrix 8* и *FIREWHITE 8*. Матрица *fireresultmatrix 8* получается в результате вычисления 8-ми связанных объектов на матрице *fireresultmatrix*. Таким образом, на данном этапе происходит формирование множества точек *fireresult*, которые составлены из тех объектов матрицы *FIREWHITE 8*, чья площадь пересечения с объектами в матрице *fireresultmatrix 8* превышает некоторый порог. Так как количество пикселей пожара под дымами может значительно превышать площадь открытых от дыма пикселей, используемый на этом шаге порог ослаблен в 2 раза.

Этот алгоритм встроен в систему спутникового мониторинга лесных пожаров федерального уровня.

3.7. Двухшаговый алгоритм на основе потенциальных функций и поверхностей

На первом шаге производится разделение участков потенциальных очагов и других объектов с помощью дискриминантной функции стандартного вида [55]. На втором шаге для дальнейшей детальной обработки используется сложная разделяющая поверхность, предварительно описанная потенциальными функциями с помощью заданной обучающей выборки. При подобной схеме использование первого шага упрощает вид потенциальной функции, применяющейся на втором шаге, что увеличивает ее эффективность и значительно сокращает время вычислений.

Нахождение разделяющей функции на первом шаге проводится на основе анализа спектральных значений потоков излучения в каналах AVHRR очагов пожаров и объектов с похожими спектральными характеристиками, называемых в дальнейшем "ложные очаги" или шумы.

В качестве выборки спектральных характеристик очагов пожаров и шумов использованы данные результатов спутниковых наблюдений заданной территории. Выборка спектральных характеристик шумов дополнена информацией о наиболее характерных случаях наблюдения фоновых объектов (например, облачность с высокими значениями температуры в канале 3 за счет отражения, оптически тонкая и низкая облачность над теплой поверхностью, перегретые участки поверхности земли в зоне сухих степей и пустынь, солнечные блики). В ЦКМ ИСЗФ найдено, что для территории Иркутской области за период 1996 – 1999 гг., территории

Дальнего Востока и южных районов России (в 1998 г.) наилучшим образом решению поставленной задачи соответствуют три разделяющие функции экспоненциального вида (рис. 3.6):

$$1) T_p = a_1 \times \exp(b_1 A_1), \quad (3.10);$$

$$2) T_p = a_2 \times \exp(b_2 A_1), \quad (3.11);$$

$$3) T_p = a_3 \times \exp(b_3 A_1), \quad (3.12).$$

Здесь T_p – температура, определенная соотношением:

$$T_p = F(B_p, v_3), \quad (3.13),$$

где $B_p = V_3 - V_3(T_4)$, V_3 – поток излучения в канале 3 AVHRR, $V_3 = F(T_4, v_3)$ – поток на частоте канала 3, рассчитанный по температуре канала 4 AVHRR, v_3 – волновое число канала 3, F – функция Планка, $a_1 - a_3$ и $b_1 - b_3$ коэффициенты. A_1 – эквивалентное альbedo в канале 1 AVHRR.

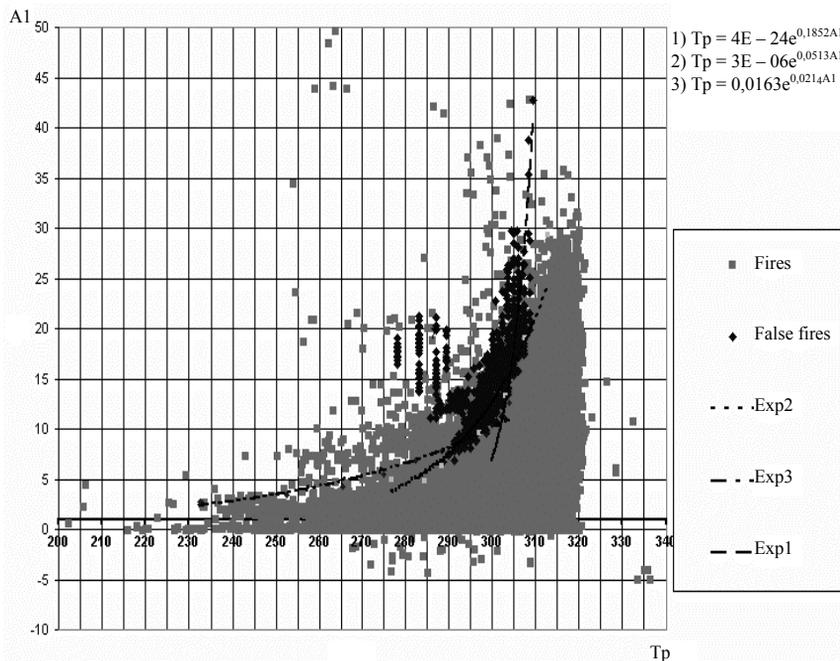


Рис. 3.6. A_1 – характеристика объектов (пожаров) и фонов для Иркутской области (1 за период 1996 – 1999 гг.), территории Дальнего Востока и южных районов России (в 1998 г.)

В качестве дополнительных признаков для выделения зоны потенциальных очагов используются признаки $A_1 < 35$, $T_4 > 265$ – для грубого отделения облачных районов, а $(T_3 - aT_4 - b(T_4 - T_5)) > 4$ – для отделения прогретых участков земной поверхности. Для отделения солнечных бликов используется признак $(A_1 - A_2) < 0$ (только в тех участках, где блики геометрически возможны).

В результате на первом шаге удается отделять от 70 до 100% шумов. При этом потери обнаружения истинных очагов пожаров составляют около 4%. Не разделенными оказываются отдельные участки низких, а следовательно, теплых облаков с малыми значениями оптической толщины (облака типа St и As), малые неоднородности в зоне с температурами поверхности, близкими к температуре насыщения в канале 3.

Пропущенные очаги пожаров соответствуют зонам сложных метеоусловий, характеризующимся наличием тонкой облачности или большого количества дыма, и очень слабым пожарам на низкотемпературном фоне.

На втором шаге обработка осуществляется по методу потенциальных функций. Входными параметрами (признаками) в алгоритме является информация пяти каналов AVHRR, а также контраст в районе потенциальных очагов в каналах 2, 3 и 4. Таким образом, используется восьмимерное пространство признаков. Решающая функция строится по выборке пожаров, определенной оператором, с помощью итеративной "обучающей" процедуры и имеет следующий вид:

$$d(x) = a_1 \exp\{-c\|x-x_1\|^2\} + a_2 \exp\{-c\|x-x_2\|^2\} + \dots + a_k \exp\{-c\|x-x_k\|^2\},$$

где x – распознаваемый образ, x_i , $i = 1, 2, \dots, k$, – образы, определенные в процессе обучения, a_i , $i = 1, 2, \dots, k$, – числовые коэффициенты, равные 1 или -1, в зависимости от того, к какому классу пожаров или иных объектов относится образ x_i , c – положительная числовая константа, а $\|x-x_i\|$ – норма вектора $(x-x_i)$.

Функция $d(x)$ положительна, если образ x – пожар и отрицательна в противном случае.

Таким образом, для объекта "пожар" выполняется условие:

$$d(x) > 0.$$

Оценка точности данного алгоритма осуществлена при сравнении результатов обработки спутниковых данных различными алгоритмами. Для получения количественных характеристик были использованы 26 тестовых кадров AVHRR/NOAA размером 500×500 км. Кадры подбирались с учетом разного физико-географического положения территорий (нижняя Волга, Северный Кавказ, северо-западный район России, Западная и Восточная Сибирь, Якутия и Дальний Восток), различного времени суток (день, ночь) и разных сезонов года в пожароопасный период (весна, лето, осень).

Для этих изображений методом экспертной оценки были выделены пиксели пожаров. Общее количество выделенных пикселей составило 860. Результаты сравнения приведены в табл. 3.2.

Очевидно, что для данной выборки тест-объектов наиболее эффективным является алгоритм на основе потенциальных функций, который характеризуется 6%-ным

Таблица 3.2

Результат сравнения эффективности обнаружения очагов пожаров различными методами

Алгоритмы	Алгоритм на основе потенциальных функций		"Контекстуальный алгоритм" [56]		Многошаговый пороговый алгоритм [57]	
	Количество пикселей	В % к общему количеству	Количество пикселей	В % к общему количеству	Количество пикселей	В % к общему количеству
Характеристика качества работы алгоритма						
Пропуск цели	54	6	246	28	330	38
Ложная тревога	78	9	414	48	94	10

уровнем пропуска цели и 9%-ным уровнем ложных тревог. Вторым по эффективности – многошаговый пороговый алгоритм пропускает на 10% больше целей, чем "контекстуальный", однако его устойчивость к ложным целям почти в пять раз выше.

Кроме того, для фоновых объектов, основным фактором проявления которых является высокое значение радиационной температуры, было найдено регрессионное соотношение, связывающее температуры T_3 , T_4 , T_5 . Оно фактически является дискриминантной функцией, разделяющей класс пожаров и соответствующих шумов в ИК-области спектра, и имеет вид:

$$T_3 = aT_4 + b(T_4 - T_5) + C, \quad (3.14).$$

Из соотношения (3.14) был найден классификационный признак для разделения очагов пожаров и шумов в виде:

$$T_3 - aT_4 - b(T_4 - T_5) > C, \quad (3.15),$$

где $a = 1$, $b = 3$, $C = 4$.

Анализ данных по территории тестовых полигонов показал вполне удовлетворительные результаты разделения классов пожаров и шумов. При этом диапазон значений шумов для неравенства (3.15) – от 4 до 10 – 15, диапазон значений очагов пожаров в этом случае от 0 до 15 и выше. Пересечение классов будет занимать диапазон значений от 0 до 4, что, по данным наблюдений, соответствует слабым очагам малой площади, а также пожарам в стадии их затухания.

Для более эффективного распознавания шумов, основным фактором появления которых служит высокая отражательная способность, был предложен признак, связывающий распределение потока излучения в каналах 3 (B_3) и 1 (B_1) AVHRR, следующего вида:

$$A_i = B_3/B_1, \quad (3.16).$$

Физический смысл данного параметра базируется на том, что отражательная способность в видимой и средней ИК-области для фоновых объектов находится в некоторой корреляционной зависимости. Кроме того, данный признак с высокой эффективностью может использоваться для идентификации дымовых шлейфов, так как наличие дымовых аэрозолей очень сильно влияет на рассеяния излучения в видимой области спектра и практически не влияет в среднем ИК-диапазоне. В результате на изображении признака A_i объекты с высокой отражательной способностью и аэрозольные дымовые шлейфы имеют повышенное значение яркости, очаги пожаров – пониженное. Абсолютное значение параметра A_i для очагов и шумов использовать затруднительно, так как оно варьируется в достаточно широких пределах в зависимости от характеристик прозрачности атмосферы. Поэтому данный признак можно использовать только как визуальный.

3.8. Алгоритм феноменологической модели малоразмерных пожаров [60]

Особенность этого алгоритма прежде всего в том, что он ориентирован на обнаружение малоразмерных очагов пожаров на фоне других источников инфракрасного излучения.

Сложность задачи обнаружения малоразмерных пожаров по данным прибора AVHRR обусловлена не только низкой разрешающей способностью снимков, составляющей в лучшем случае $1,1 \times 1,1 \text{ км}^2$, но и нестационарностью оптико-геометрических условий наблюдения земной поверхности, стохастичностью облачных полей, порождающих артефакты [58, 59]. Алгоритм базируется на построении признаковов пространств нелинейным преобразованием исходного описания, в котором решающее правило обнаружения имеет наиболее простой вид.

Схема вывода решающего правила следующая. Рассматривается задача обнаружения тепловых аномалий в случае, когда апертура сканирующего устройства регистрирует элемент ППЗ $1,1 \times 1,1 \text{ км}^2$ лишь частично занятым пожаром. Формируемая при этом радиационная температура соответствующего пиксела состоит из температуры фона и температуры горячего участка, которые пропорциональны их площадям.

Для обнаружения горячих участков поверхности в пределах апертуры сканирующего устройства используется изменение соотношения интенсивностей между 3-м, 4-м и 5-м каналами. При этом исходят из следующих очевидных соображений. Допустим, что на некотором участке площадью S , соответствующий углу зрения радиометра, и температурой T_0 есть горячий участок площадью S_1 и температурой T_1 . Считаем, что как холодная, так и горячая области соответствуют модели излучения черного тела. В этом случае интенсивность излучения есть взвешенная сумма интенсивностей холодного и горячего участков, определяемых по формуле Планка:

$$I(\nu) = \alpha \cdot \frac{C_1 \cdot \nu^3}{\exp(C_2 \cdot \nu/T_0) - 1} + \beta \cdot \frac{C_1 \cdot \nu^3}{\exp(C_2 \cdot \nu/T_1) - 1}, \quad (3.17)$$

где $\alpha = \frac{S - S_1}{S}$; $\beta = \frac{S_1}{S}$ весовые коэффициенты, $C_1 = 1,1910659 \times 10^{-5} \text{ мВт}(\text{м}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{см}^4)$, $C_2 = 1,438833 \text{ см} \cdot \text{К}$.

График зависимости излучения от частоты для температур $T_0 = 273$ К, $T_1 = 1273$ К и $S_1/S = 0,006$ приведен на рис. 3.7.

Для того чтобы привести интенсивности в разных канала к одному масштабу величин, вводятся нормирующие коэффициенты C_3 , C_5 , равные

$$C_3 = I_4(323)/I_3(323),$$

$$C_5 = 0,845 \cdot I_4(323)/I_5(323),$$

где $I_3(323)$, $I_4(323)$ и $I_5(323)$ – интенсивности 3-го, 4-го и 5-го каналов при температуре 323 К, рассчитанные по спектральным характеристикам радиометров.

Далее формируются следующие величины:

$$R = 50 \cdot \left(1 - \frac{C_5 \cdot I_5}{I_4}\right); \quad G = 5 \cdot \frac{C_5 \cdot I_5}{I_4}; \quad B = \frac{C_3 \cdot I_3}{I_4},$$

которые образуют некоторое многообразие трехмерного пространства. В пространстве RGB переходят в плоскость (x,y) , проходящую через единичные точки введенной системы координат, т. е. находится точка пересечения вектора (R,G,B) и плоскости, проходящей через точки $(1,0,0)$ $(0,1,0)$ $(0,0,1)$.

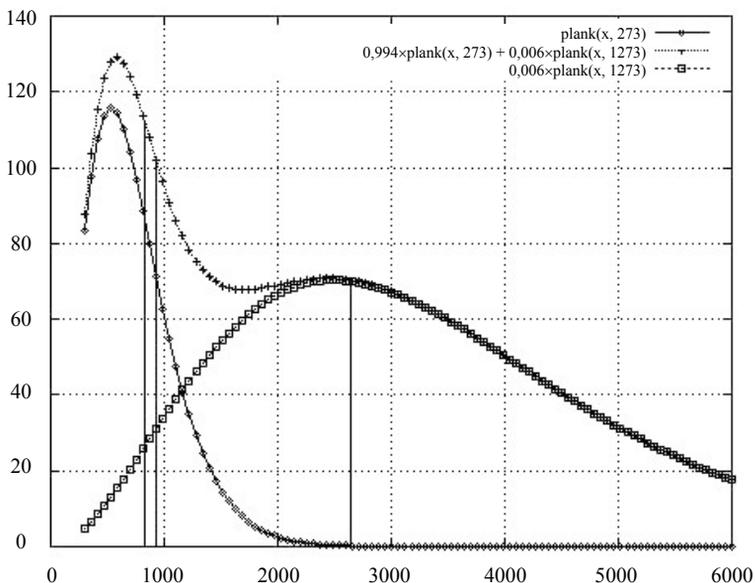


Рис. 3.7. Графики зависимости излучения от частоты для температур T_0 , T_1

Пусть

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}, \quad \text{тогда}$$

$$x = \frac{b-g}{\sqrt{2}}, \quad y = \frac{3 \cdot r - 1}{\sqrt{6}}, \quad (3.18).$$

В плоскости (x,y) формируется решающее правило, исходя из следующих соображений:

- при отсутствии горячих участков точки (x,y) , порождаемые преобразованными значениями радиационных температур каналов 3 – 5, ложатся на некоторую кривую, которую назовем базовой;

- при появлении горячего участка в зависимости от его размеров соответствующая точка смещается вправо вниз.

Примеры соответствующих кривых для вариаций температур фона от $T = -30^\circ\text{C}$ до $T = +50^\circ\text{C}$ приведены на рис. 3.8.

Кривые рассчитаны для спутника NOAA-14 при температуре горячего участка 773 К (500°C) и вкладах горячего участка (в относительных площадях) 0,0001, 0,0003 и 0,0005. Для приборов AVHRR спутников серии NOAA это соответствует линейным размерам горячего участка примерно 10, 17 и 22 м² соответственно в точке надира. К сожалению, эффективность такого решающего правила недостаточно высока ввиду часто возникающих бликов, которые воспринимаются как пожары.

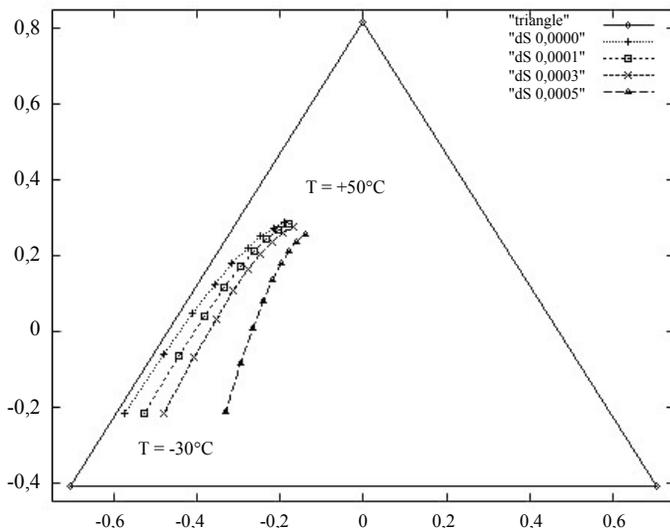


Рис. 3.8. Плоскость RGB признакового пространства для обнаружения тепловых аномалий

Одним из факторов, приводящих к ложному определению горячих участков в дневное время, является рассеяние солнечной радиации на облаках. Оценка рассеянного солнечного излучения представляется в виде некоторой аддитивной добавки:

$$I_3 = I_{3c}(T_4) + \Delta I,$$

где I_3 – интенсивность в 3-м канале, $I_{3c}T_4$ – интенсивность, рассчитанная по температуре 4-го канала, ΔI – добавка, вызванная рассеянным солнечным излучением.

Интенсивность солнечной добавки записывается как функция от альбедо в первом канале и разности температур в 4-м и 5-м каналах следующим образом:

$$\Delta I = f(A_1)[1 + k_{45}(T_4 - T_5)], \quad (3.19),$$

где $f(A_1)$ – зависимость ΔI от альбедо в первом канале, k_{45} – коэффициент связи ΔI с разностью температур в 4-м и 5-м каналах.

Поскольку однозначной зависимости солнечной добавки от альбедо в первом канале и от разности температур в 4-м и 5-м каналах выявить не удастся, оценка входящих в уравнение неизвестных величин делается по некоторой окрестности анализируемой точки.

Сначала оценивается коэффициент k_{45} . Для этого по данным 1-го, 4-го, 5-го каналов выделенного фрагмента строится таблица зависимости ΔI от разности температур и альбедо в первом канале с шагом по альбедо 1% и по температуре 0,5 градуса. Предполагается, что сформированная таблица имеет n значений альбедо и m значений разности температур. Используя эту таблицу, осуществляется оценка коэффициента k_{45} методом наименьших квадратов для тех значений альбедо, для которых существуют значения в достаточно протяженном диапазоне разности температур:

$$\begin{aligned} \Delta I &= I_3 - I_{3c}(T_4), & \Delta I &= K_{45j}(T_4 - T_5) + \Delta I_0, \\ \frac{\Delta I}{\Delta I_0} &= \frac{K_{45j}}{\Delta I_0} \Delta T + 1, & \frac{\Delta I}{\Delta I_0} &= k_{45j} \Delta T + 1. \end{aligned}$$

Для каждого столбца таблицы вычисляется коэффициент:

$$k_{45j} = \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta T_i \Delta I_i - \sum_{i=1}^n \Delta T_i \sum_{i=1}^n \Delta I_i}{\sum_{i=1}^n \Delta I_i \sum_{i=1}^n \Delta T_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta T_i \right)^2}, \quad j = 1, \dots, m, \quad (3.20).$$

После усреднения:

$$k_{45} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m k_{45j}, \quad (3.21).$$

Оценка функции $f(A_I)$ производится по двумерной гистограмме нормированной интенсивности солнечной дымки $h(A_I, \Delta I)$, при этом диапазоны ее значений и альbedo разбиваются на 100 равных интервалов. Далее определяется минимальное $\Delta I_{\min j}$ и максимальное $\Delta I_{\max j}$ значение ΔI для каждого интервала альbedo $j = 1, \dots, m$, по которым вычисляются нормирующие коэффициенты:

$$k_{ij} = \frac{100}{\Delta I_{\max j} - \Delta I_{\min j}}.$$

На следующем шаге для каждого интервала альbedo вычисляется нормированная добавка с учетом ранее определенной зависимости от разности температур в четвертом и пятом каналах:

$$\begin{aligned} \Delta I_j &= I_3 - I_{3c}(T_4), \\ \Delta I_{ij} &= k_{ij} \left(\frac{\Delta I_j}{1 + k_{45}(T_4 - T_5)} - \Delta I_{\min j} \right), j = 1, \dots, m, \end{aligned} \quad (3.22).$$

По полученным значениям ΔI_r и значениям альbedo в первом канале A_I строится двумерная гистограмма $h(A_I, \Delta I_r)$, по которой определяются значения $\Delta I_{rj0,85}$ по уровню 0,85 и среднеквадратичное отклонение σ_j интенсивности солнечной дымки ΔI_{rj} для каждого интервала альbedo. По полученным значениям строится функция зависимости ΔI от альbedo в первом канале, полагая $A_I = j$:

$$f(A_I) = \Delta I_{\min j} + \frac{\Delta I_{rj0,85} + \sigma_j}{k_{rj}}.$$

Промежуточные значения получают с помощью линейной интерполяции. Далее производится коррекция интенсивности 3-го канала с помощью полученной оценки:

$$I_{3k} = I_3 - f(A_I)[1 + k_{45}(T_4 - T_5)], \quad (3.23)$$

и осуществляется анализ на наличие горячей точки с помощью описанного выше решающего правила.

Этот алгоритм действует (одновременно с пороговым) в Томском центре спутникового мониторинга лесных пожаров (ИОА СО РАН) с 1999 г. Он реализован в виде консольного приложения под Windows 95. Входными данными являются файл формата HRPT, получаемый с помощью приложения SX Receiver станции SCANEX, и файл орбитальных элементов NORAD-TLE. То есть исходными данными являются пятиканальные данные приборов AVHRR, поставляемые в виде изображений спутниками серии NOAA примерно 4 – 5 раз в сутки для территории Томской области.

Работа алгоритма обнаружения осуществляется в автоматическом режиме. Результаты анализа в виде ВМР-изображения региона с выделенными тепловыми аномалиями и цветовой индикацией температурных градаций пожаров записываются на диск. Сопровождающий текстовый файл содержит информацию о широте и долготе каждой из обнаруженных аномалий, количестве пикселей, занимаемых пожаром, и значением его температурной мощности. Информация по обнаруженным пожарам в оперативном режиме мониторинга передается службам лесоохраны территории Томской области [61, 62]. Эффективность обнаружения пожаров с помощью этого алгоритма остается выше порогового и выше, чем это делает опытный оператор.

3.9. Эффективность применения порогового алгоритма в спутниковом мониторинге лесных пожаров на территории Якутии

Якутия занимает обширное географическое пространство на северо-востоке России, ее площадь вместе с Новосибирскими островами в Северном Ледовитом океане равна 3103,2 км², что составляет около пятой части площади России. Для наглядности можно отметить, что размеры Якутии превышают размеры вместе взятых таких европейских стран, как Франция, Австрия, Италия, Англия, Швеция, Финляндия и Греция.

Климат в этой части Сибири резко континентальный с характерным коротким жарким летом, сменяющимся продолжительной и холодной зимой (годовые колебания температуры могут превышать 100°C), межсезонье – скоротечное. Якутия находится в зоне вечномерзлых пород, мощность которых составляет от десятков до сотен метров. Распределение осадков в году крайне неравномерное, наибольшее их количество наблюдается в июле-августе, весенний период, как правило, засушлив. Такой неблагоприятный режим осадков в условиях отсутствия вечной мерзлоты должен был привести к опустыниванию всей Якутии, и только за счет вечномерзлых пород в летний период осуществляется подпитка грунтовых вод и растительности.

Основной лесообразующей породой в Якутии является лиственница даурская, которая занимает большую часть покрытой лесом площади. Северные районы заняты редкостойными лиственничными лесами, которые южнее сменяются средними и южно-таежными лесами, где наряду с даурской лиственницей появляются береза, сосна, ель, а на самом юге – кедр, пихта.

Малоснежная зима, засушливая весна и быстрый сход снежного покрова во многом определяют высокую пожароопасность и благоприятствуют возникновению многочисленных очагов лесных пожаров с окончанием зимы. Обычно, начиная уже с мая, на территории Якутии регистрируются первые очаги пожаров, которые, как правило, являются следствием неосторожного обращения с огнем при проведении палов на сенокосных угодьях, разведении костров рыбаками и охотниками. В отсутствие соответствующих противопожарных действий и при жаркой погоде мелкие очаги стремительно перерастают в крупномасштабные лесные пожары, потушить которые способны только проливные дожди во второй половине лета. В такой ситуации работа служб пожарной охраны сводится к защите населенных пунктов, промышленных и магистральных объектов.

Безусловно, эффективность борьбы с лесными пожарами во многом зависит от своевременности их обнаружения. Для небольших площадей эта задача может быть решена, при условии достаточного финансирования, путем частого авиатрулирования или разветвленной сети пунктов наземного наблюдения. Однако для контролирования обширных площадей, таких, как территория Якутии, лесопокрываемость которой составляет более 125 млн га, этих мер явно недостаточно. Чтобы обеспечить надежный оперативный лесопожарный мониторинг при таких обстоятельствах, необходимо применение современных спутниковых технологий детектирования пожаров, обеспечивающих высокую повторяемость и широту обзора.

На базе станции спутникового приема СКАНОР, установленного в ИКФИА СО РАН (Якутск) в 1994 г., организована система оперативного мониторинга лесных пожаров на территории Якутии по данным спутников NOAA. Якутский приемный комплекс СКАНОР был изготовлен в МНИТЦ "СКАН" и является одной из станций опытной серии, размещенных в России (Москве, Иркутске, Якутске) в первой половине 90-х годов прошлого столетия. Программное обеспечение к ней разработано и поддерживается специалистами из ИКИ РАН. За время эксплуатации станции создан цифровой архив данных HRPT-телеметрии, обновляемый по мере получения спутниковых данных. Результаты проводимых в ИКФИА СО РАН работ по тематике дистанционного зондирования опубликованы в [63 – 73].

Детектирование очагов пожаров осуществляется с помощью автоматизированного порогового алгоритма, разработанного в ИСЦФ СО РАН. Для оценки эффективности обнаружения очагов лесных пожаров по данным спутников NOAA проводилось сопоставление с официальными данными Якутской авиационной базы охраны лесов. Сопоставление проводилось по данным, полученным в 1998 г. за периоды 1 – 30 июня и 1 – 5 августа. Результаты приведены в табл. 3.3 [70].

Как следует из табл. 3.3, крупные очаги пожаров размером более 100 га обнаруживаются практически всегда, даже сильная задымленность или экранирующая облачность не являются помехой для их детектирования. С уменьшением площади очагов на вероятность обнаружения начинают заметно влиять облачность, задымленность, не оптимальные условия съемок (время суток, время пролета спутника, орбита спутника и т. д.). Пожары площадью 10 – 100 га обнаруживаются с вероятностью 0,7, – менее 1 га обнаруживаются в 20% случаев, площадью 1 – 10 га – в 40% случаев.

Необходимо отметить, что только за июнь 1998 г. по данным спутников NOAA дополнительно обнаружено 117 очагов, незарегистрированных в сводках Авиалеосохраны, возможно, по причине того, что большинство из них располагалось на краю зон авиатрулирования (около 60%). Кроме того, на неохраняемой территории, площадь которой составляет более половины Якутии, за указанный период было обнаружено свыше 220 очагов лесных пожаров. Следует подчеркнуть, что в настоящее время оперативную информацию о лесопожарной обстановке на неохраняемых территориях можно получить только по спутниковым данным.

Система оперативного спутникового мониторинга лесных пожаров в Якутии (так же, как и во всех центрах России) на время пожароопасного периода переводится в патрульный режим – прием данных со спутников ведется в течение светлого времени суток, без выходных дней. Технологическая цепочка от приема данных до размещения карт лесных пожаров в целом автоматизирована, участие оператора требуется лишь на отдельных участках.

Таблица 3.3

Характеристика работы системы спутникового мониторинга в г. Якутск (ИКФИА), 1998 г.

Площадь пожара, га		менее 1	1 – 10	10 – 100	более 100	Итого
Обнаружено Авиалесоохраной		52	56	29	21	158
Из них обнаружено по данным спутников NOAA		10	22	21	21	74
Вероятность обнаружения		0,2	0,4	0,7	1,0	0,5
Сильная облачность и/или задымленность		21	21	6	0	48
Очаги пожаров, не обнаруженных по данным NOAA, возможно по причине	Очаг находится на краю полосы обзора спутника	4	7	2	0	13
	Отсутствие спутниковых данных на момент пожара	17	6	0	0	23
Всего не обнаружено		42	34	8	0	84
Обнаружено по данным NOAA раньше, чем службами Авиалесоохраны	Более чем на сутки	1	5	9	7	22
	Менее чем на сутки	3	6	3	5	17
	Всего	4	11	12	12	39

Обнаруженные очаги пожаров накладываются в ГИС-среде ArcView на цифровую карту миллионного масштаба, на которую также накладываются границы авиаотделений Якутской базы авиалесоохраны, что качественно повышает уровень информативности полученной по спутниковым данным карты лесных пожаров. На рис. 3.9, 3.10, 3.11 (см. цв. вкладку) приведены примеры таких карт, построенных для Центральной Якутии и Национального природного парка "Ленские столбы". Причем в случае лесопожарного мониторинга территории НПП на карту накладывается квартальная сетка лесоустройства. Последнее обстоятельство позволяет при наличии лесной кадастровой информации оперативно оценить степень возможного ущерба от лесных пожаров.

3.10. Вероятностный алгоритм обнаружения и энергетической диагностики лесных пожаров спутниковыми средствами

Процесс возникновения пожара можно рассматривать как случайный процесс, который подчиняется вероятностным законам. Тогда вероятность его обнаружения можно записать так [8]:

$$P_{об} = P_{в} \times P_{р},$$

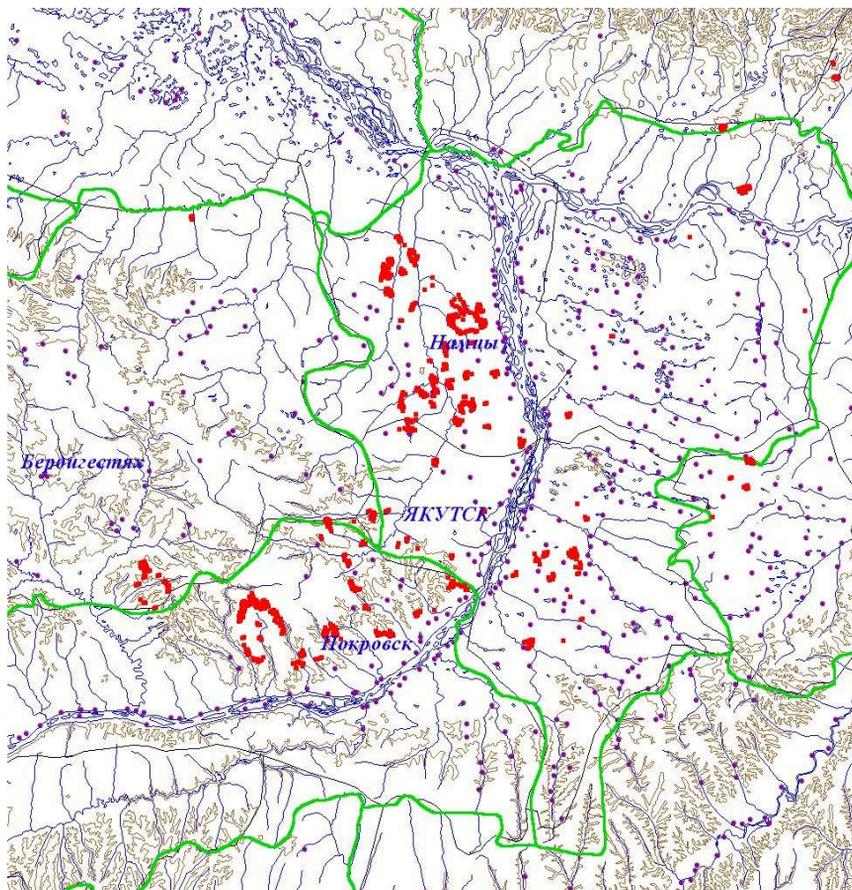


Рис. 3.9. Карта очагов лесных пожаров (окрашены в красный цвет), обнаруженных 01.07.2002 г. по данным NOAA12 на территории Якутского, Покровского и Бердигестяхского авиаотделений (границы а/о показаны зеленым цветом). Многочисленными сиреневыми точками показаны населенные пункты, гидросеть нанесена синим, а рельеф – светло-коричневым цветом

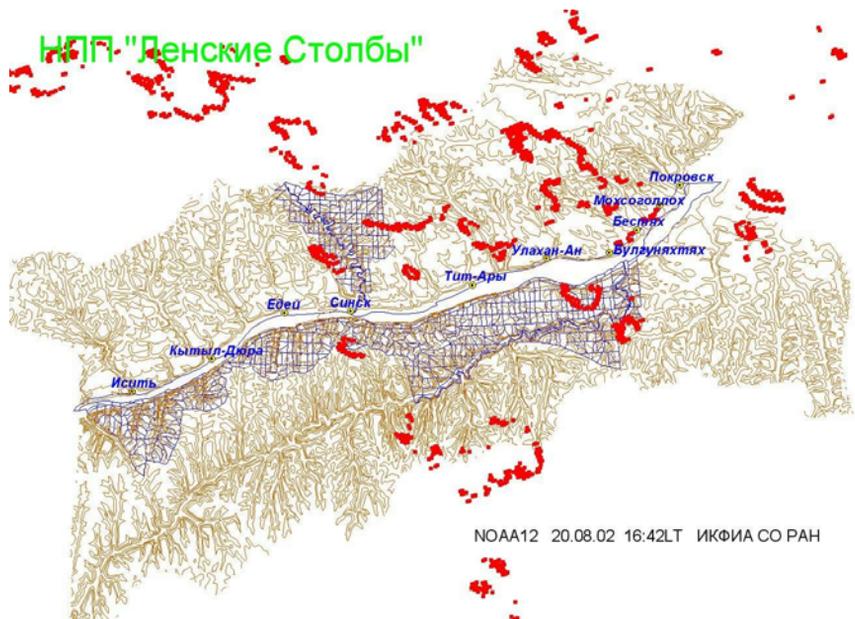


Рис. 3.10. Карта лесных пожаров, обнаруженных 20 июля 2002 г. с NOAA12 в 16:46 LT на территории НПП "Ленские столбы" и в ее окрестностях. Очаги пожаров окрашены красным цветом, рельеф – светло-коричневым, квартальная сеть лесоустройства на территории природного парка – синим

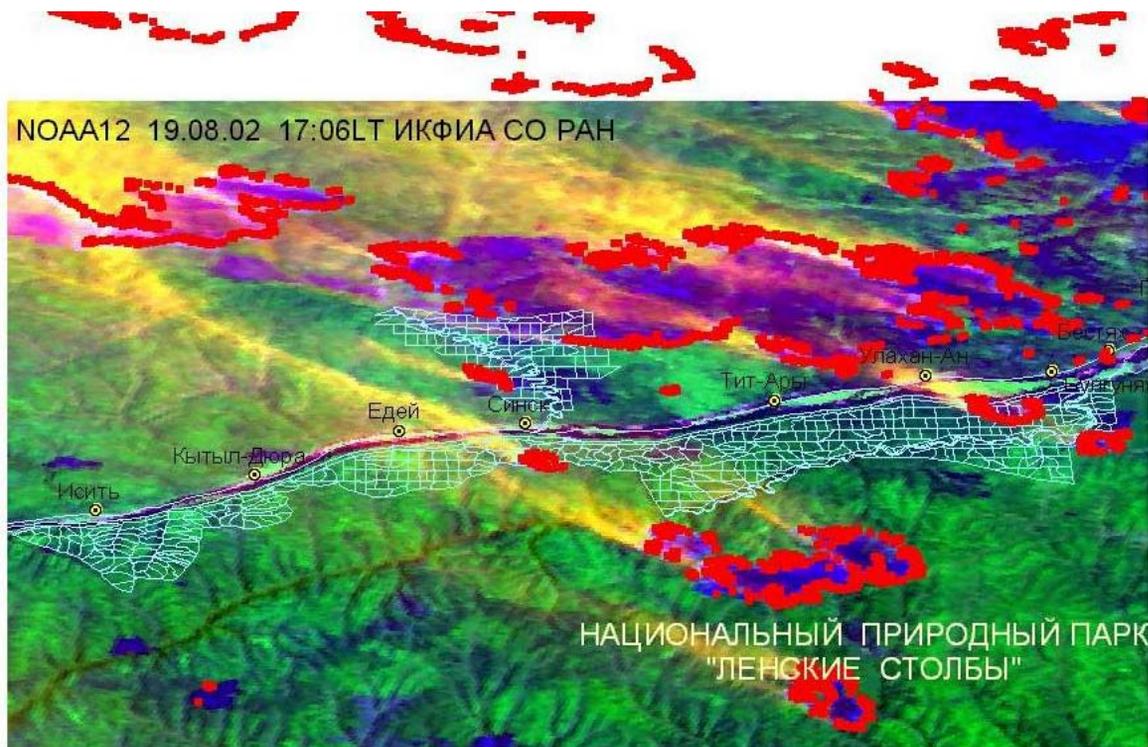


Рис. 3.11. Пример отображения на Интернет-сервере ИКФИА СО РАН карты лесных пожаров с растровой подложкой – спутниковым снимком

где $P_b = P_c \times P_{\pi}$, P_b – вероятность возникновения, P_c – вероятность состояния пожарной зрелости лесных горючих материалов, P_{π} – вероятность появления источников загорания, P_p – вероятность распознавания, зависящая от параметров оптики, характеристик приемника излучения, интенсивности пожара, экранирования его (если это низовой пожар) кронами деревьев, атмосферной дымкой, облаками и т. п.

Обнаружение объектов на фоне случайных шумов является хорошо изученным процессом. Экспериментальными исследованиями установлено, что вероятность обнаружения является однозначной функцией отношения сигнала к шуму (S/N). Полученные зависимости вероятности обнаружения от отношения S/N описываются интегральным законом распределения гауссовой плотности вероятности обнаружения [74]:

$$P_{об}(S/N) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{S/N-\mu} \exp\left(-\xi^2/(2 \cdot \sigma^2)\right) d\xi, \quad (3.24)$$

В рассматриваемой задаче, следуя [74], можно принять среднее $\mu \approx 3,2$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma \approx 1$, тогда

$$P_o(S/N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{S/N} e^{-0,5(\xi-3,2)^2} d\xi, \quad (3.25)$$

Rosell и Wilson в [75] аппроксимировали это выражение для (S/N) > 1 как:

$$P_o(S/N) \approx 1 - \exp\left\{-0,15 \cdot [(S/N) - 1]^2\right\}, \quad (3.26)$$

Использование приближенной формулы (3.26) вносит небольшую погрешность в вычисления вероятности обнаружения объектов, в том числе лесных пожаров [74].

К числу факторов, определяющих отношение S/N, относятся [74]:

- пространственно-частотные характеристики подстилающей поверхности и пожаров для рассматриваемого типа аппаратуры;
- коэффициент, учитывающий интегрирующие свойства глаза оператора-дешифровщика или прибора, регистрирующего изображение;
- суммарная степень затененности пожаров при изменении азимутального угла и угла визирования;
- коэффициент пропускания атмосферы в направлении на пожар;
- коэффициент задымленности атмосферы.

Однако оценка вероятности обнаружения пожаров в инфракрасном, а именно тепловом, диапазоне спектра, дополнительно требует оценки термодинамических и излучательных характеристик пожаров и прилегающих фонов, коэффициентов пропускания излучения пологом древостоя и атмосферой в направлении визирования на объект, а также оптико-электронных характеристик аппаратуры зондирования.

Известно, что спектральная облученность приемного устройства от "точечного" источника, угловые размеры которой меньше мгновенного поля зрения, равна [76].

$$q(\lambda) = W_{\text{tag}}(\lambda) \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_f / D^2, \quad (3.27),$$

где $W_{\text{tag}}(\lambda)$ – спектральная мощность излучения источника в единичном телесном угле, Вт/стер-мкм;

$\tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания трассы на участке атмосферы длиной D , равной расстоянию между пожаром и приемником излучения;

τ_f – коэффициент прозрачности полого древостоя, зависящий от угла визирования объекта.

Спектральная мощность облучения приемного устройства тогда выразится в виде:

$$W_o(\lambda) = q(\lambda) \cdot S_o \cdot \tau_o(\lambda), \quad (3.28).$$

где S_o – площадь входного зрачка оптической системы; $\tau_o(\lambda)$ – коэффициент спектрального пропускания входной оптической системы (защитные стекла, основная оптика – линзы, зеркала; отсекающие фильтры, модуляционные растры и т. д.).

Напряжение сигнала с приемника излучения равно:

$$U_s = W_o(\lambda) \cdot \Phi_s(l), \quad (3.29),$$

где $\Phi_s(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника, В-стер-мкм/Вт.

Поскольку в 3-м канале прибора AVHRR детектируется излучение в спектральном диапазоне (3,55 – 3,93 мкм), то необходимо все характеристики излучения (3.27 – 3.29) проинтегрировать в этом диапазоне.

Отсюда напряжение сигнала в интегральном виде выражается как:

$$U_s = \frac{S_o}{D^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\text{tag}}(\lambda) \cdot \tau_f \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \Phi_s(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (3.30).$$

Принимая среднеквадратичную величину шума приемника U_n , как паспортную величину, получим величину отношения сигнал/шум (S/N) в виде:

$$U_s / U_n = S/N = \frac{S_o}{D^2 \cdot U_n} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\text{tag}}(\lambda) \cdot \tau_f \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot \Phi_s(\lambda) \cdot d\lambda, \quad (3.31).$$

Уравнение (3.31) не решается в явном виде относительно дальности обнаружения D , поскольку функция пропускания атмосферы $\tau_a(\lambda)$ зависит как от длины волны λ , так и от дальности D .

Для решения подобных задач обычно применяется метод эквивалентной шумовой полосы частот Δf_s , но для оценочных расчетов достаточно принять метод средних оценок W_{tag} , τ_f , τ_a , τ_o , Φ_s в заданном спектральном интервале $\lambda_1 - \lambda_2$. Этот метод предполагает прямоугольную полосу пропускания атмосферы в диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$ и равенство $\tau_a = \theta$ за ее границами, т. е. принимается средний коэффициент

пропускания атмосферы для предполагаемой трассы D при заданном диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$. В этом случае τ_a находится по таблицам слоя осажденной воды, соответствующего заданной дальности и состоянию атмосферы.

Поскольку установлено, что функции W_{tag} , τ_o , Φ_s изменяются плавно, это позволяет уравнение (3.31) относительно D выразить в виде:

$$D = \sqrt{\frac{S_0 \cdot W_{tag} \cdot \tau_f \cdot \tau_a \cdot \tau_o \cdot \Phi_s}{U_n \cdot (S/N)}}, \quad (3.32).$$

Чувствительность приемника обычно выражают через его удельную обнаружительную способность D^* :

$$\Phi = U_n \cdot D^* / (\delta \cdot \Delta f)^{0.5}, \quad (3.33),$$

где δ – величина площадки приемника, м²; Δf – ширина полосы частот, эквивалентная шуму приемника, Гц.

$D^* = (\delta \cdot \Delta f)^{0.5} / P_{lim}$ – удельная обнаружительная способность, м·Гц^{0.5}/Вт,

где $P_{lim} = q \cdot \delta / (C/Ш)$ – пороговая чувствительность приемника, эквивалентная мощности шума, Вт; $D = l/P$ – обнаружительная способность приемника, Вт⁻¹.

Так как $\Phi_s = U_n / q \cdot \delta$, то можно получить соотношение (3.33):

$$\Phi_s = \frac{U_n}{q \cdot \delta} = \frac{U_n}{P_{lim}} = \frac{U_n \cdot (\delta \cdot \Delta f)^{0.5}}{P_{lim} \cdot (\delta \cdot \Delta f)^{0.5}} = \frac{U_n \cdot D^*}{\delta \cdot \Delta f^{0.5}}.$$

Если мгновенный угол зрения сканирующей системы равен β стер, то площадь приемника выражается формулой:

$$\delta = (\beta \cdot F)^2, \quad (3.34),$$

где F – эквивалентное фокусное расстояние оптики. Обычно характеристику системы выражают числовой апертурой NA :

$$NA = d_o / 2F, \quad (3.35),$$

где d_o – диаметр входного зрачка системы, выраженный из соотношения $S = \pi \cdot d_o^2 / 4$.

Таким образом, выражение для максимальной дальности обнаружения (9) с учетом (10), (11), (12) запишется в виде:

$$D = \sqrt{\frac{\pi \cdot d_o^2 \cdot W_{tag} \cdot \tau_f \cdot \tau_a \cdot \tau_o \cdot U_n \cdot D^*}{4 \cdot U_n \cdot \beta \cdot (F^2 \cdot \Delta f)^{0.5}}} \quad \text{или}$$

$$D = \sqrt{\frac{(W_{\text{tag}} \cdot \tau_f \cdot \tau_a) \cdot (0,5 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot NA \cdot \tau_o) \cdot D^*}{\beta \cdot \sqrt{\Delta f} \cdot S/N}}, \quad (3.36),$$

$$D = (W_{\text{tag}} \cdot \tau_f \cdot \tau_a)^{0,5} (0,5 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot NA \cdot \tau_o)^{0,5} (D^*)^{0,5} [\beta \cdot (\Delta f)^{0,5} (C/\text{Ш})]^{-0,5}.$$

В формуле (3.36) подкоренное выражение представляет собой произведение четырех групп сомножителей:

$W_{\text{tag}} \cdot \tau_f \cdot \tau_a$ – характеризует мощность излучения пожара и пропускание излучения пологом древостоя и атмосферой;

$0,5 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot NA \cdot \tau_o$ – представляет паспортные характеристики оптической системы;

D^* – описывает характеристики приемника через его удельную обнаружительную способность;

$\beta \cdot (\Delta f)^{0,5} (S/N)$ – угловая разрешающая способность сканера и характеристики электронного тракта.

Следует заметить, что мощность излучения объекта в единичном телесном угле выражается формулой:

$$W_{\text{tag}} = (1/\pi) \cdot q_{\text{tag}} \cdot S_{\text{tag}} = (1/\pi) \cdot k(\lambda) \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\text{tag}}^4 \cdot S_{\text{tag}}, \quad (3.37),$$

где S_{tag} – площадь высокотемпературной зоны (ВТЗ) объекта;

T_{tag} – температура излучающей поверхности, К;

ε – коэффициент излучения, при этом $\sigma = 5,67 \cdot 10^{12}$ Вт·стер/(см²·К⁴);

$k(\lambda) = 0,266$ – коэффициент, учитывающий ограничение потока излучения в диапазоне 3 – 5 мкм.

Вероятность обнаружения ЛП можно найти из формулы (3.26) подставив соотношение S/N , выраженное из уравнения дальности обнаружения:

$$C/\text{Ш} = (W_{\text{tag}} \cdot \tau_f \cdot \tau_a)^{0,5} (0,5 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot NA \cdot \tau_o)^{0,5} (D^*)^{0,5} [\beta \cdot (\Delta f)^{0,5} \cdot D]^{-0,5}, \quad (3.38).$$

Уравнения (3.24 – 3.31) полезны для разработки инструментов обнаружения и дистанционной энергетической диагностики лесного пожара. Так, используя эти формулы, мы можем вычислить вероятность обнаружения пожара в зависимости от площади высокотемпературной зоны для различных коэффициентов прозрачности полога и атмосферы (рис. 3.12, см. цв. вкладку).

Однако, поскольку параметры пожаров, атмосферы и лесного покрова неизвестны в процессе обнаружения, можно, например, оценивать отношение (S/N) из температурных пространственных распределений, которые можно оценить, используя данные в каналах 3 и 4 прибора AVHRR.

Напомним, что в отношении (S/N) под "сигналом" (S) понимают энергетические характеристики инфракрасного излучения, источник которого – лесной пожар, а под "шумом" понимают энергетические характеристики излучения, источник которого – поверхности лесного покрова, степи, воды, облаков и т. п. То есть при этом мы пренебрегаем аппаратным шумом сканирующего устройства по сравнению с изменениями температуры фона.

Вероятность обнаружения

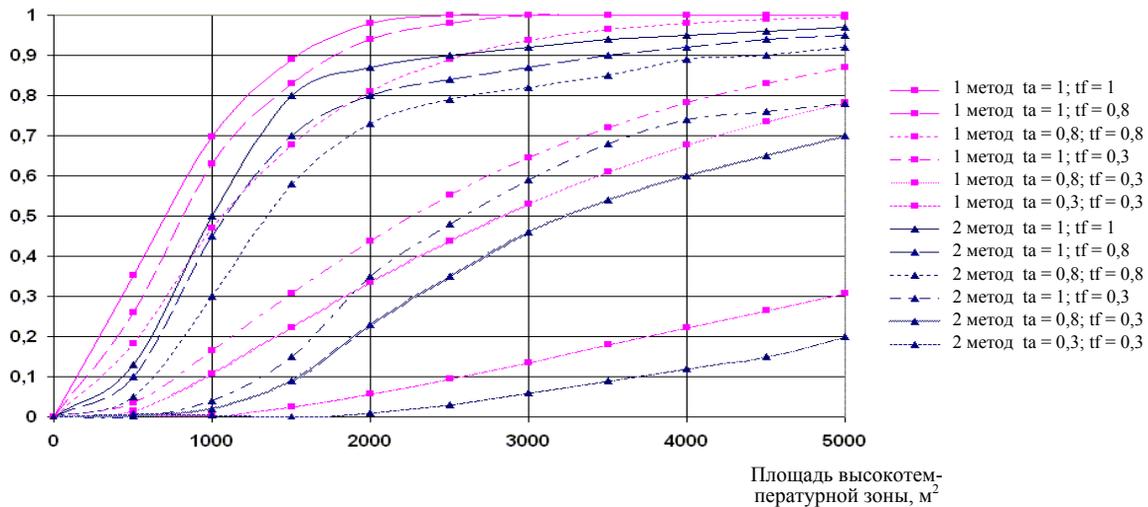


Рис. 3.12. График зависимости вероятности обнаружения пожара от площади высокотемпературной зоны для $T = 700$ К

На рис. 3.13 представлен фрагмент-строка скана записи измеряемых ИК-потоков излучения (в 3-м, 4-м и 5-м каналах), проходящей через три "малых" и один "большой" пожар. Наблюдения осуществлялись при средней температуре фона 29,4°C и дисперсии 3,7°C. При этих условиях (S/N) = 2,92 для первого пожара, (S/N) = 546 для второго, 3,84 для третьего. Из (3.26) следует, что вероятности обнаружения равны 0,42, 0,95, и 0,70 для каждого пожара соответственно.

"Большой" пожар занимал в строке изображения 11 пикселей, в каждом из которых значения (S/N) равны 5,46; 5,46; 4,6; 4,93; 4,8; 5,12; 5,46; 3,35; 5,46; 5,46, при этом вероятность обнаружения пожара в пикселях изменяется от 0,57 до 0,95.

К сожалению, характеристики сканирующего радиометра AVHRR таковы, что при 49,6°C происходит насыщение приемника инфракрасного излучения в 3-м канале и поэтому невозможно с приемлемой точностью оценить (S/N) для пожаров с высокой интенсивностью.

Можно считать, следуя [75], что вероятность возникновения пожара (с точки зрения статистики) и вероятность его обнаружения – понятия тесно связанные. Предположим, что изменение температуры фона T_3 в канале 3 AVHRR подчиняется нормальному распределению Гаусса, а все объекты фона, которые имеют температуры, превышающие $T_{3\bar{b}} = \bar{T}_3 + \sigma$, обнаруживаются с вероятностью 0,68 и более, т. е. все высокотемпературные пики в канале 3 AVHRR, превышающие это пороговое значение, соответствуют высокотемпературным объектам (как правило, пожарам), которые обнаруживаются с вероятностью не менее, чем 0,68.

Тогда можем определить порог для обнаружения пожара как:

$$T_{3f} \geq \bar{T}_3 + 2\sigma.$$

В этом случае вероятность обнаружения равна 0,95 и более.

Тогда для различных значений σ получим следующие вероятности обнаружения пожара (табл. 3.4).

Однако, если использовать только один названный критерий обнаружения пожара, возникает проблема ложных тревог, т. е. проблема распознавания пожара с фоновыми "горячими" объектами (солнечные блики от облаков, воды и др.), поскольку в спектральном диапазоне 3-го канала AVHRR доля отраженной солнечной радиации достаточно велика и может достигать 30% и более в зависимости от индикатрисы рассеяния аэрозолей в атмосфере и спектральных и угловых коэффициентов отражения от элементов поверхности.

Как уже ранее отмечалось, для идентификации отраженных бликов часто используют разность $\Delta T_{3-4} = T_3 - T_4$ радиационных температур в третьем и четвертом каналах. На рис. 3.14 (см. цв. вкладку) приведен пример распределения пожаров и объектов фона в координатах ΔT_{3-4} и T_4 . Данные, представленные на этом рисунке, получены в Институте леса им. В.Н. Сукачева СО РАН и соответствуют пожароопасному сезону 1999 г.

Таблица 3.4

Вероятность обнаружения очага пожара при заданном значении σ

σ	1,0 σ	1,5 σ	2,0 σ	3,0 σ
$P_{\text{обнаружения}}$	0,68	0,87	0,95	0,997

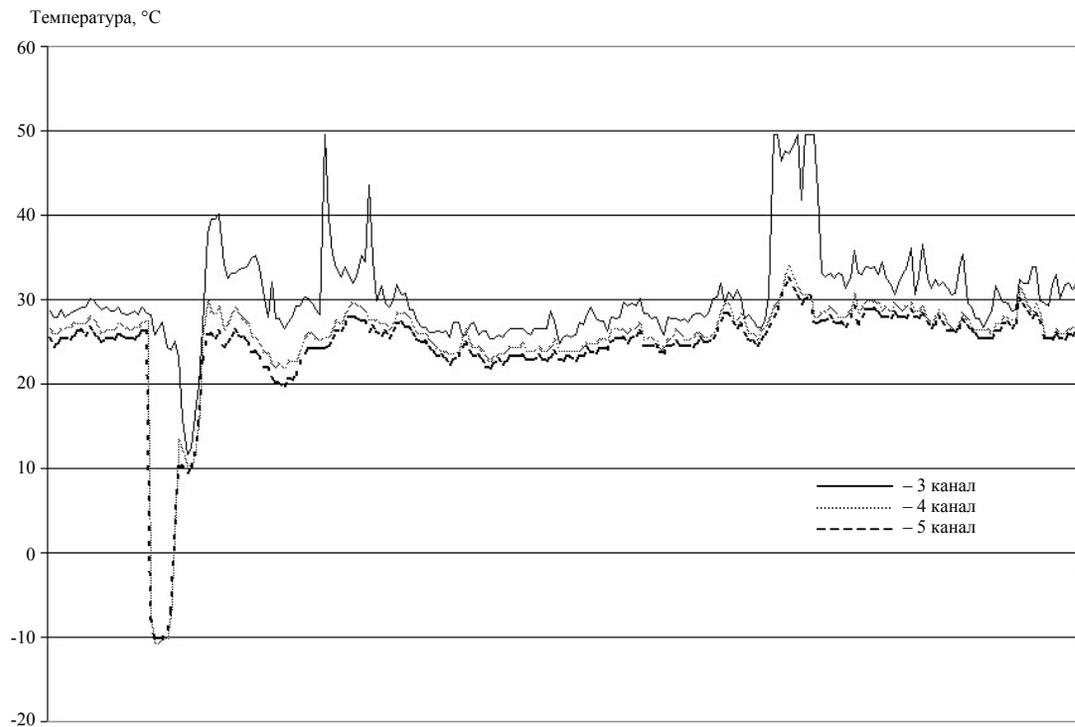


Рис. 3.13. Пример температурного распределения вдоль фрагмента – строки скана каналах 3, 4, 5 AVHRR (градусы Цельсия)

T3-T4

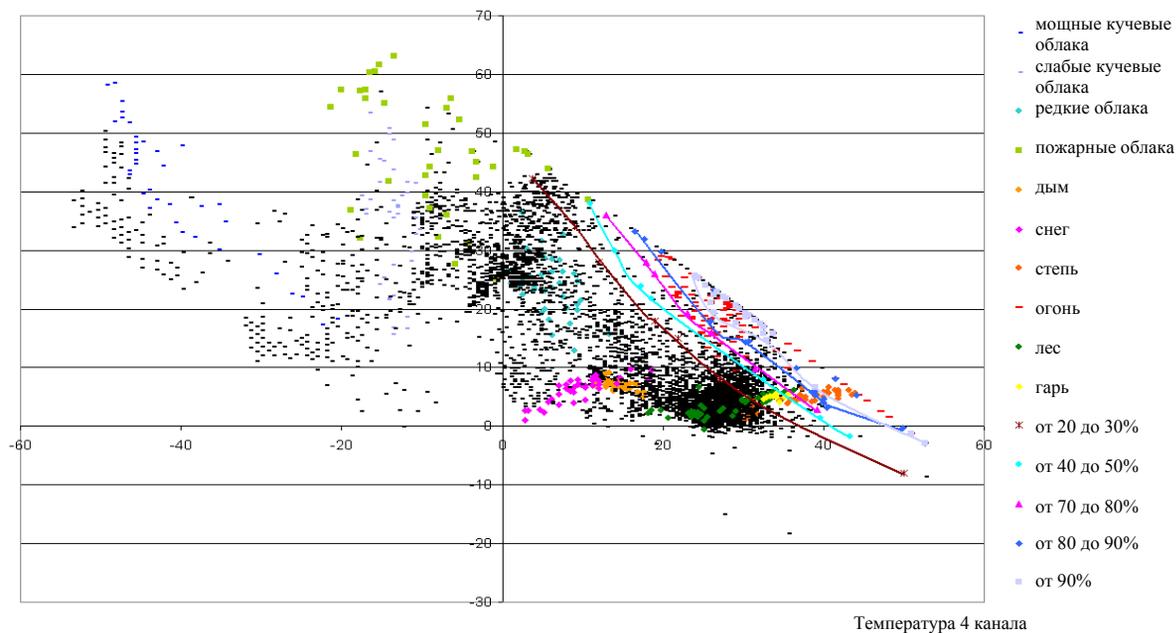


Рис. 3.14. Кластеризация пикселей, принадлежащих пожарам и фоновым объектам, в координатах $\Delta T_{3,4}$ и T4

Как видим, большинство фонов (снег, лес, песчаный и каменистый грунт, степи, гарь, дым, вода) образуют компактные кластеры, центры которых лежат в полосе ΔT_{3-4} от 0 до 10 К и в диапазоне $0 < T_4 < 45^\circ\text{C}$. При этом центр кластера пожаров существенно отдален и лежит в координатах $\Delta T_{3-4} = 22 \text{ К}$ и $T_3 = 31^\circ\text{C}$. Все виды облаков также выделяются и образуют свое семейство кластеров.

Подобные данные являются количественной основой для выбора разностных пороговых значений, используемых для идентификации ложных тревог.

Реализован этот алгоритм в Красноярском центре приема и обработки спутниковых данных, проходит опытную эксплуатацию и включает следующие этапы:

- I. Создание маски облачности. Классификация и распознавание облачности производится по критерию минимальной дистанции между кластерами. Кроме того, используется пороговое условие: альbedo облаков в канале 2 AVHRR превышает уровень 16% ($A_2 > 16\%$).
- II. Создание маски гидрологических объектов на основе карты озер и рек, поскольку они могут создавать солнечные блики, попадающие на приемник AVHRR.
- III. Создание зоны возможных солнечных бликов водных поверхностей как зоны высокого риска ложных тревог, с учетом высоты стояния солнца и траектории движения спутника.
- IV. Создание порогов:
 - а) по радиационной температуре в третьем канале AVHRR/NOAA: $T_{3b} \geq \bar{T}_3 + n\sigma$, где n зависит от выбора вероятности обнаружения пожара (см. табл. 3.4). \bar{T}_3 и σ вычисляются в зоне без облаков. При этом \bar{T}_3 зависит от погоды, времени года, высоты стояния Солнца, широты местности, угла визирования, типа леса и т. д.;
 - б) $\Delta T_{3-4} > 12 \text{ К}$;
 - в) $T_3 > 295 \text{ К}$.

Пороги б, в уточняются по мере накопления статистического материала.

- I. Создание таблиц термически активных точек, обнаружившихся с определенной вероятностью.
- II. Объединение термически активных точек, в том числе удаленных на некоторое заданное расстояние друг от друга, в кластер пожара. Вычисление координат центра и площади пожара как территории, пройденной огнем.

Оценка площади высокотемпературной зоны, включающей зоны пламенного и беспламенного горения, осуществляется на основе модифицированного метода Dozier [77, 78]. Оценивается площадь высокотемпературной зоны, как правило, с температурой более 750К для каждого пикселя в каждом кластере пожара. Суммирование этих пикселей дает оценку площади горения для каждого пожара, что позволяет приближенно оценить интенсивность каждого пожара.

Глава 4. ОБЩИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

Содержательный обзор исследований по проблеме моделирования распространения лесных пожаров, опубликованных до 1989 г., дан в работе [79]. Как показывает анализ, все математические модели лесных и торфяных пожаров можно разбить на четыре группы:

- 1) модели прогноза скорости распространения лесного пожара;
- 2) модели прогноза контуров лесного пожара;
- 3) модели прогноза характеристик течения, тепло- и массопереноса во фронте и зоне пожара;
- 4) общие математические модели, в рамках которых могут быть предсказаны все характеристики (скорость распространения, контур лесного пожара, поля температур, концентраций компонентов и скоростей) во фронте и в зоне лесного пожара.

Большой интерес представляют две научные работы, которые не рассматривались в обзоре [1], так как они были завершены только в 1997 г.

В диссертации Rodman Roy Linn [80] используются элементы теории процессов переноса в многофазных реагирующих средах и метода частиц в ячейках, развитого его научным руководителем профессором F. Harlow. В работе дается физико-математическая модель турбулентности течений при лесных пожарах. На основе этой модели были решены двумерные задачи теории низовых лесных пожаров и получены поля скоростей, температур и концентраций компонентов в вертикальной плоскости x, z и численно подтвержден известный из эксперимента эффект увеличения скорости распространения низового лесного пожара с ростом угла наклона подстилающей поверхности.

К основным недостаткам этой модели следует отнести:

1. Отсутствие четкой физической модели лесного пожара – совокупности причинно-следственных связей, влияющих на поведение этого явления.
2. Игнорирование ограниченности скоростей физико-химических процессов в зоне лесного пожара.
3. Введение множества различных эмпирических постоянных значений температур, испарения, зажигания, окисления углерода, горения углеводородов, которые на самом деле являются функциями времени и координат.
4. Игнорирование эффекта аэроупругости лесной растительности.

В работе [81] последовательно используются теория многофазных реагирующих сред и известный алгоритм SIMPLE численного решения уравнений конвективного переноса Патанкара-Сполдинга. С использованием упомянутых выше численных методик в [81] также решена задача о распространении низового лесного

пожара по слою лесных горючих материалов, расположенному на наклонной подстилающей поверхности. К недостаткам модели следует отнести допущение о сферичности элементов лесных горючих материалов, ограниченности числа компонентов в газовой фазе, отсутствие физически содержательной модели турбулентности и игнорирование эффекта аэроупругости растительности.

Ниже обсуждаются наиболее принципиальные экспериментальные и теоретические результаты, полученные в Томском государственном университете в процессе работы над общими математическими моделями первого [82, 83] и второго [84 – 86] поколений.

Наряду с обзором ранее полученных результатов в этой статье дается новая информация об учете эффекта аэроупругости лесных горючих материалов, замыкании основной системы уравнений при учете компонентов дисперсной фазы (частиц сажи, дыма и капель воды), а также предлагается математическая модель торфяных пожаров второго поколения.

4.1. Цель и алгоритм научного исследования лесных и торфяных пожаров

Цель исследования лесных пожаров заключалась в создании общей математической модели лесных пожаров, методов и методик решения прямых и обратных задач теории лесных пожаров, в исследовании структуры фронта пожара, механизма и предельных условий возникновения и распространения лесных пожаров, а также в прогнозе экологических последствий пожаров.

В Томском госуниверситете эта работа проводилась по единому алгоритму [87] и включала следующие взаимосвязанные этапы:

1. Предварительный этап исследования проблемы, который состоял в обзоре литературных данных, беседах с лесными пожарными, формулировке гипотез, в выборе и обосновании направления исследования (1976 – 1977 гг.).

2. Проведение физических оценок, лабораторных, натуральных экспериментов и создание общей физической модели, которая представляет собой совокупность причинно-следственных связей, объясняющих все известные результаты наблюдений за реальными пожарами (1977 – 1978 гг.).

3. Разработка математической общей модели лесных и торфяных пожаров первого поколения с использованием понятий и методов механики реагирующих сред, включая создание базы данных к этой модели (1977 – 1979 гг.).

4. Разработка методов и методик для аналитического и численного решения прямых и обратных задач теории лесных и торфяных пожаров (1977 – 1990 гг.).

5. Решение и обобщение решения некоторых прямых и обратных задач теории лесных пожаров с позиций механики, физики и химии. Оценка степени адекватности общей математической модели реальному процессу распространения лесных пожаров путем сравнения с известными и собственными экспериментальными данными (1978 – 1985 гг.).

6. Анализ решения задач о структуре фронта лесного пожара и устойчивости его распространения, определение предельных условий распространения, принятие новых технических решений и разработка технических заданий на проведение опытно-конструкторских работ (1985 – 1996 гг.).

7. Создание опытных образцов новых устройств для борьбы с лесными пожарами и их испытания в полунатурных условиях и разработка новой концепции борьбы с лесными пожарами (1985 – 1996 гг.).

8. Уточнение общей математической модели и создание математической модели лесных пожаров второго поколения. Решение задач об экологических последствиях лесных пожаров и разработка компьютерных методик для определения выбросов вредных веществ и радионуклидов в атмосферу (1992 – 1999 гг.).

9. Постановка и решение сопряженной задачи о сушке слоя лесных горючих материалов для прогноза лесной пожарной опасности (с 1998 г. по настоящее время).

10. Постановка обратных задач теории лесных и торфяных пожаров для обнаружения и идентификации типа лесных и торфяных пожаров с помощью сенсорных устройств, расположенных на самолетах и спутниках (с 1997 г. по настоящее время).

4.2. Основные понятия теории лесных пожаров

Лесные пожары распространяются в результате горения лесных горючих материалов (ЛГМ). Лесными горючими материалами называются природные углеводородные топлива, к которым относятся тонкие веточки, хвоинки или листья в кронах деревьев и опавшие на землю, а также напочвенный покров (трава, кустарники, мох, лишайник), болотные растения и торф.

В результате горения лесных горючих материалов образуются конечные продукты горения – зола и недожог – совокупность недогоревших лесных горючих материалов, которые имеют черно-бурый цвет и обогащены углеродом. Над очагом лесного пожара возникает конвективная колонка – струя нагретых продуктов полного и неполного сгорания ЛГМ (частицы сажи и золы в виде дыма). Высота конвективной колонки тем больше, чем большее количество тепла выделяется при горении, так как основная движущая сила продуктов сгорания – сила Архимеда.

Лесным пожаром называется явление неуправляемого многостадийного горения в открытом пространстве на покрытой лесом площади, в рамках которого имеют место взаимосвязанные процессы конвективного и радиационного переноса энергии, нагревания, сушки и пиролиза лесных горючих материалов, а также горение газообразных и догорание конденсированных продуктов пиролиза ЛГМ.

Лесные пожары подразделяются на низовые, повальные верховые, вершинные верховые, подземные (пожары на торфяниках) и массовые. При низовых лесных пожарах сгорают опад (опавшие веточки, хвоинки и листья), напочвенный покров (травы, мхи, лишайники), а также кустарники.

При повальном верховом пожаре одновременно сгорают упомянутые выше ЛГМ и ЛГМ в пологе леса, который представляет собой совокупность крон деревьев.

При вершинном верховом пожаре сгорают ЛГМ только в пологе леса.

Подземными лесными пожарами называют пожары на торфяниках, когда очаг горения находится в толще торфяного пласта.

Наряду с перечисленными выше обычными типами лесных пожаров, которые в природе инициируются точечным источником зажигания (молнией, непогашенным костром, окурком и др.) на подстилающей поверхности, в исключительных случаях (воздушный ядерный взрыв, столкновение Земли с астероидом или ядром

кометы и др.) в результате мощного источника излучения в атмосфере происходит заживание ЛГМ на огромных территориях (десятки, сотни и даже тысячи гектаров) и возникают массовые лесные пожары.

В любой момент времени на территории, покрытой лесом, можно выделить достаточно большой контрольный объем среды – зону пожара, внутри которой параметры состояния среды в результате физико-химических превращений, обусловленных лесным пожаром, отличаются от невозмущенных значений, определяемых погодными условиями и типом растительности. Схема зоны лесного пожара представлена на рис. 4.1, 4.2.

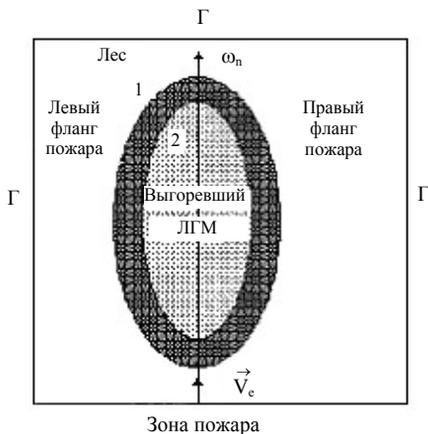


Рис. 4.1. Схема зоны лесного пожара (вид сверху). Черным цветом показан фронт пожара

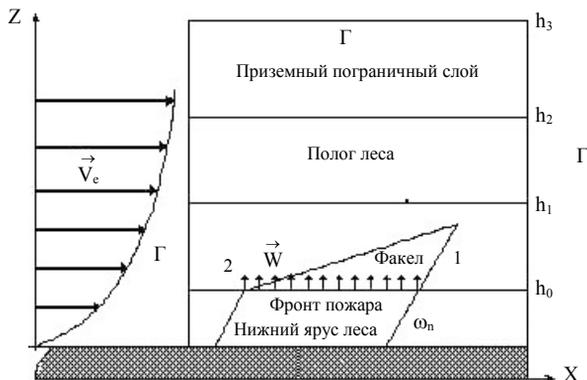


Рис. 4.2. Схема зоны лесного пожара (вид в вертикальной плоскости)

Наиболее сильное изменение параметров состояния среды происходит в некоторой части зоны лесного пожара, называемой фронтом пожара, который распространяется с некоторой скоростью по территории, покрытой лесом. Визуально фронт лесного пожара наблюдается в виде светящейся зоны очага лесного пожара.

Поверхность 1 (рис. 4.1, 4.2), отделяющая фронт от несгоревших ЛГМ, называется внешней кромкой фронта лесного пожара. Ее проекция на подстилающую поверхность называется контуром лесного пожара. Для обычных лесных пожаров длина контура пожара растет с ростом времени. При массовых лесных пожарах возникает мощная конвективная колонка и в зоне пожара зарождается сильный "собственный" ветер, направленный к центру очага горения, который препятствует разгоранию очага пожара, и поэтому контур массового лесного пожара почти не меняется с ростом времени. Внешняя кромка, распространяющаяся по ветру, называется передней, а задней кромкой – задней кромкой фронта лесного пожара. На схеме зоны лесного пожара (см. рис. 4.1 и 4.2) Г – граница зоны лесного пожара, 1 – контур лесного пожара (рис. 4.1) и кромка фронта лесного пожара (рис. 4.2), 2 – внутренняя кромка фронта пожара (рис. 4.2) и проекция этой кромки на горизонтальную подстилающую поверхность (рис. 4.1); горизонтальные стрелки на рис. 4.2 обозначают скорость (по величине и направлению) невозмущенного ветра для различных высот, а вертикальные w – скорость вдува газообразных и дисперсных горючих продуктов горения из фронта пожара в приземный слой атмосферы.

Скорость распространения лесного пожара направлена по нормали к контуру лесного пожара, поэтому называется нормальной скоростью распространения и определяется формулой:

$$\omega_n = \lim \frac{\Delta n}{\Delta t}, \quad (4.1)$$

где Δn – расстояние между двумя точками контура в моменты t и $t + \Delta t$, отсчитываемое по нормали к контуру лесного пожара в момент времени t .

Поверхность 2 (см. рис. 4.1, 4.2), отделяющая фронт пожара от сгоревших ЛГМ, называется внутренней кромкой лесного пожара. Она может продвигаться как по ветру, так и против ветра. В последнем случае она распространяется с меньшей скоростью, чем передняя внешняя кромка, которая движется в направлении ветра. В результате толщина (ширина) фронта для различных пожаров может меняться в зависимости от времени, скорости ветра и запаса ЛГМ, который мало отличается от невозмущенных значений.

Границей зоны лесного пожара называется поверхность Г, на которой параметры состояния (температура, скорость ветра, концентрации компонентов) почти не отличаются от параметров состояния невозмущенной среды.

4.3. Результаты физического моделирования лесных пожаров и общая физическая модель физико-химических процессов в зоне пожара

Основой для создания математической теории лесных пожаров явились базовые полунатурные экспериментальные данные, которые позволили создать общую физическую модель лесных пожаров – совокупность причинно-следственных связей, составляющих физическую сущность этого явления.

Известно, что в лабораторных условиях невозможно полностью воспроизвести физико-химические явления, происходящие в зоне лесного пожара. Поэтому в ТГУ с помощью физического моделирования явления в натуральных условиях исследовался механизм распространения верховых и низовых лесных пожаров, а в лабораторных условиях определялись теплофизические и термохимические постоянные лесных горючих материалов. Схемы проведения этих экспериментов даны в [83 – 90].

Для этого использовались три искусственные лесные полосы из молодых сосенок, которые вкапывали с плотностью посадки $0,7 - 2,7$ шт/м² так, чтобы направление полос совпало с направлением ветра. Длина такой лесной полосы составляла $8 - 20$ м, ширина $- 2,0 - 2,5$ и высота $2,5 - 5,0$ м, расстояние между нижней границей полога леса и напочвенным покровом $h_1 - h_0 = 0,1$ м. С наветренной стороны из сушиняка собиралась зона зажигания высотой $0,5 - 0,7$ м и шириной $2,0 - 2,5$ м. Размеры зоны зажигания и масса горючего материала в ней подбирались экспериментально для надежного инициирования верхового пожара и в то же время минимального влияния горения зоны зажигания на последующее распространение верхового пожара. Другими словами, размеры зоны зажигания подбирались так, чтобы энергосодержание факела пламени от зоны зажигания было того же порядка, что и от фронта пожара в кронах деревьев искусственной полосы леса. Для надежности инициирования верхового пожара зону зажигания непосредственно перед началом эксперимента обливали соляркой.

Кроме верхового пожара моделировался и низовой. В качестве напочвенного покрова использовали лишайник *Cladonia*, который в данных условиях, как и хвоя в пологе леса, служил проводником огня. Лишайник укладывали по земле слоем толщиной $0,10 - 0,15$ м с плотностью $1,5 - 2,0$ кг/м² и в искусственной лесной полосе из свежесрубленных в результате рубок ухода молодых сосенок.

На рис. 4.3 представлена схема экспериментов. Для идентичности взаимодействия ветра с фронтом пожара процесс инициировали одновременно в трех лесных

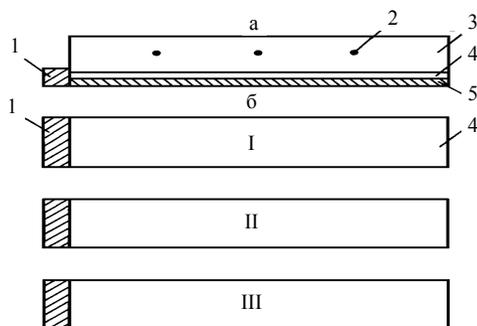


Рис. 4.3. Схема экспериментов по исследованию механизма распространения и структуры фронта верхового лесного пожара:

а – вид лесных полос сбоку; б – то же сверху; 1 – зона зажигания; 2 – точка расположения термопар и датчиков; 3 – полог леса; 4 – пространство между напочвенным покровом и пологом леса; 5 – напочвенный покров (травы, слой лишайника *Cladonia*); I – III – лесные полосы.

полосах с различной плотностью посадки деревьев. При проведении экспериментов использовались методики определения температуры и тепловых потоков перед фронтом пожара и во фронте, описанные в [87, 89]. Датчики тепловых потоков и термопары помещались в трех точках (центрах измерения) полога леса на высоте 2 м и на расстоянии от зоны зажигания 4, 8, 12 м соответственно. В каждом центре измерения устанавливали датчики плотности суммарного теплового потока, плотности лучистого теплового потока и термопару. В некоторых экспериментах вместо единичных термопар в кронах деревьев закреплялись две взаимно перпендикулярные "гребенки" термопар, одна из которых – вертикально, а другая – горизонтально. "Гребенка" представляла собой совокупность термопар, закрепленных в отверстиях железных труб, наружный диаметр которых составлял 0,021 м. Через трубы протягивались провода для передачи сигнала на регистрирующую аппаратуру. Расстояние между термопарами составляло 0,5 м. На каждой трубе закреплялись по четыре термопары, и одна термопара крепилась в точке пересечения "гребенок".

На основе анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

1. Фронты низового и верхового лесных пожаров включают в себя зоны прогрева, сушки и пиролиза лесного горючего материала, а также диффузионного горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза [83 – 88] (см. рис. 4.4).

2. Профили температуры газовой и конденсированной фаз во фронте верхового лесного пожара имеют вид гауссовской кривой. Температура конденсированной фазы ниже температуры газовой фазы, причем максимальное отличие составляет 200 – 300 К [84 – 88].

3. Верховой лесной пожар возникает в результате загорания кроны деревьев от факела пламени низового лесного пожара. Относительно устойчивое распространение верхового лесного пожара по кронам деревьев наблюдается, если скорость ветра в пологе леса превышает 2,5 м/с [84 – 88].

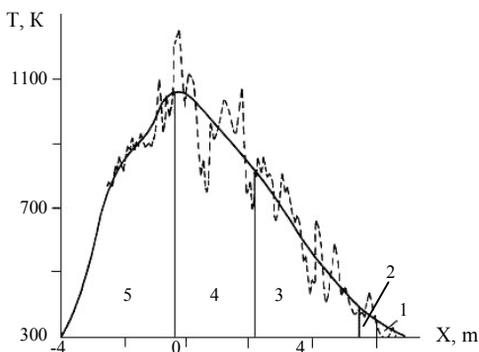


Рис. 4.4. Структура фронта верхового лесного пожара:

1 – зона прогрева ЛГМ; 2 – зона сушки ЛГМ; 3 – зона пиролиза ЛГМ; 4 – зона горения газообразных продуктов пиролиза; 5 – зона догорания конденсированных продуктов пиролиза; сплошная кривая – профили осредненной температуры; штриховая – профили мгновенной температуры во фронте пожара.

4. С позиций теории тепло- и массообмена фронт верхового лесного пожара представляет собой своеобразную тепловую завесу, характеристики которой зависят от интенсивности тепловыделения, скорости ветра, высоты полога леса, типа растительности, рельефа местности и интенсивности турбулентности [83].

5. Элементы ЛГМ (тонкие веточки и хвоинки) во фронте лесного пожара колеблются, создавая характерный шелест и шум, а температура элементов ЛГМ немонотонным образом зависит от времени [84 – 88].

6. Течение газа во фронте лесного пожара является турбулентным, в результате чего имеют место флуктуации температуры и других характеристик газовой фазы [84 – 90] (см. рис. 4.4).

7. Течение в конвективных колонках – струях смеси воздуха и нагретых продуктов сгорания ЛГМ – является турбулентным, а температура быстро убывает с ростом высоты [83, 88].

8. Во фронте лесного пожара реализуется диффузионный режим горения [83, 84].

Методики проведения полунатурных экспериментов подробно описывались в работах [83 – 90]. Кроме того, были проведены многочисленные лабораторные опыты по регистрации убыли массы ЛГМ в результате сублимации и пиролиза, что позволило определить термокинетические постоянные этих процессов [83, 84].

Исследованы также закономерности зажигания лесных горючих материалов в потоке нагретого газа [84, 87]. Установлено, что совокупность хвоинок при прочих равных условиях воспламеняется при более низкой температуре газового потока, чем одиночная хвоинка, что объясняется газофазным механизмом зажигания этих ЛГМ.

На основе обобщения известных экспериментальных и теоретических данных в [82, 83] предложена математическая модель лесных пожаров первого поколения, в рамках которой лес моделировался пористо-дисперсной средой, а ее костяк считался недеформируемым твердым телом. Кроме того, предложена универсальная физическая модель энергетики лесных и степных природных пожаров, согласно которой теплота, выделившаяся при сгорании ЛГМ за счет излучения свободной и вынужденной конвекции, передается несгоревшим ЛГМ, в результате чего они прогреваются, высушиваются и пиролизуются. Затем газообразные и конденсированные продукты пиролиза сгорают и процесс повторяется в указанном порядке.

Модель первого поколения, как выяснилось, в целом адекватна изучаемому явлению и может служить основой для создания математической теории лесных пожаров. Вместе с тем возникла необходимость уточнения этой модели и создания общей математической модели верховых и низовых лесных пожаров второго поколения. В частности, известно [91], что колебания элементов теплообменников (труб и стержней различного диаметра и форм) сильно влияют на характеристики их тепло- и массообмена с высокоэнтропийным потоком. В [91] показано, что несимметричный отрыв потока при обтекании стержня возбуждает собственные колебания трубы, которые могут усиливаться, если частота наиболее представительных турбулентных пульсаций потока близка к собственной частоте колебаний.

Кроме того, как показывают наблюдения, при массовых лесных пожарах имеет место эффект задымленности больших территорий [84] и образование облаков над зоной пожара в результате конденсации водяного пара, образующегося при сгорании ЛГМ. Крупный лесной пожар можно рассматривать как своеобразный метеотрон – устройство для искусственного вызывания осадков. Поэтому предложенная в [83] схема физико-химических процессов во фронте лесного пожара (рис. 4.5а) должна быть дополнена соответствующей схемой [90] тепло- и массопереноса в приземном слое атмосферы (рис. 4.5б).

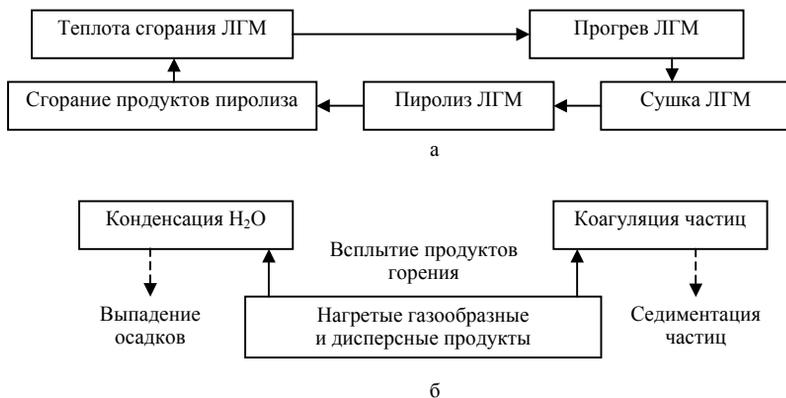


Рис. 4.5. Схемы физико-химических процессов в зоне лесного пожара (а) и в приземном слое атмосферы (б)

В последнее время разработана схема изменения агрегатного состояния и химического состава во фронте лесного пожара (см. рис. 4.6).

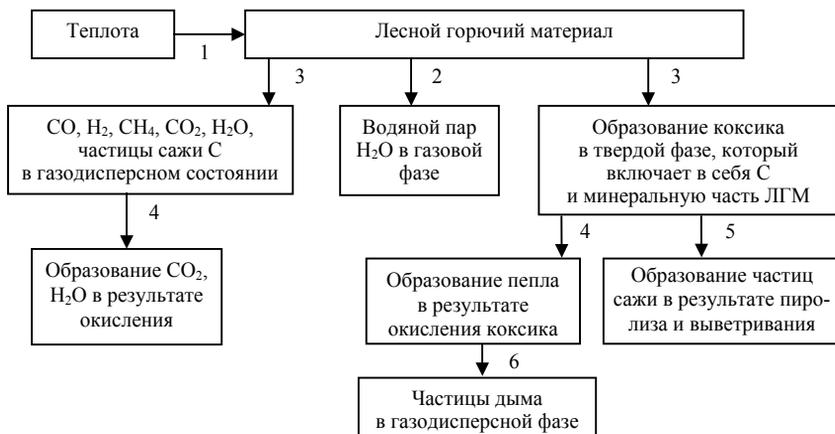


Рис. 4.6. Схема изменения агрегатного состояния и химического состава лесных горючих материалов во фронте лесного пожара:

1 – подвод теплоты в результате конвекции, теплопроводности и излучения; 2 – сушка ЛГМ; 3 – пиролиз ЛГМ; 4 – окисление газообразных, конденсированных и дисперсных продуктов пиролиза; 5 – выветривание частиц сажи из коксика; 6 – выветривание частиц пепла и образование частиц дыма.

На основании вышеизложенного можно считать, что лес в процессе пожара представляет собой многофазную многоярусную пористо-дисперсную, пространственно неоднородную среду, которая состоит из сухого органического вещества (объемная доля φ_1), воды в жидкокапельном состоянии (φ_2), связанной с этим веществом, конденсированного продукта пиролиза (коксика, φ_3), конденсированного продукта горения коксика (пепла, φ_4), газовой фазы (φ_5), дисперсных частиц сажи (φ_6) и золы (φ_7), а также капель воды (φ_8) над очагом лесного пожара. Элементы ЛГМ (тонкие веточки, хвоинки, листья) имеют одну температуру, а газовая и дисперсная фазы – другую. Под влиянием ветра элементы среды колеблются. Эффект изгибных колебаний этих элементов, или аэроупругость среды, сказывается только на значениях силы сопротивления и коэффициентов тепло- и массообмена элементов ЛГМ с газовой фазой, т. е. среда считается квазитвердой (почти недеформирующейся при порывах ветра). Тепловая энергия, выделяющаяся во фронте пожара в результате свободной и вынужденной конвекции и излучения, передается ЛГМ, которые нагреваются, высушиваются и затем разлагаются на газообразные горючие и инертные продукты пиролиза и конденсированный горючий продукт пиролиза (коксик), после чего газообразные и конденсированные продукты сгорают и процесс повторяется сначала. Предполагается, что длина свободного пробега фотона ℓ_ϕ при лесном пожаре много меньше характерных размеров лесного фитосцепоноза \bar{r} и \bar{h} , где \bar{r} – эффективный диаметр макропор (среднее расстояние между отдельными деревьями), а \bar{h} – средняя высота слоя ЛГМ. Оптические свойства лесных горючих материалов зависят от длины волны излучения и изменяются с ростом температуры. Над фронтом пожара имеет место конвективная колонка, которая возникает в результате свободной конвекции и содержит большое количество паров воды. Последние могут конденсироваться с образованием капель воды в верхних, относительно более холодных слоях атмосферы над зоной пожара.

4.4. Основная система уравнений

Используя принятые выше допущения, произвольную декартову систему координат и тензорную символику для описания процессов тепло- и массопереноса в зоне лесного пожара, имеем следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = Q, \quad j = 1, 2, 3, \quad \varphi = \sum_{i=5}^8 \varphi_i, \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{dv_i}{dt} = & -\varphi \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho F_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - Q v_i - \rho C_d s \left(v_i |\vec{v}| + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \overline{(v'_i - v'_{is})^2} \cos \alpha_i + \right. \\ & \left. + \sum_{j=1}^3 \overline{(v'_i - v'_{is})(v'_j - v'_{js})} \cos \alpha_j \right), \quad \vec{F} = \vec{g} + (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \times \vec{\Omega} + 2\vec{v} \times \vec{\Omega}, \\ & i, j = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt} \sum_{i=5}^8 \rho_i \varphi_i C_{pi} = \sum_{i=5}^8 \varphi_i \frac{dp}{dt} + \rho F_j v_j + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{3TMj} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T}{\partial x_j} \left(\rho \sum_{\alpha=1}^N D_{3TM\alpha} C_{p\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - \\ - (\kappa + \kappa^{(s)}) [cU_R - B(T)] + \alpha_v (T_s - T) + c_{ps} (T_s - T) (1 - \alpha_c) R_{1s} + \\ + c_{p7} (T_s - T) R_{2s} + q_{3s} R_3^{(s)} + q_{52} R_{52} + q_{53} R_{53} + q_{54} R_{54} + q_{2s} (R_{8-}^{(s)} - R_{8+}^{(s)}) , \quad (4.4), \end{aligned}$$

$$\rho \frac{d_\alpha c_\alpha}{dt} = R_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{3TM\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - c_\alpha Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N, \quad (4.5),$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) - \kappa_s [cU_R - B(T_s)] + \\ + q_{1s} R_{1s} - q_{2s} R_{2s} + q_{3s} R_{3s} + \alpha_v (T - T_s), \quad (4.6), \end{aligned}$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (4.7),$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)}; \quad (4.8),$$

$$\sum_{\alpha=1}^8 c_\alpha = 1, \quad \sum_{i=1}^8 \varphi_i = 1, \quad P = \rho_r R T \sum_{\alpha=1}^{N_r} \frac{c_{\alpha r}}{M_\alpha}, \quad N_r = N - 3, \quad (4.9),$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}, \quad (4.10),$$

$$\tau_{ij} = \tau_{ij}^{(1)} + \tau_{ij}^{(2)}, \quad \tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad i = 1, 2, 3, \quad j = 1, 2, 3, \quad (4.11).$$

Здесь t – время, \vec{r} – радиус-вектор любой точки; x_j – декартовы координаты этой точки; κ , $\kappa^{(s)}$, κ_s – интегральные коэффициенты поглощения газа, дисперсных частиц и конденсированной фазы; B – функция Планка; U_R – интегральная плотность излучения; c_{pi} , c_{p7} , c_{ps} – теплоемкости при постоянном давлении отдельных фаз, водяного пара и газообразных продуктов пиролиза; v_j , $|\vec{v}|$ – компоненты и модуль осредненной скорости газа и дисперсных частиц; v' , v'_s – пульсационные составляющие ско-

рости потока и изгибных колебаний элементов ЛГМ; ρ_i – истинная плотность i -й фазы; $R_8^s = R_{8+}^s - R_{8-}^s$; $R_{8-}^{(s)}$, $R_{8+}^{(s)}$ – массовые скорости конденсации паров и испарения свободной воды в газодисперсной фазе; q_{1s} , q_{2s} , q_{3s} – теплоты пиролиза, испарения связанной воды и горения коксика; q_{52} , q_{53} , q_{54} – теплоты испарения горения CO , H_2 , CH_4 ; p – давление газа; $\tau_{ij}^{(1)}$, $\tau_{ij}^{(2)}$ – компоненты тензоров касательных (тангенциальных) напряжений для ламинарных и турбулентных течений; c_α – массовая концентрация α -компонента в газодисперсной среде; N – количество компонентов в газодисперсной среде; $N_r = N - 3$ – количество компонентов газовой фазы; R_α – массовая скорость образования α -компонента газовой фазы в результате пиролиза ЛГМ, испарения воды, гетерогенных и гомогенных химических реакций; $R_6^{(s)}$, $R_7^{(s)}$, $R_8^{(s)}$ – массовые скорости образования частиц сажи, дыма и капелек воды при конденсации ее паров; $\rho_r = \sum_{\alpha=1}^7 \rho_{\alpha r}$ – плотность газовой фазы; $\rho_{\alpha r}$ – парциальные плотности компонентов газовой фазы (индекс 1 соответствует кислороду, 2 – CO ; 3 – H_2 ; 4 – CH_4 ; 5 – CO_2 ; 6 – N_2 ; 7 – парам воды); $c_{\alpha r} = \rho_{\alpha r} / \rho_r$, $\alpha = 1, 2, \dots, 7$ – массовые концентрации для смеси газов; $c_\alpha = \rho_\alpha^0 / \rho$, $\alpha = 1, 2, \dots, 10$ – массовые концентрации компонентов газодисперсной смеси; ρ_α^0 – парциальные плотности отдельных компонентов газодисперсной фазы ($\alpha = 1, 2, \dots, 10$; первые семь значений ρ_α^0 соответствуют компонентам газовой фазы, а последние 8 – частицам сажи; 9 – частицам дыма; 10 – каплям воды); $\rho = \rho_5 \Phi_5 + \rho_6 \Phi_6 + \rho_7 \Phi_7 + \rho_8 \Phi_8$ – плотность газодисперсной смеси; $\rho_5 - \rho_8$ – истинные плотности газовой фазы, частиц сажи, частиц дыма и капелек воды; D_a , D_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной диффузий; λ , λ_T – коэффициенты молекулярной и турбулентной теплопроводностей газовой фазы; $D_{N-1эф}$, $D_{Nэф}$ – эффективные коэффициенты диффузии частиц дыма, где $N - 2$ соответствует частицам сажи, $N - 1$ – частицам золы, а N – каплям воды; $D_{\alphaэф} = D_\alpha + D_T$ – эффективный коэффициент диффузии α -компонента; α_v – коэффициент внутреннего теплообмена; $R_{5\alpha}$ – массовые скорости горения компонентов газовой фазы (индекс 2 соответствует горению CO , 3 – H_2 , 4 – CH_4 ; R_{is} – массовые скорости образования (исчезновения) вещества конденсированных фаз (индекс 1 соответствует скорости пиролиза ЛГМ, 2 – испарению воды, связанной с ЛГМ, 3 – горению коксика); T и T_s – температуры газовой и конденсированной фаз; λ_s – коэффициент теплопроводности пористой конденсированной фазы; \vec{q}_R , \vec{q}_{R_s} – векторы плотности лучистого теплового потока в газодисперсной фазе и пористой среде; q_{R_j} , $q_{R_{j_s}}$ – компоненты векторов \vec{q}_R и \vec{q}_{R_s} ; $\cos \alpha_i = v_i / v$ – направляющие косинусы вектора средней скорости газодисперсной фазы; q_k – тепловые эффекты химических реакций; $k = 1, 2, 3$, где 1 соответствует реакции пиролиза, 2 – массовой скорости испарения связанной воды, 3 – скорости гетерогенного коксика; α_c – коксовое число ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; M_c и M_1 – атомарная и молекулярная

массы углерода и кислорода; M_α – молекулярная масса α -компонента газовой фазы; \vec{g} – ускорение силы тяготения; $\vec{\Omega}$ – угловая скорость вращения Земли; $\lambda_{эф} = \lambda + \lambda_T$ и $\mu_{эф} = \mu + \mu_T$ – эффективные коэффициенты теплопроводности и вязкости газа; C_d – эмпирический коэффициент сопротивления растительности; $\alpha_v = \alpha_s$ – коэффициент объемного теплообмена элемента ЛГМ со средой; s – удельная поверхность ЛГМ в данном ярусе леса; α_s – коэффициент теплообмена типичного элемента ЛГМ с окружающей средой; F_j – компоненты вектора \vec{F} ; нижний индекс "j" соответствует реакциям с участием конденсированных веществ; верхний индекс "s" – характеристикам дисперсной фазы.

В уравнении (4.5) полная производная для компонентов газовой фазы при $\alpha = 1, 2, \dots, N - 3$ имеет вид:

$$\frac{d_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + v_3 \frac{\partial}{\partial x_3},$$

а для компонентов дисперсной фазы $\alpha = N - 2, N - 1, N$:

$$\frac{d_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_1 \frac{\partial}{\partial x_1} + v_2 \frac{\partial}{\partial x_2} + (v_3 - v_{3\alpha}^{(s)}) \frac{\partial}{\partial x_3}.$$

Здесь $v_{3\alpha} = 18g\mu / \rho_\alpha^{(s)} d_\alpha^2$ – стоксова скорость оседания дисперсных частиц; μ – молекулярная динамическая вязкость газовой фазы; g – ускорение свободного падения; $\rho_\alpha^{(s)}$ и d_α^2 – плотность и диаметр дисперсных частиц.

Таким образом, в соответствии с [85], среда считается двухскоростной, что позволяет учесть седиментацию – оседание частиц под действием силы тяжести.

Уравнение (4.2) представляет собой закон сохранения массы газодисперсной фазы; уравнение (4.3) – закон сохранения количества движения газодисперсной фазы в проекциях на оси декартовой системы координат. В (4.3) входят члены, обусловленные силовым взаимодействием газодисперсного потока с костяком пористо-дисперсной среды.

Уравнение (4.4) представляет собой закон сохранения энергии в газодисперсном потоке с учетом переноса энергии как конвекцией, так и излучением, а также выделения и поглощения тепловой энергии в результате различных физических и химических процессов.

Уравнение (4.5) – закон сохранения и изменения массы отдельных компонентов в газодисперсном потоке с учетом процессов конвекции и диффузии, а также физико-химических превращений.

Уравнение (4.6) является законом сохранения энергии в конденсированной фазе, а уравнения (4.7) описывают кинетику пиролиза и сушки ЛГМ.

Уравнения (4.8) описывают баланс массы коксика – промежуточного конденсированного продукта пиролиза ЛГМ и пепла – конечного конденсированного продукта горения.

Первое и второе соотношения (4.9) представляют собой алгебраический интеграл основной системы уравнений, а третье – уравнение состояния для газовой фазы.

Соотношение (4.10) определяет скорость генерации газовой и дисперсной фазы в результате испарения и химических реакций, а выражения (4.11) – тангенциальные компоненты тензора напряжений через производные от компонентов скорости осредненного течения.

4.5. Модели турбулентности

В окрестности различных лесных пожаров наблюдаются различные типы течений. В частности, если лесные горючие материалы сгорают вблизи подстилающей поверхности, т. е. горит напочвенный покров и имеет место низовой лесной пожар, то можно говорить о переходном (смешанном) типе течения. Непосредственно на подстилающей поверхности при ($z = 0$) имеет место условие прилипания, в слое ЛГМ течение ламинарное, а над слоем ЛГМ происходит переход ламинарного течения в турбулентное. В конвективной колонке над очагом лесного пожара реализуется развитое турбулентное течение.

Уравнения (4.2) – (4.11) представляют собой осредненные по Рейнольдсу, т. е. по времени, уравнения Навье-Стокса для многофазной многокомпонентной реагирующей среды. При этом принято допущение, что характерное время турбулентных пульсаций $t' \ll t_*$, где t_* – характерное время процесса (время существования лесного пожара). При малых скоростях течения $\mu \gg \mu_t$, $\lambda \gg \lambda_t$, $D_\alpha \gg D_{\alpha t}$, и уравнения (4.2) – (4.11) превращаются в уравнения Навье-Стокса для многофазной реагирующей среды. При больших скоростях потока (больших числах Рейнольдса) течение носит хаотический (турбулентный) характер. В этом случае течения $\mu_t \gg \mu$, $\lambda_t \gg \lambda$, $D_{\alpha t} \gg D_\alpha$, и уравнения (4.1) – (4.10) становятся уравнениями Рейнольдса для многофазной реагирующей среды. Подобные уравнения ранее были получены для химически реагирующих многокомпонентных потоков газа [93, 94].

В отличие от этих работ при выводе уравнений (4.2) – (4.11) были сделаны допущения о том, что операция осреднения не влияет на вид уравнения состояния многокомпонентного газа и выражения для скоростей химических реакций.

Надо сказать, что иногда вместо осреднения по Рейнольдсу используют осреднение исходных уравнений по Фавру [92, 93], в рамках которого осредненные значения проекций скорости определяются по формуле:

$$\tilde{v}_i(x_i) = \overline{\rho v_i(x_i)} / \overline{\rho}(x_i) \quad i = 1, 2, 3, \quad (4.12).$$

Здесь волна над v_i обозначает осреднение по массе, а черта – осреднение по времени, ρ и v_i – мгновенные значения плотности и проекций скорости. В [92] даны формулы, связывающие все осредненные по Рейнольдсу и по Фавру параметры состояния среды.

При использовании преобразования Фавра легко получить систему уравнений, которая, в сущности, будет эквивалентна системе (4.2) – (4.11), но будет записана относительно среднемассовых параметров потока (скорости, температура и др.), за

исключением давления. Недостатком осреднения Фавра является то, что члены уравнения Навье-Стокса, характеризующие молекулярный перенос, в том числе и компоненты тензора напряжений τ_{ij} , становятся более громоздкими после этого осреднения. Кроме того, при экспериментальном определении осредненных по Фавру термодинамических параметров требуется знать как мгновенные значения плотности ρ , так и ее среднее значение.

Экспериментальное определение осредненных по Рейнольдсу величин не требует выполнения упомянутых выше требований. Поэтому при выводе уравнений (4.2) – (4.11) использовался способ определения Рейнольдса.

Для моделирования однонаправленных турбулентных течений в приземном слое атмосферы в [83, 84] использовались формулы Ван-Дриста [95] для внутренней и внешней (4.14) частей пограничного слоя:

$$v_T = (0,4z)^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{x}{A}\right) \right]^2 \left| \frac{\partial u}{\partial z} \right|, A = 26v \left(\frac{\tau_w}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4.13),$$

$$v_T = 0,0168\gamma_1 \left| \int_0^\delta (u_e - u) dz \right|, \gamma_1 = \left[1 + 5,5 \left(\frac{z}{\delta} \right)^6 \right]^{-1}, \quad (4.14).$$

Здесь τ_w – напряжение трения при $z = 0$; $v = \mu/\rho$, $v_T = \mu_T/\rho$ – кинематические вязкости для ламинарного и турбулентного течения; δ – толщина турбулентного пограничного слоя на обтекаемой поверхности; u_e – скорость потока на внешней границе пограничного слоя.

Формула (4.13) использовалась для расчета характеристик течения во внутренней части пограничного слоя, а (4.14) – для внешней. В соответствии с [95], эффективная кинематическая вязкость определялась по формуле:

$$v_{эф} = v + v_T, \quad (4.15).$$

Как показали расчеты [83, 84], формулы (4.13) – (4.15) дают возможность найти поля скоростей и температур во фронте лесного пожара при однонаправленном течении.

В [96] обсуждается вопрос о влиянии объемных сил на турбулентные течения. При математическом моделировании развитых турбулентных течений, возникающих при лесных пожарах, компоненты тензора касательных напряжений и проекций вектора плотности теплового турбулентного потока q_{iT} , а также проекций вектора плотности диффузионного потока для α – компонента $q_{i\alpha}$ определяются по формулам [84, 97]:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho v_i' v_j'} = \mu_T \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \operatorname{div} \bar{v} \right] - \frac{2}{3} \rho K \delta_{ij}, i, j = 1, 2, 3, \quad (4.16),$$

$$q_{iT} = -\rho c_p \overline{v_i' T'} = \Gamma_T \frac{\partial T}{\partial x_i}, \Gamma_T = \frac{\mu_T c_p}{Pr_T}, Pr_T = \frac{\mu_T c_p}{\rho \lambda_T}, i = 1, 2, 3, \quad (4.17),$$

$$q_{i\alpha} = -\overline{\rho v'_i c'_\alpha} = \Gamma_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_i}, \Gamma_\alpha = \frac{\mu_T}{Sc_{T\alpha}}, Sc_{T\alpha} = \frac{\mu_T c_p}{\rho \lambda_{T\alpha}} \quad i=1,2,3, \quad (4.18),$$

$$\mu_T = l^2 \left\{ \kappa_d^2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} + \kappa_b^2 \left| \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|^{1/2} \right\}, \quad (4.19),$$

$$\sqrt{K} = \frac{\mu_T}{\rho c'_\mu}, \quad l = \frac{0,4z}{1 + 2,5z\sqrt{c_d S/h}}, \quad l = 0,4z, \quad (4.20).$$

Здесь $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$ – декартовы координаты; ось x направлена в сторону ветра, ось z – вертикально вверх, а ось y – перпендикулярно этим осям; h – толщина слоя растительности; l – характерный масштаб длины [длина пути смешения, которая в слое растительности определяется по второй формуле, а за его пределами – по третьей формуле (20)]; c'_μ – постоянная, данная в статье Роди [94]; K – кинетическая энергия турбулентности; Pr_T – число Прандтля для турбулентных течений; $Sc_{\alpha T} = \nu_T / D_{T\alpha}$ – число Шмидта для турбулентных течений; $\lambda_{T\alpha}$, $D_{T\alpha}$ – коэффициенты турбулентной теплопроводности и диффузии; $\kappa_d = 0,2$, κ_b – размерная постоянная, равная 0,2 или 0 при $\partial\theta/\partial z < 0$ или $\partial\theta/\partial z > 0$ соответственно; $\theta = T_{oe} (1000/P_e)^{\gamma-1/\gamma}$ – потенциальная температура; T_{oe} – невозмущенная температура при $z = 0$; P_e – давление в невозмущенной среде, $\gamma = c_p / c_v$ – отношение удельных теплоемкостей воздуха за пределами зоны лесного пожара, а остальные обозначения приведены выше.

Формулы (4.16) – (4.18) – известные выражения Буссинеска [94], а соотношение (4.19) взято из [97]. Надо сказать, что в работе Роди [94] дается зависимость длины пути смешения l от числа Ричардсона для устойчивой и неустойчивой стратификации среды и первое из выражений (4.20).

С помощью модели турбулентного переноса (4.16) – (4.20) решено большинство задач математической теории лесных пожаров [84].

Для того, чтобы оценить погрешность, обусловленную допущением о равновесии между процессами диссипации и генерации кинетической энергии турбулентности, в [84, 98] для осесимметричного низового пожара были получены поля температуры и скорости потока с использованием полной $(K - \epsilon)$ модели турбулентности. Эта модель используется также в работе [99]. В целях краткости изложения упомянутая выше модель в данной статье не приводится.

Надо сказать, что в [83, 84] использовались модели турбулентности для чистого газа, в то время как в приземном слое атмосферы имеются частицы дыма и сажи.

Это определяется тем, что вопрос о влиянии конденсированных частиц, взвешенных в потоке газа, на характеристики турбулентности слабо изучен. Известны монографии [100, 101]. В первой из них теоретически исследован вопрос о влиянии тяжелой примеси в виде сферических частиц одинаковых размеров на турбулентную структуру струи, а во второй экспериментально и теоретически исследован вопрос о турбулентном переносе и осаждении аэрозолей на стенках труб. Как показано в этих работах, влиянием частиц на турбулентность можно пренебречь, если их объемная и массовая доли малы ($\sim 10^{-4}$). При лесных пожарах это условие выполняется. Представляется перспективным использование методов решения обратных задач механики реагирующих сред [102] для определений коэффициентов турбулентной теплопроводности и диффузии.

4.6. Модель излучения при лесных пожарах

В рамках модели первого поколения принято допущение о "серости" среды [83], которое в реальных условиях не выполняется, так как элементы ЛГМ (зеленые листья, хвоя) в ближней инфракрасной области (740 – 1200 нм) отражают значительно большую часть излучения, чем в видимой. Поэтому для переноса энергии излучением целесообразно использовать групповую диффузионную модель [84, 103]. Уравнение для переноса излучения с учетом спектральных свойств ЛГМ и частиц дисперсной фазы имеет вид

$$\operatorname{div} \bar{q}_{Rn\Sigma} + \kappa_{n\Sigma} c_n U_{Rn} = Q_{Rn}, \quad n = 1, 2, \dots, \mu, \quad (4.21)$$

$$\bar{q}_{Rn\Sigma} = \frac{1}{3} \int_{\nu_n}^{\nu_{n+1}} \frac{c_\nu \operatorname{grad} U_\nu}{k_{\nu\Sigma}} d\nu, \quad \kappa_{n\Sigma} c_n U_{Rn} = \int_{\nu_n}^{\nu_{n+1}} k_\nu c_\nu U_{R\nu} d\nu, \quad (4.22)$$

$$Q_{Rn} = \int_{\nu_n}^{\nu_{n+1}} Q_{R\nu} d\nu, \quad Q_{R\nu} = 4\pi [(\alpha_\nu + \alpha_\nu^{(s)}) B_\nu(T) + \alpha_{\nu s} B_\nu(T_s)], \quad (4.23)$$

где $\bar{q}_{Rn\Sigma}$ – групповое приближение общего спектрального потока излучения в многофазной пористо-дисперсной среде; $U_{R\nu}$ – плотность излучения в многофазной среде; c_ν и c_n – спектральная скорость света и ее групповое приближение; $\alpha_{n\Sigma}$ – групповое приближение для суммарного коэффициента поглощения среды; $k_{\nu\Sigma}$ – спектральный коэффициент ослабления излучения; $\kappa_{n\Sigma}$ – групповое приближение спектрального коэффициента ослабления; B_ν – спектральная функция Планка для равновесного излучения; α_ν , $\alpha_\nu^{(s)}$, $\alpha_{n\Sigma}$ – спектральные коэффициенты поглощения газа, дисперсных частиц и конденсированной фазы соответственно; ν – частота излучения; μ – общее число групп длин волн.

4.7. Влияние порывов ветра на собственные колебания растений и замыкание основной системы уравнений

Известен эффект аэродинамических вибраций труб в теплообменниках [91]. Эти вибрации определяются характером обтекания труб и их собственными упругими свойствами. В результате эффекта аэродинамических вибраций часть энергии турбулентного потока уходит для поддержания вибраций трубы с частотой, близкой к ее собственной частоте упругих колебаний. Интересно, что амплитуда вибраций, обусловленных турбулентными пульсациями скорости потока, плавно увеличивается с ростом скорости потока, так как при этом увеличивается кинетическая энергия турбулентных пульсаций. Установлено, что вибрации труб возникают как при продольном, так и при поперечном обтекании с достаточно большой скоростью. При малых значениях скорости потока кинетическая энергия турбулентных пульсаций, которая пропорциональна квадрату средней скорости потока, мала и вибрации труб не возникают. Очевидно, что эффект аэродинамических вибраций может иметь место при большой скорости ветра и в реальных лесных биогеоценозах. Основываясь на результатах [91], можно считать, что механизм возникновения колебаний элементов ЛГМ (хвоинки и тонких веточки) состоит в следующем:

1. При относительно малых значениях числа Рейнольдса имеет место безотрывное обтекание элемента ЛГМ, эпюра давления на его поверхности симметрична и никаких колебаний этого элемента не происходит.

2. С ростом числа Рейнольдса происходит ранний несимметричный отрыв потока при угле $\varphi_s = 82^\circ$, отсчитанном от лобовой критической точки цилиндра, что вызывает несимметричность эпюры давления и смещение элемента ЛГМ в сторону меньшего давления.

3. При отрыве вихря с другой стороны элемент ЛГМ смещается в противоположную от вихря сторону и таким образом возникают колебания хвоинки или тонкой веточки, которые экспериментально проявляются в акустическом шуме, возбуждаемом вихревыми дорожками.

4. Под действием сил давления со стороны потока газа, сил инерции и сил упругости элемент ЛГМ совершает колебания, причем движение элемента из-за вибраций вдоль и поперек направления скорости потока становится орбитальным.

Аналогичная ситуация возникает при сильном ветре, а также при обтекании стволов, крупных ветвей деревьев и совокупностей деревьев лесных массивов. Эффект аэроупругой вибрации в данном случае визуально проявляется колебаниями вершин деревьев и ветровыми волнами, распространяющимися на верхней границе полога леса при сильном порывистом ветре.

Эффект аэродинамических вибраций наблюдается и для высотных зданий, промышленных труб, мостов и других высотных сооружений [104]. Установлено, что частота срыва вихрей с обтекаемого потоком тела подстраивается под собственную частоту упругих колебаний в том случае, если они отличаются на несколько процентов. Иными словами, имеет место управление явлением раннего несимметричного отрыва вихрей посредством собственных упругих колебаний тела, которые называют захватыванием частоты образования вихрей. Опытные данные показывают, что амплитуда колебаний, как правило, не превышает половины характерного размера тела поперек потока (для лесного биогеоценоза этот размер

совпадает с высотой деревьев). Частота отрыва вихрей f_n определяется формулой [91, 104]:

$$f_n d_s / v_\infty = Sh_*, \quad (4.24),$$

где Sh – критическое число Струхалия, которое зависит от формы тела и числа Рейнольдса: v_∞ – равновесная скорость ветра в пологе леса [84].

Частота f_n одновременно является частотой изменения равнодействующей сил, направленных перпендикулярно скорости потока, а $2f_n$ совпадает с частотой равнодействующих сил в направлении скорости потока [91, 104].

Анализ зависимости $Sh_*(Re)$ для круглого поперечно-обтекаемого потоком цилиндра (рис. 4.7) показывает, что при $150 < Re < 300$ на кривой имеется разрыв, который соответствует несимметричному отрыву вихрей, благодаря чему возбуждаются аэроупругие колебания тела. Число Sh_* , соответствующее этому диапазону чисел Рейнольдса, равно 0,2. Затем при $3 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$ восстанавливается периодичность отрыва вихрей, отрыв наблюдается при $\varphi = 82 - 90^\circ$. Наконец, при $Re \geq 2 \cdot 10^5$ течение в пограничном слое на цилиндре становится турбулентным, отрыв происходит при $\varphi = 140^\circ$, уменьшается ширина следа за цилиндром. Число Sh_* (см. рис. 4.7) для этого диапазона чисел Re сначала растет, а затем снова убывает.

Представляет интерес определение равновесной скорости ветра v_* , при которой имеет место несимметричный отрыв потока от наиболее распространенного элемента ЛГМ – отдельно взятой хвоинки. На основе предыдущего анализа условие возбуждения колебания хвоинки имеет вид:

$$Re = v d_s / v > \underline{Re_*} = 150, \quad (4.25),$$

откуда получаем следующее условие для скорости потока:

$$v > v_* = \underline{Re_*} v / d_s, \quad (4.26).$$

Известно [84], что для хвоинок сосны, поперечное сечение которых имеет сложную серповидную форму, эквивалентный диаметр $d_s = 1$ мм, длина $l_s = 41 - 55$ мм; для хвои ели $l_s = 15$ мм, кедра – 80 мм, (диаметры эквивалентных цилиндров во всех этих случаях $d_s = 1$ мм). Массы хвоинок сосны, ели и кедра составляют $4,3 \cdot 10^{-4}$, $2,8 \cdot 10^{-4}$ и $4,8 \cdot 10^{-4}$ кг.

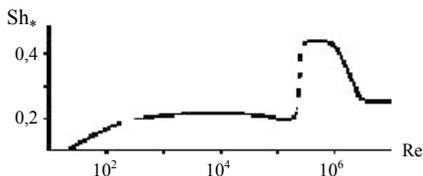


Рис. 4.7. Зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса для круглого поперечно-обтекаемого цилиндра [91]

Используя (4.26) и значение кинематической вязкости воздуха $\nu = 1,45 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ при $T = 298 \text{ К}$ [90], получаем

$$\underline{v}_* > 2,2 \text{ м/с}, \quad (4.27).$$

Любопытно, что оценки скоростей (4.27) согласуются со значением скорости ветра $v_* = 3 \text{ м/с}$ [84], при которой возникают верховые лесные пожары. Это не случайно. Колебания хвоинок усиливают теплообмен хвоинки с горячей газовой фазой, в результате чего ускоряются нагревание элементов ЛГМ и все остальные физико-химические процессы во фронте лесного пожара, поэтому верховой лесной пожар по сравнению с низовым распространяется значительно быстрее.

Если температура газовой фазы низкая, то интенсивные колебания горячей хвоинки могут привести к ее потуханию из-за интенсивного охлаждения (известно, например, что в результате интенсивных колебаний горячей спички ее можно потушить).

Таким образом, с точки зрения теории колебаний приземный слой атмосферы и лес представляют собой единую динамическую систему, колебания которой непосредственно влияют на теплообмен, а следовательно, и на распространение фронта верхового лесного пожара.

Для замыкания основной системы уравнений необходимо определить собственные колебания деревьев под влиянием случайной нагрузки, обусловленной действием ветра. Это позволит определить компоненты скорости v_{is} и замкнуть основную систему уравнений теории лесных пожаров.

Иными словами, задача замыкания основной системы ставится следующим образом: пусть известны v_i – проекции пульсационной составляющей скорости ветра, требуется определить компоненты скорости колебаний элементов растительности v_{is} . Для постановки и решения этой задачи будем использовать основные понятия и методы аэроупругости – науки о взаимодействии потока воздуха с упругими твердыми телами [104].

Для простоты анализа будем предполагать, что:

- 1) колебания деревьев в лесном фитоценозе не влияют друг на друга;
- 2) основную роль в колебательном движении лесных горючих материалов играют горизонтальные перемещения деревьев $x_s = x_s(z, t)$;
- 3) деревья представляют собой консоли с переменной по высоте массой $m_l = m_l(z)$ с размерностью $[m_l(z)] = \text{кг/м}$ – линейная плотность.

С использованием этих допущений для определения $x_s = x_s(z, t)$ имеем уравнение:

$$m(z) \frac{\partial^2 x_s}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} (EI \frac{\partial^2 x_s}{\partial z^2}) - P_l(z, t) = 0, \quad (4.28)$$

со следующими граничными и начальными условиями:

$$x|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial x}{\partial z}|_{z=0} = 0, \quad (4.29),$$

$$\left. \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \right|_{z=h} = 0, \quad \left. \frac{\partial^3 x}{\partial z^3} \right|_{z=h} = 0, \quad (4.30)$$

$$x|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial x}{\partial t} \right|_{t=0} = v_{x0}(z), \quad (4.31)$$

Здесь $m(z)$ – масса ствола дерева с кроной или степного растения на единицу длины (высоты); x – отклонение ствола степного растения от невозмущенного первоначального состояния, совпадающего с осью Z ; E – модуль Юнга; $I(z)$ – момент инерции; Z – независимая переменная; t – время; V_{x0} – начальная скорость отклонения для различных z ; $P\ell$ – сила воздействия ветра на ствол и крону дерева на единицу длины.

Следует отметить, что на самом деле любое дерево представляет собой сложную совокупность консолей различных размеров. К ним относятся не только ствол, но и крупные ветви, тонкие веточки и хвоинки. Поэтому для более адекватного описания колебаний в лесном фитоценозе необходимо рассматривать несколько видов консолей и для каждого из них записывать уравнение такого же типа, как и уравнение (4.28).

4.8. О замыкании основной системы уравнений

Определив из уравнений (106) с соответствующими условиями ξ_i , функцию $x_s = x_s(z, t)$ легко находим

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} = v'_{1s}, \quad v'_{2s} \approx 0, v'_{3s} \approx 0, \quad (4.32)$$

Таким образом, если порывы ветра $\vec{v}(t, x)$ известны из метеоусловий, то компоненты скоростей собственных колебаний типичного растения, моделируемого консолью, определяются по формулам (4.32). Следует отметить, что для каждого яруса леса выбирается свое типичное растение.

При выводе основной системы уравнений было принято допущение о том, что частицы воздуха, сажи, дыма и мелких капель воды, образующиеся над зоной пожара в атмосфере, обладают одной и той же скоростью. Это позволило для определения полей скоростей использовать так называемую однодавленческую модель, что существенно упростило основную систему уравнений. Надо сказать, что основная система уравнений (4.2) – (4.11) не замкнута, так как в ней даны только четыре уравнения (4.7), (4.8) для определения объемных долей $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$. Очевидно, что для определения $\varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8$ необходимо выписать дополнительные соотношения.

Отметим, что при выводе основной системы уравнений использовался особый тип многофазной среды – пористо-дисперсная среда, плотность которой ρ^0 можно представить в виде:

$$\rho^0 = \rho_s + \rho_5 + \rho^{(s)}, \rho_s = \sum_{i=1}^4 \rho_i^0, \rho^{(s)} = \sum_{i=6}^8 \rho_i^0, \rho_r = \rho_5, \quad (4.33),$$

где ρ^0 – плотность многофазной среды; ρ_s – суммарная парциальная плотность компонентов конденсированной фазы; ρ_1^0 – парциальная плотность сухого органического вещества; ρ_2^0 – парциальная плотность воды; ρ_3^0 – парциальная плотность конденсированного продукта пиролиза (коксика); ρ_4^0 – парциальная плотность конденсированного продукта горения коксика (пепла); ρ_5^0 – парциальная плотность газовой фазы; $\rho_6^0, \rho_7^0, \rho_8^0$ – парциальные плотности компонентов дисперсной фазы (ρ_6^0 – частицы сажи, ρ_7^0 – частицы пепла, ρ_8^0 – капельки воды); $\rho^{(s)}$ – плотность дисперсной фазы в целом.

Этот тип среды не описан в классических работах [105, 106], и поэтому в [82 – 86] были получены новые уравнения, граничные и начальные условия для математического описания процессов переноса в лесных фитоценозах при лесных пожарах, в результате которых сгорает напочвенный покров (опад хвои, лишайник Cladonia и др.), а также совокупность крон деревьев (полог леса). В обоих случаях начальные объемные доли сухого органического вещества $\varphi_{1н}$ и воды в микропорах этого вещества $\varphi_{2н}$ малы по сравнению с начальной объемной долей воздуха $\varphi_{5н}$. В частности, для слоя опада хвои $\varphi_{1н} = 0,04$; $\varphi_{2н} = 0,002$; $\varphi_{5н} = 0,958$; $\varphi_{5н} = 0,0993$ [84, 86]. Отметим, что элементы ЛГМ (хвоинки и тонкие веточки) имеют микропоры, которые не принимались во внимание при выводе основной системы уравнений, а косвенный учет их влияния на процессы переноса и горения осуществлялся путем задания соответствующих значений ρ_1 и ρ_2 .

Плотность сухого органического вещества в слое опада сосновой хвои $\rho_c = 20 \text{ кг/м}^3$, а в пологе соснового леса $\rho_c = 1,5 - 2 \text{ кг/м}^3$.

Таким образом, в начальный момент времени объемная доля воздуха $\varphi_{5н}$ значительно больше объемных долей $\varphi_{1н}$ и $\varphi_{2н}$, а плотности сухого органического вещества для слоя опада и полога леса превышают плотность воздуха $\rho_{5н} = 1 \text{ кг/м}^3$. С ростом времени во фронте пожара сгорают ЛГМ, и поэтому объемная доля газовой фазы растет, а $\varphi_{1н}$ и $\varphi_{2н}$ убывают. Надо сказать, что при пиролизе и горении появляются частицы сажи и дыма, а под зоной пожара на большой высоте, где температура среды ниже точки росы – капельки воды, но объемные доли этих компонентов и их парциальные плотности значительно меньше объемной доли и плотности газовой фазы.

Пусть массовые концентрации c_α ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$) газодисперсной смеси для кислорода, монооксида углерода, водорода, метана, диоксида углерода, азота, паров воды, сажи, частиц дыма и капелек воды известны в результате решения уравнений (4.5). Тогда, используя определения величин c_α и $c_{\alpha r}$ и последнее уравнение (4.9), легко находим связь между массовыми концентрациями в газовой и газодисперсной фазах и уравнение состояния смеси газового смеси в новой форме:

$$c_{\alpha r} = c_\alpha / \left(1 - \sum_{\alpha=8}^{10} c_\alpha\right), P = \frac{\rho RT \sum_{\alpha=1}^7 c_\alpha}{M}, \frac{1}{M} = \sum_{\alpha=1}^7 \frac{c_\alpha}{M_\alpha \left(1 - \sum_{\alpha=8}^{10} c_\alpha\right)}, \quad (4.34).$$

По определениям парциальных плотностей частиц сажи, дыма, капель воды и объемных долей компонентов имеем следующие выражения для определения соответствующих объемных долей:

$$\varphi_6 = c_8 \rho / \rho_6, \quad (4.35)$$

$$\varphi_7 = c_9 \rho / \rho_7, \quad (4.36)$$

$$\varphi_8 = c_{10} \rho / \rho_8, \varphi_5 = 1 - \sum_{i=1}^4 \varphi_i - \sum_{i=6}^8 \varphi_i, \quad (4.37)$$

Здесь ρ_6, ρ_7, ρ_8 – истинные плотности частиц сажи, дыма и капелек воды.

Следует отметить, что массовые скорости возникновения (исчезновения) R_8, R_9 и R_{10} – для сажи, частиц дыма и для капелек воды должны совпадать с выражениями $R_6^{(S)}, R_7^{(S)}$ и $R_8^{(S)}$. В противном случае будет нарушен общий баланс массы в единице объема среды в зоне пожара, что недопустимо. Иными словами, после суммирования левых и правых частей уравнений (4.5) по всем N результат суммирования должен быть нулем как в правой, так и в левой частях; т. е. должно выполняться равенство $\sum_{\alpha=1}^{10} R_{\alpha} = Q$.

Таким образом, если c_{α} известны, то для определения c_{air}, ρ и $\varphi_5, \varphi_6, \varphi_7, \varphi_8$ имеем уравнения (4.34) – (4.37).

4.9. Граничные и начальные условия

Для решения задач о возникновении и распространении лесных пожаров, помимо уравнений, необходимо записать граничные и начальные условия. В общем трехмерном случае зона пожара представляет собой параллелепипед, в котором распространяется фронт лесного пожара. Пусть первая и вторая грани этого параллелепипеда Γ_1 и Γ_2 перпендикулярны оси x , которая направлена в сторону ветра; нижняя и верхняя грани Γ_0 и Γ_3 перпендикулярны оси z , направленной вертикально вверх; боковые грани Γ_4 и Γ_5 перпендикулярны оси y . Начало отсчета системы x, y, z расположено в точке максимума температуры первоначального очага горения. Тогда на границах $\Gamma_1, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ параметры состояния среды совпадают с невозмущенными значениями:

$$\vec{v}|_{\Gamma_i} = \vec{v}_e, T|_{\Gamma_i} = T_e, T_s|_{\Gamma_i} = T_{se}, \quad (4.38)$$

$$C_{\alpha}|_{\Gamma_i} = C_{\alpha e}, \varphi_i|_{\Gamma_i} = \varphi_{ie}, i = 1, 3, 4, 5, \quad (4.39)$$

где индекс "е" соответствует невозмущенным параметрам среды.

На границе Γ_2 необходимо использовать так называемые мягкие граничные условия:

$$\left. \frac{\partial T_s}{\partial x} \right|_{\Gamma_2} = \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{\Gamma_2} = 0, \left. \frac{\partial C_\alpha}{\partial x} \right|_{\Gamma_2} = 0, \left. \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right|_{\Gamma_2} = 0, \quad (4.40).$$

Поскольку тепловые и диффузионные потоки в почву заведомо меньше соответствующих значений тепловых и диффузионных потоков в приземный слой атмосферы, то на подстилающей поверхности Γ_0 можно использовать следующие граничные условия

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{\Gamma_0} = 0, \left. \frac{\partial T_s}{\partial z} \right|_{\Gamma_0} = 0, \left. \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right|_{\Gamma_0} = 0, v_1|_{\Gamma_0} = 0, \rho v_3|_{\Gamma_0} = f_0, \quad (4.41).$$

Здесь $z = x_3$, $v_1 = v_x$, $v_2 = v_y$, $v_3 = v_z$, а f_0 – величина массовой скорости горения на почвенного покрова.

Для спектральной плотности излучения граничные условия имеют вид:

$$q_{Rvni}|_{\Gamma_i} = -\frac{cU_v}{2} \Big|_{\Gamma_i}, \quad i = 1, 3, 4, 5, \quad (4.42)$$

$$q_{Rvni}|_{\Gamma_0} = \begin{cases} \varepsilon_v B_v(T_{ГН}), M \in G_\Gamma \\ \varepsilon_v B_v(T_e), M \notin G_\Gamma \end{cases}$$

Здесь M – любая точка в зоне пожара; G_Γ – область пространства, соответствующая очагу горения; B_v – спектральный коэффициент излучения; индекс Γ_0 относится к параметрам среды в очаге пожара. Первое из условий (4.42) является условием прозрачности среды, а второе характеризует излучение очага низового лесного пожара.

В случае распространения лесного пожара от очага горения конечных размеров начальные условия имеют вид:

$$T_s = T|_{t=0} = \begin{cases} T_{ГН} & \text{при } M \in G_\Gamma, \\ T_e & \text{при } M \notin G_\Gamma; \end{cases} \quad c_\alpha|_{t=0} = \begin{cases} c_{aГН} & \text{при } M \in G_\Gamma \\ c_{ae} & \text{при } M \notin G_\Gamma \end{cases}, \quad (4.43)$$

$$\Phi_i|_{t=0} = \begin{cases} \Phi_{ГН} & \text{при } M \in G_\Gamma, \\ \Phi_{ie} & \text{при } M \notin G_\Gamma; \end{cases} \quad \bar{v}|_{t=0} = \begin{cases} \bar{v}_{ГН} & \text{при } M \in G_\Gamma \\ \bar{v}_{ie} & \text{при } M \notin G_\Gamma \end{cases}, \quad (4.44)$$

Поскольку граничные условия должны отражать геометрические и физико-химические особенности задач теории лесных пожаров, они задаются для каждой конкретной задачи в отдельности. Лес является, как правило, многоярусной системой. Поэтому на границах отдельных ярусов, которые представляют разрывы структуры лесного фитоценоза, целесообразно использовать сопряженные граничные условия:

$$(\rho w)|_{z=h+0} = (\rho w)|_{z=h-0} + \left(\sum_{i=1}^5 s_i^{-1} R_{is} \right) |_{z=h} , \quad (4.45),$$

$$\left(\mu_{3TM} \frac{\partial u}{\partial z} \right) |_{z=h+0} = \left(\mu_{3TM} \frac{\partial u}{\partial z} \right) |_{z=h-0} , \quad (4.46),$$

$$\left(\mu_{3TM} \frac{\partial v}{\partial z} \right) |_{z=h+0} = \left(\mu_{3TM} \frac{\partial v}{\partial z} \right) |_{z=h-0} , \quad (4.47),$$

$$\left(\mu_{3TM} \frac{\partial w}{\partial z} \right) |_{z=h+0} = \left(\mu_{3TM} \frac{\partial w}{\partial z} \right) |_{z=h-0} , \quad (4.48),$$

$$\left(\lambda_{3TM} \frac{\partial T}{\partial z} + q_{RZ}^{(s)} \right) |_{z=h+0} = \left(\lambda_{3TM} \frac{\partial T}{\partial z} \right) |_{z=h-0} , q_{RZ}^{(s)} = \varphi q_{RZ\Sigma} , \quad (4.49),$$

$$\left(\rho D_{3TM} \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) |_{z=h+0} + R_{\alpha w} = \left(\rho D_{\alpha 3TM} \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} \right) |_{z=h-0} , \quad (4.50),$$

$$R_{\alpha w} = \sum_{i=1}^3 s_i^{-1} R_{is} c_{i\alpha s} |_{z=h} ;$$

$$\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=h+0} + q_{RSz} \Big|_{z=h+0} + \sum_{i=1}^3 q_i s_i^{-1} R_{is} = \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \Big|_{z=h-0} + q_{RSz} \Big|_{z=h-0} , \quad (4.51),$$

$$q_{RZs} = (1 - \varphi) q_{RZ\Sigma} , q_{Rz} \Big|_{z=h+0} = q_{Rz} \Big|_{z=h-0} , \quad (4.52),$$

$$T \Big|_{z=h+0} = T \Big|_{z=h-0} , c_\alpha \Big|_{z=h+0} = c_\alpha \Big|_{z=h-0} , U_R \Big|_{z=h+0} = U \Big|_{z=h-0} , \quad (4.53),$$

$$u|_{z=h+0} = u|_{z=h-0}, \quad v|_{z=h+0} = v|_{z=h-0}, \quad w|_{z=h+0} = w|_{z=h-0}, \quad (4.54).$$

Здесь и выше h – высота расположения структурного разрыва; u, v, w – компоненты скорости; $q_{RZ\Sigma}$ – проекция интегральной плотности лучистого теплового потока на ось z ; $\mu_{\alpha TM}, \lambda_{\alpha TM}, D_{\alpha\alpha TM}$ – эффективные значения коэффициентов динамической вязкости, теплопроводности и диффузии газодисперсной фазы; $q_{RZ}^{(s)}$ и q_{RZS} – проекции на ось z векторов интегральных плотностей лучистых тепловых потоков в газодисперсной и конденсированной фазах; s_i – удельная поверхность i -го компонента конденсированной фазы; $c_{i\alpha S} = v'_{i\alpha} M_{\alpha} / v_{is} M_{is}$ – коэффициенты эмиссии α -компонента в i -й реакции в конденсированной фазе; v_{is} и $v'_{i\alpha}$ – стехиометрические коэффициенты исходного конденсированного вещества и газодисперсного α – продукта в i -ой реакции; M_{is} и M_{α} – молекулярные массы исходного конденсированного вещества и газодисперсного α – компонента.

Граничные условия (4.45) – (4.54) связывают параметры состояния среды и потоковые величины по обе стороны структурного разрыва, поэтому их целесообразно называть условиями сопряжения, или сопряженными граничными условиями. Они обобщают известные граничные условия четвертого рода [106], которые были предложены А.В. Лыковым при решении сопряженных задач теории теплопроводности для однородных инертных сред.

С помощью условий сопряжения и некоторых дополнительных соображений можно получать различные граничные условия. Например, предполагая, что температура слоя напочвенного покрова при низовом лесном пожаре не зависит от z , а спектральный коэффициент поглощения α_s для ЛГМ известен, получаем:

$$(c/3\alpha) \frac{\partial U_{Rv}}{\partial z} \Big|_{z=h_0+0} = \frac{1}{\sqrt{3}} (4\sigma T^4 f - cU_{Rv}) \Big|_{z=h_0-0}, \quad (4.55),$$

где c – средняя скорость света; $f = 1 - \exp(-\alpha_{sv} \cdot h_0 \sqrt{3})$, α_v, α_{sv} – спектральные коэффициенты поглощения излучения в среде над очагом низового лесного пожара и в напочвенном покрове; h_0 – высота напочвенного покрова; z – вертикальная координата, отсчитываемая от нижней границы напочвенного покрова.

Полученное условие выгодно отличается от условий (4.27) тем, что оно не содержит эмпирически определяемой величины ϵ_v .

4.10. Математическая модель торфяных пожаров второго поколения

Известно, что наряду с лесными пожарами огромный ущерб окружающей среде и людям приносят торфяные пожары. Для тушения этих пожаров отсутствуют эффективные методы, и поэтому привлечение больших материальных и людских сил для тушения торфяников в Московской области летом 1972 г. и летом 2002 г. не привело к успеху.

Поэтому представляет интерес математическое моделирование торфяных пожаров для исследования закономерностей их распространения и определения предельных (критических) условий, при создании которых горение торфа прекращается.

Известно, что торф является продуктом неполного разложения растительных материалов в условиях избыточной влажности и недостаточной аэрации [107, 108]. Поэтому его в процессе торфяного пожара можно моделировать пористой многофазной реакционноспособной средой. В составе торфа 56% углерода, 36% кислорода, 6% водорода и 2% азота. В отличие от верховых пожаров при горении торфяников в порах, очевидно, не образуются достаточно крупные горящие частицы, а дисперсная среда состоит из частичек дыма, размер которых значительно меньше радиуса пор. Вместе с тем, имея в виду особенности процессов переноса при пожарах на торфяниках, можно сделать следующие упрощающие предположения:

1. Торфяник является двухтемпературной горючей недеформируемой пористо-дисперсной средой, состоящей из следующих фаз: φ_1 – сухое горючее органическое вещество¹; φ_2 – вода, связанная с этим веществом; φ_3 – коксик (твердого продукта пиролиза торфа); φ_4 – зола; φ_5 – газовая фаза; φ_6 – частицы сажи; φ_7 – частицы дыма и φ_8 – капельки воды.

2. Скорость и температура дисперсных частиц совпадают со скоростью и температурой несущей газовой фазы в соответствующей точке пространства.

3. Газодисперсная фаза состоит из тех же компонентов, что и в общей физико-математической модели лесных пожаров.

4. Силы инерции в уравнении движения газовой фазы малы по сравнению с силой давления, и уравнения сохранения количества движения можно использовать в форме квадратичного закона Дарси [109].

5. Влиянием обмена энергией между газовой фазой в порах с дисперсными частицами дыма можно пренебречь по сравнению с теплообменом со стенками макропор, а последний (теплообмен) учитывается выбором коэффициента объемной теплоотдачи.

6. Температура газовой фазы совпадает с температурой дисперсных частиц.

С учетом сделанных допущений и результатов, полученных в [5] и разделе 4.4, имеем следующую систему уравнений:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_j}{\partial x_j} = Q, \quad j=1,2,3, \quad (4.56)$$

$$\varphi \overrightarrow{\text{grad}} p = - \left(\frac{\mu}{k_s} + \beta_s \frac{\rho |\vec{v}|}{\sqrt{k_s}} \right) \vec{v} + \rho \vec{F}, \quad \varphi = \sum_{i=5}^8 \varphi_i, \quad (4.57)$$

$$\frac{dT}{dt} \sum_{i=5}^8 \rho_i \varphi_i c_{pi} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{\text{эТМ}j} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial T}{\partial x_j} \left(\rho \sum_{\alpha=1}^N D_{\text{эТМ}\alpha} C_{p\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) +$$

¹ Сухое органическое вещество состоит из лигнина и целлюлозы.

$$\begin{aligned}
& +\alpha_v(T_s - T) + c_{ps}(T_s - T)(1 - \alpha_c)R_{1s} + c_{p7}(T_s - T)R_{2s} + \\
& + q_{3s}R_3^{(s)} + q_{52}R_{52} + q_{53}R_{53} + q_{54}R_{54} + q_{2s}(R_{8-}^{(s)} - R_{8+}^{(s)}), \quad (4.58),
\end{aligned}$$

$$\rho \frac{d_\alpha c_\alpha}{dt} = R_\alpha + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D_{3TM\alpha} \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j} \right) - c_\alpha Q, \quad \alpha = 1, 2, \dots, N, \quad (4.59),$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda_{sj} \frac{\partial T_s}{\partial x_j} \right) + q_{1s}R_{1s} - q_{2s}R_{2s} + q_{3s}R_{3s} + \alpha_v(T - T_s), \quad (4.60),$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_{1s}, \quad \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_{2s}, \quad (4.61),$$

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_{1s} - \frac{M_C}{M_1} R_{3s} - \alpha_4 R_{3s} - R_6^{(s)}, \quad \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_4 R_{3s} - R_7^{(s)}, \quad (4.62),$$

$$\sum_{\alpha=1}^8 c_\alpha = 1, \quad \sum_{i=1}^8 \varphi_i = 1, \quad P = \rho_r RT \sum_{\alpha=1}^{N_r} \frac{c_{ar}}{M_\alpha}, \quad N_r = N - 3, \quad (4.63),$$

$$Q = (1 - \alpha_c)R_{1s} + R_{2s} + \frac{M_C}{M_1} R_3 + R_6^{(s)} + R_7^{(s)} + R_8^{(s)}, \quad (4.64).$$

Здесь, как и в разделе 4.4, выбрана декартова система координат, ось z которой направлена вертикально вверх; $\rho = \sum_{i=5}^8 \rho_i \varphi_i$ – плотность газодисперсной смеси в порах пласта торфа; $\rho_r = \rho - \rho^{(s)}$ – плотность газа в порах; $\rho^{(s)}$ – плотность дисперсных частиц в порах; c_{par} / ρ_r – массовая концентрация α -компонента газовой фазы в порах; k_s – коэффициент проницаемости торфа; β_s – эмпирический коэффициент в квадратичном законе сопротивления при фильтрации [83], а остальные обозначения полностью соответствуют разделу 3.

В отличие от уравнений, приведенных в разделе 4.4, уравнение сохранения количества движения записано в виде закона Дарси [83].

Надо сказать, что в данном случае использована гиперболическая форма уравнений сохранения массы газовой и дисперсной фаз, а все потоковые величины определяются по формулам, данным выше с учетом того, что $T = T^{(s)}$.

4.11. База данных общих математических моделей лесных и торфяных пожаров и методики численного решения задач

В основную систему уравнений (4.2) – (4.11), граничные и начальные условия входят теплофизические коэффициенты, скорости сушки и реакций пиролиза и горения и множество эмпирических постоянных, совокупность которых представляет базу данных общей математической модели. Компоненты базы данных определялись, с одной стороны, из литературных источников, а с другой стороны, на основе экспериментальных исследований с помощью решения обратных задач механики реагирующих сред [102]. Очень важно, чтобы все компоненты базы данных были согласованы друг с другом. Это осуществлялось методом их варьирования в пределах их точности и выбора из условия наилучшего согласования соответствующих расчетных и экспериментальных данных. Очень важно при этом, чтобы решение прямых и обратных задач математической теории лесных пожаров при численном решении определялось с контролируемой точностью, что представляет собой сложную математическую задачу, так как основная система уравнений (4.2) – (4.11) не линейна. В [83, 84] для численного решения прямых задач теории лесных пожаров использовались разработанные в ТГУ итерационно – интерполяционный метод [110] и специальные методики численного счета [98, 111 – 120], основанные на применении метода Патанкара – Сполдинга [114].

В систему уравнений (4.56) – (4.64), представленную в разделе 4.10, входит ряд параметров, которые характерны только для торфяных пожаров (k_s , β_s коэффициенты теплопроводности и диффузии, теплофизические и термокинетические коэффициенты). К сожалению, из-за ограниченности полноценных экспериментальных данных по возникновению и распространению торфяных лесных пожаров значительной базы данных для математической модели (4.56) – (4.64) до сих пор нет. Поэтому расчеты проводились с использованием правдоподобных допущений о порядках величин упомянутых выше величин и коэффициентах тепло- и массообмена, использованных при записи граничных условий. В качестве основных методов решения задач теории торфяных пожаров использовались итерационно-интерполяционный метод [111] и некоторые приближенные аналитические методы.

4.12. Некоторые результаты математического и физического моделирования лесных пожаров

Общая математическая модель лесных пожаров использовалась многими исследователями [98, 110 – 112] для решения ряда задач математической теории лесных пожаров.

К сожалению, приходится констатировать, что существующая в настоящее время база данных еще недостаточна для всестороннего количественного анализа процесса распространения верховых и низовых лесных пожаров.

Тем не менее, уже сейчас на основе полученных численных и аналитических результатов можно сделать следующие выводы:

1. Большой лесной пожар представляет собой принципиально нестационарный и трехмерный аэротермохимический процесс, в котором значительную роль играет сила Кориолиса [83].

2. Полное физическое моделирование лесных пожаров невозможно без полного совпадения характеристик природы и модели [83].

3. Типы лесных пожаров удается идентифицировать при помощи таких существенных критериев подобия, как числа Струхала, Фруда, Кориолиса, Рейнольдса, безразмерного вдува и безразмерной температуры во фронте горения [83, 84].

4. В результате численного решения плоских двумерных задач аэродинамики лесных пожаров установлено, что при взаимодействии ветра с вдуваемыми из фронта лесного пожара нагретыми продуктами горения имеют место два предельных типа течения: однонаправленное (струйный пограничный слой) и конвективная колонка (наклонная струя нагретых газодисперсных продуктов сгорания). Для последнего типа течения перед фронтом лесного пожара реализуется крупный торoidalный вихрь (см. рис. 4.8, 4.9), в результате чего скорости потока вблизи подстилающей поверхности и в приземном слое атмосферы имеют разное направление, причем скорость ветра вблизи фронта лесного пожара в приземном слое атмосферы увеличивается [84, 111 – 113].

5. Численно показано, что напряжение трения перед фронтом пожара резко падает, а тепловой поток меняет знак, что свидетельствует о том, что однонаправленное течение и теплоперенос в приземном слое атмосферы в окрестности фронта пожара при значительной скорости ветра имеют характер тепловой завесы (см. рис. 4.10). Установлено, что в этом случае свободная конвекция нагретых продуктов горения относительно слабо влияет на величину конвективного теплового потока перед фронтом пожара [83, 115 – 118].

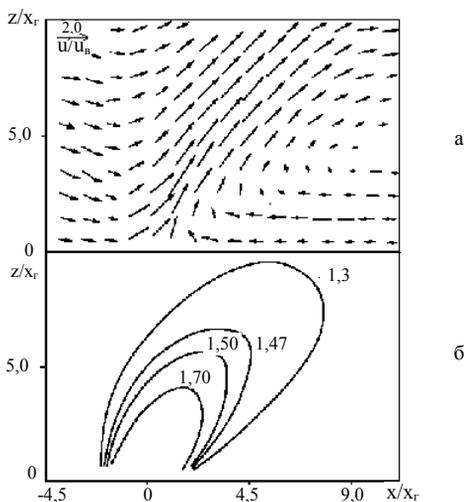


Рис. 4.8. Поле скоростей (а) и изотермы (б) над плоским фронтом лесного пожара при наклонной конвективной колонке [84]:

U_n – скорость ветра на высоте 10 м вдали от фронта пожара.

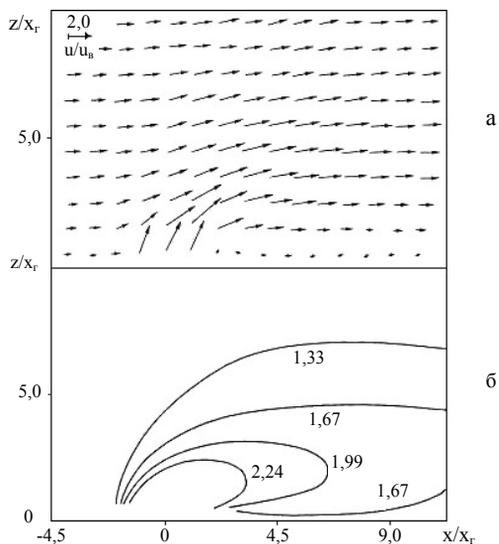


Рис. 4.9. Поле скоростей (а) и изотермы (б) над плоским фронтом лесного пожара при струйном пограничном слое (течение типа "плюмаж") [84]:

U_n – скорость ветра на высоте 10 м вдали от фронта пожара.

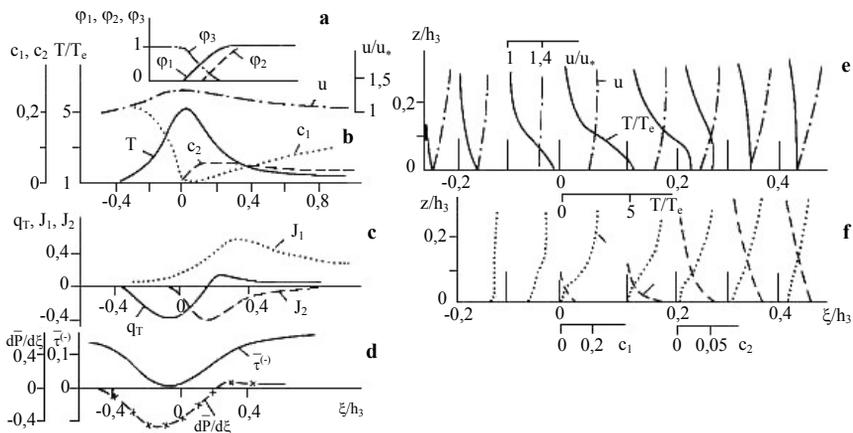


Рис. 4.10. Профили параметров состояния среды во фронте вершинного пожара и в приземном слое атмосферы над ним [112]

6. Исследованы закономерности распространения горящих частиц перед фронтом пожара. Показано, что с ростом скорости ветра, угла вылета и температуры частиц дальность их полета возрастает, а с ростом их размера и плотности – убывает [115, 118].

7. В результате численного решения задачи аэродинамики осесимметричного лесного пожара показано, что в его окрестности имеет место крупный тороидальный вихрь, обеспечивающий тепло- и массообмен зоны горения с внешней средой (см. рис. 4.11). Численно, с использованием точной К-ε-модели турбулентности, показано, что для описания установившихся турбулентных течений может быть использована равновесная К-ε-модели турбулентности (модифицированная модель Прандтля), а для неустановившихся течений использование упрощенной модели приводит к значительным погрешностям в определении полей скорости и температуры [98].

8. В рамках теории термиков численно показано, что на траекторию центра масс термика, возникающего при лесном пожаре, значительное влияние оказывает сила Кориолиса [119, 120].

9. Предложена самосогласованная математическая модель верховых лесных пожаров, точно в рамках законов сохранения массы, импульса и энергии учитывающая тепло- и массообмен между приземным слоем атмосферы и пологом леса во время лесного пожара. В результате численного решения задачи о возникновении и распространении верхового пожара получена та же структура фронта, что и в опытах, и установлено, что горение во фронте пожара носит диффузионный характер, т. е. лимитируется притоком окислителя и газообразных горючих продуктов пиролиза в зону горения. Показано, что основное количество энергии в этой зоне выделяется при горении газообразных продуктов пиролиза [84, 117, 121].

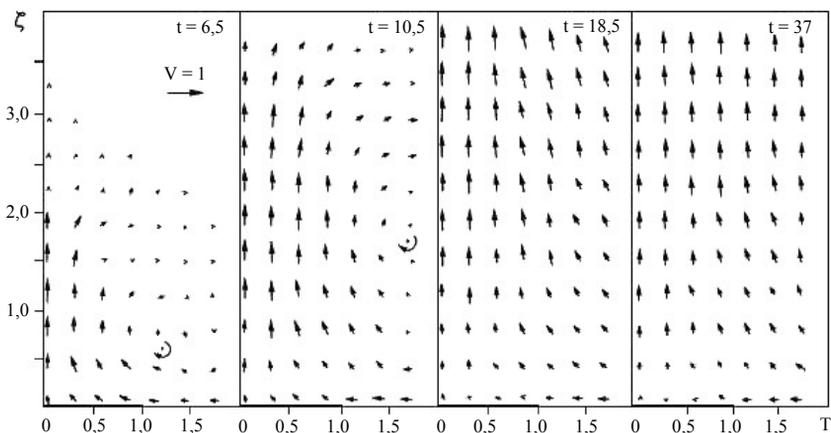


Рис. 4.11. Безразмерные векторные поля скорости в различные моменты времени над круглым в плане очагом лесного пожара (жирной чертой по оси абсцисс указан размер очага) [98]

10. Теоретически, методом малых возмущений [122] и численно исследована устойчивость контура лесного пожара с учетом сложной структуры его фронта. Доказано, что контур лесного пожара абсолютно неустойчив по отношению к малым возмущениям. Для больших лесных пожаров, когда поперечный размер очага пожара превышает некоторую величину, контур теряет первоначальную форму и становится выпукло-вогнутым (см. рис. 4.12). Этот результат согласуется с данными наблюдений за реальными лесными пожарами [84, 124].

11. Методом малых возмущений и численно установлено, что существуют предельные условия распространения лесных пожаров по запасу и влагосодержанию ЛГМ, скорости ветра и скорости тепло- и массообмена [84, 86, 90, 123 – 127].

12. В результате математического и физического моделирования процессов тепло- и массопереноса в лесном фитоценозе во время лесного пожара показано, что для вершинных верховых лесных пожаров, распространяющихся в продуваемых лесных фитоценозах, основное количество энергии из фронта пожара в фитоценоз передается за счет вынужденной конвекции (ветра), в результате которой факел пламени сильно отклоняется от вертикали (см. рис. 4.13), а для низовых и повальных верховых лесных пожаров большое значение имеет перенос энергии излучением [84, 114, 119, 123].

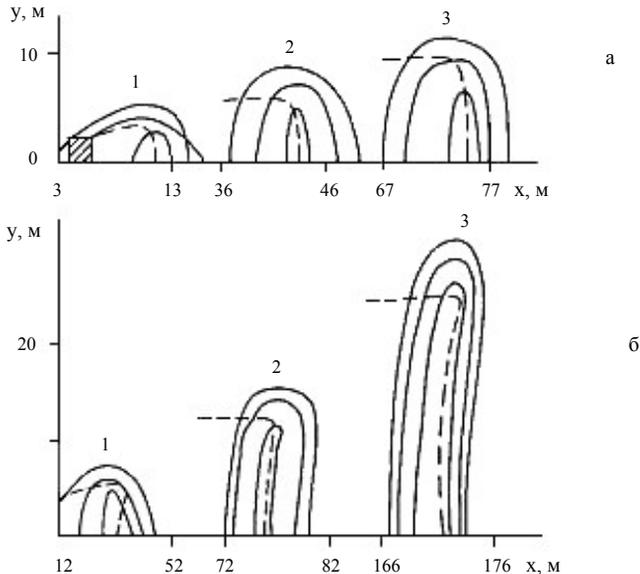


Рис. 4.12. Изотермы во фронте верхового лесного пожара [122]:

а – $u_{z_0} = 2$ м/с; $W = 0,6$ ($1 - t = 7$ с, $\omega_x = 1,3$ м/с, $\omega_y = 0,7$ м/с; 2, 3 – $t = 30$ и 50 соответственно, $\omega_x = 1,5$ м/с, $\omega_y = 0,1$ м/с);
 б – $u_{z_0} = 5$ м/с, $W = 0,4$ ($1 - t = 8$ с, $\omega_x = 3,6$ м/с, $\omega_y = 0,5$ м/с; 2 – 20 с, $3,6$ м/с, $0,5$ м/с; 3 – 50 с, $3,5$ м/с, $0,5$ м/с).



Рис. 4.13. Фронт павального верхового пожара, распространяющегося по лесной полосе из соснового молодняка. Ширина полосы 3 м, длина 10 м, высота соснового древостоя 3,5 м, напочвенный покров – слой лишайника *Cladonia* толщиной 0,1 м

13. В результате упрощающих допущений получены приближенные аналитические формулы для скорости распространения низовых и верховых лесных пожаров, плотности суммарного теплового потока и ширины фронта лесного пожара, которые удовлетворительно согласуются с результатами численных расчетов [126, 127].

14. Численно и аналитически установлено, что лесопожарные заслоны более эффективны в противопожарном отношении, чем лесопожарные разрывы [118, 128].

15. В результате математического моделирования перехода низового лесного пожара в верховой было установлено, что для соснового древостоя это явление имеет место при высоте нижней границы крон деревьев над высотой почвенного покрова около 0,7 м при условии, что удельный тепловой импульс в полог леса не меньше 2600 кДж/м^2 . Это согласуется с экспериментальными данными [113]. Установлено, что коэффициент излучения ϵ является функцией времени, которая параметрически зависит от лесопирологических свойств низового пожара и лесных фитоценозов. Показано, что зажигание полога леса носит газофазный характер, а игнорирование двухтемпературности среды в пологе леса приводит к уменьшению критической высоты полога леса на 40 – 50% [113].

16. С помощью математического моделирования установлено, что в зависимости от расстояния между лесными массивами и источником светового излучения реализуются три режима зажигания: вырожденный (кривые 1 на рис. 4.14), нормальный (кривые 2 на рис. 4.14) и невоспламенение (кривые 3 на рис. 4.14) [112, 130, 131]. В результате расчетов были получены времена зажигания, которые меньше соответствующих значений времен прихода взрывной волны на подстилающую поверхность, что согласуется с результатами обследования территории Хиросимы и Нагасаки после ядерной бомбардировки в 1945 г. и района падения Тунгусского метеорита в 1908 г.

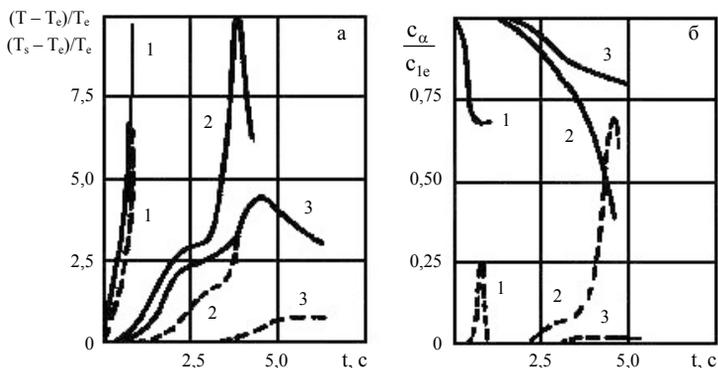


Рис. 4.14. Изменение температур T и T_s фаз (а) и массовых концентраций (C_1 – концентрация кислорода, C_2 – концентрация окиси углерода) (б) на верхней границе полога леса:

а) штриховая линия – T , сплошная – T_s ; б) сплошная линия – C_1 , штриховая – C_2 ; m : 1 – 0; 2 – 4000; 3 – 6000.

17. Показано, что для техногенных катастроф (воздушный ядерный взрыв) контур зажигания для однородного лесного массива имеет форму окружности с центром в эпицентре взрыва [131], а для природных (катастроф от столкновений) форма контура зажигания отличается от окружности [130]. В частности, в согласии с данными наблюдений, форма контура зажигания при взрыве Тунгусского метеорита представляет собой совокупность дуги окружности с дугой эллипса, большая полуось которого вытянута в сторону движения метеорита [130] (см. рис. 4.15). Параметрический анализ решения этих задач показал, что площадь S_* области зажигания растет с ростом полной энергии, выделившейся при катастрофе, и доли энергии S_H , превратившейся в излучение. Установлено, что с использованием общей математической модели удастся получить S_* , которая удовлетворительно согласуется с результатами исследования зоны падения Тунгусского метеорита. В результате математического моделирования было установлено, что зажигание ЛГМ носит газофазный характер, т. е. воспламеняются газообразные продукты пиролиза лесных горючих материалов. Причем при зажигании газообразные продукты пиролиза полностью не выгорают. Часть из них под действием массовой силы всплывает навстречу падающей ударной волне и взрывается при взаимодействии с ней. Оценки, выполненные по известным данным для Тунгусского небесного тела, показали [130], что до 20% регистрируемой энергии взрыва может обеспечиваться в результате взрыва газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ. Аналогичный вывод был сделан при исследовании зажигания лесных массивов при ядерных взрывах [131].

18. Теоретически [132, 134] и экспериментально [133, 135] обнаружен эффект усиления ударных волн при взаимодействии с зоной пиролиза фронта лесного пожара. Этот эффект объясняется взрывом смеси газообразных продуктов пиролиза с воздухом и открывает новые возможности для борьбы с лесными пожарами.

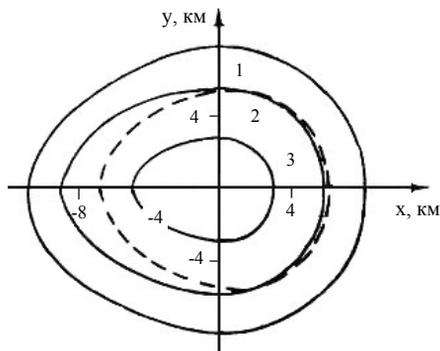


Рис. 4.15. Контуры зон зажигания для различных лесов в районе падения Тунгусского тела:

1 – 6,4 с, 2 – 5,0 с, 3 – 4,3 с (сплошные линии для хвойных, а штриховые – для лиственных лесов).

19. Исследовано действие лесных пожаров на конструкционные материалы (стеклопластики) и показано, что наиболее опасны для этих конструкций повалые верховые лесные пожары [136].

20. С использованием основных понятий и результатов физико-математической теории лесных пожаров разработаны методики расчета выбросов вредных веществ при лесных пожарах и горении нефти, разлитой на растительности [137, 138].

21. В результате комплексных теоретико-экспериментальных исследований найдены предельные условия возникновения и распространения низовых лесных пожаров для некоторых типов лесных горючих материалов [139 – 143].

22. Экспериментально установлено, что в результате действия верховых и низовых лесных пожаров происходит зажигание штабелей древесины, при горении которых возникают инфразвуковые волны.

23. Экспериментально установлено, что колебания элементов лесных горючих материалов по-разному влияют на процессы их воспламенения и горения в зависимости от частоты и амплитуды колебаний [145, 146].

24. Экспериментально исследован процесс низкотемпературной ($291 \text{ K} \leq T \leq 302 \text{ K}$) сушки слоя лесных горючих материалов в дозвуковой аэродинамической трубе МТ-324 и установлено, что если угол наклона плоскости слоя ЛГМ к горизонту меняется в пределах $0 < \alpha \leq 20^\circ$, то при ламинарном режиме его обтекания потоком воздуха со скоростью, не превышающей $v_e = 0,69 \text{ м/с}$, и плотности укладки элементов ЛГМ $44,5 \text{ кг/м}^3 \leq \rho_s \leq 111 \text{ кг/м}^3$ угол наклона α , скорость потока v_e слабо влияют на скорость сушки. Экспериментально установлено, что внутри слоя ЛГМ отсутствует течение [147] воздуха. Дана общая физико-математическая постановка задачи о сушке слоя ЛГМ [148].

25. Разработана детерминированно-вероятностная модель прогноза лесной пожарной опасности [149] и упрощенная математическая модель для сушки слоя ЛГМ [150].

4.13. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными

Известно, что критерием истинности теоретических результатов является их согласование с данными наблюдений за характеристиками реальных лесных пожаров. Поэтому целесообразно сравнить теоретические результаты с экспериментальными данными. Как уже отмечалось выше, результаты математического прогноза радиуса зажигания лесных массивов при взрыве Тунгусского небесного тела неплохо согласуются с данными наблюдений. Отмечается, по крайней мере, качественное согласование типов течений, возникающих при лесных пожарах [161 – 163], с результатами математического моделирования полей скоростей и температур в зоне лесного пожара, которые представлены выше. В работе [151] дана общая кривая зависимости скорости распространения верхового пожара от скорости ветра, которая получена на основе обработки литературных данных по пожарам разных типов, в том числе и верховых. Надо сказать, что экспериментальных данных по верховым лесным пожарам мало. В частности, при невозмущенной скорости ветра на высоте 10 м $u_{\infty} = 18$ м/с; плотности сухого органического вещества $\rho_c = 0,2$ кг/м³ и влагосодержании $W = 66,6\%$ расчетное значение нормальной скорости распространения $\omega_n = 5,8$ м/с согласуется с экспериментальным значением $\omega_n = 6$ м/с. При $u_{\infty} = 27$ м/с расчетное значение $\omega_n = 7,2$ м/с, а экспериментальное 6,8 м/с [151]. Неплохое согласование наблюдается и с результатами некоторых зарубежных исследований, которые приведены в обзоре [79].

Сравнение опытных профилей температуры для верховых лесных пожаров с теоретическими кривыми показало, что, с учетом точности задания исходных данных, эти результаты удовлетворительно согласуются друг с другом. В то же время следует подчеркнуть, что математическое моделирование дает только осредненные по Рейнольдсу (но не действительные) значения параметров состояния среды и скорость распространения пожара. В [130] показано, что максимальная величина площади, ограниченной контуром зажигания, и форма контура согласуются с результатами обследования места падения Тунгусского метеорита.

Таким образом, общая математическая модель верховых лесных пожаров позволяет достаточно точно прогнозировать скорость распространения верхового лесного пожара и поля осредненных по Рейнольдсу параметров состояния среды. Однако в рамках ее нельзя воспроизводить флуктуации скорости и других параметров состояния среды в зоне лесного пожара.

На основе общей математической модели лесных пожаров удалось дать новую общую постановку задачи о сушке слоя ЛГМ с учетом сопряженного тепло- и массообмена этого слоя с атмосферой. Сравнение результатов расчетов, полученных на основе этой математической постановки задачи, показало, что эти результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [152].

4.14. Некоторые результаты исследования торфяных лесных пожаров

Основные результаты научных исследований, полученных в Томском государственном университете по проблеме моделирования лесных пожаров, состоят в следующем:

1. Разработаны общие математические модели торфяных лесных пожаров первого [83] и второго (раздел 4.10) поколения, в рамках которых учитываются известные экспериментальные данные по исследованию торфяных пожаров [107, 151].
2. Разработаны упрощенные двух- и трехфронтные модели для одномерного нестационарного распространения процесса горения на торфяниках.
3. С использованием математической модели торфяных пожаров [83], итерационно-интерполяционного метода [110] и метода осреднения уравнений по толщине торфяной залежи была решена задача о стационарном распространении фронта торфяного пожара. Было установлено, что структура фронта торфяного пожара в качественном отношении совпадает со структурой фронта лесного пожара и горение носит диффузионный характер, т. е. лимитируется притоком окислителя. Расчеты показали, что скорость распространения ω сильно зависит от начальной пористости торфа и коэффициента массообмена с окружающей средой, и с ростом этих величин ω растет вследствие наличия запаса кислорода в порах и притока O_2 во фронт торфяного пожара из приземного слоя атмосферы.
4. В результате математического моделирования исследованы основные закономерности распространения торфяных лесных пожаров [155 – 157]. Показано, что при инициировании горения торфяника источником повышенной температуры для одних значений коэффициентов тепло- и массообмена, описывающих взаимодействие слоя горящего торфа с атмосферой и с инертной почвой, на которой расположен этот слой, может возникнуть поверхностное горение торфа вблизи границы раздела "атмосфера – горящий слой торфа", а для других – волна тления уходит в глубь торфяника [156].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги. Итак, за последние примерно пятнадцать лет в России создана и функционирует трехуровневая система спутникового мониторинга лесных пожаров, базирующаяся на группировке метеорологических спутников NOAA (США). Практически все леса России в пожароопасные периоды могут контролироваться как минимум одной из этих систем. Центральное место среди них занимает Федеральная ГИС "Авиалесоохрана".

В ее состав в качестве источников оперативной информации входят данные, поступающие с двух станций, размещенных в г. Москве и в г. Иркутске. Эта геоинформационная система в оперативном и автоматическом режиме дает возможность практически всем службам лесоохраны страны получать сведения о действующих и вновь обнаруженных (по данным прибора AVHRR) пожарах, о состоянии облачности, дымовых шлейфах и другую информацию, требующуюся для принятия эффективных решений в службах лесоохраны.

Ведомственные системы спутникового мониторинга (например, региональный центр ГОиЧС в г. Красноярске), решая те же задачи, что и система федерального уровня, обеспечивает регион своих полномочий соответствующими сведениями, повышая надежность и оперативность системы в целом.

Наконец, системы нижнего, регионального уровня, кроме решения общих задач, стоящих перед не оформившейся пока официально службой спутникового мониторинга лесов России, выполняют роль естественных полигонов для совершенствования методов и средств тематической обработки аэрокосмических изображений. Именно на этом уровне ведутся интенсивные работы, направленные на повышение вероятности раннего обнаружения малоразмерных очагов пожаров, на прогноз пожарной опасности, на уменьшение вероятностей ложных тревог, на повышение точности оценки ущерба, нанесенного пожарами окружающей среде и лесному хозяйству, в частности на создание прогностических моделей возникновения и развития действующих пожаров.

Завершить этот раздел, говоря об основных итогах работы по созданию системы спутникового мониторинга лесных пожаров в России, можно словами сотрудника ЗапСибРЦПОД В.А. Ткаченко: "Основным достижением за время работы оперативной системы "Лесной пожар" (ГИС Западно-Сибирского РЦПОД, прим. ред.) является не количество обнаруженных пожаров, даже не точность обнаружения, а изменение психологии работников лесных служб – от полного неприятия космического мониторинга до тесного сотрудничества с нами".

Проблемы. Одна из основных проблем, обусловленных отчасти тем, что существующая система спутникового мониторинга лесов России создавалась не только планоно, программно, но и инициативно, состоит в том, что в ней практиче-

ски отсутствует взаимодействие систем разного уровня как по горизонтали, так и по вертикали. Это привело к дублированию, к отсутствию обмена наиболее удачными программно-алгоритмическими решениями, к отсутствию программы развития и совершенствования системы в целом.

Поэтому, несмотря на то, что в разработке ее приняли участие высококвалифицированные специалисты в различных областях знаний (в области геоинформационных технологий и обработки изображений, лесных экосистем и физики лесных пожаров, систем дистанционного зондирования земной поверхности из космоса и оптики атмосферы), не удалось создать единый программно-информационный продукт, в котором был бы реализован в полном объеме их потенциал.

Началом реального формирования этого взаимодействия можно считать XI International Conference IBFRA и Workshop GOEFC, проходившую в г. Красноярске в 2002 г., хотя такие попытки предпринимались и ранее (например, в 2001 г. на VIII Международном симпозиуме "Оптика атмосферы и океана. Атмосферная физика", г. Иркутск).

При разработке геоинформационных систем спутникового мониторинга лесов России в целом и ее регионов недостаточное внимание уделено вопросам создания подсистем прогноза степени пожарной опасности лесов, и пока нет примеров действующих подсистем прогноза возникновения и развития реальных пожаров.

Не менее важная и не решенная пока проблема связана с корректным сравнением эффективности и с верификацией встроенных в системы различных уровней алгоритмов обнаружения и оценки площадей лесных пожаров. Это очень серьезная работа, требующая объединения усилий специалистов из различных центров спутникового мониторинга лесов, с выполнением комплексной программы наземных подспутниковых экспериментов, физического и математического моделирования.

Перспективы. Ближайшие задачи, стоящие перед разработчиками наземного сегмента систем спутникового мониторинга лесов России, обусловлены как нерешенными пока проблемами, так и новыми возможностями спутниковой аппаратуры. Это связано с запуском новой серии спутников (NASA, USA) Terra и Aqua, оснащенных более современной и соответствующей природоресурсным и природоохранным задачам аппаратурой, чем группировка метеорологических спутников NOAA.

Поэтому, по мнению авторов, перспективы совершенствования системы спутникового мониторинга лесных пожаров России связаны с решением двух блоков задач. Первый из них включает в себя следующие направления работ:

- построение общих подходов к схеме хранения и доступа к базе данных тепловых аномалий (hotspots);
- разработка общего подхода к представлению результатов сравнительного анализа, состава материалов и продуктов валидации;
- создание Интернет-приложения для отображения результатов сравнения детектирования тепловых аномалий (hotspots);
- разработка единого подхода к схеме получения, предварительной обработки и хранения данных спутниковых наблюдений MODIS;
- формирование региональной сети тестовых регионов для сбора данных MODIS;
- создание высокоэффективных алгоритмов раннего обнаружения малоразмерных очагов пожаров, количественной оценки выбросов в атмосферу продуктов горения и ущерба, наносимого природе лесными пожарами;

- организация доступа и распространения данных на основе современных технологий (в частности использования возможностей FASTNet);
- интегрирование в систему спутникового мониторинга лесов России информационных продуктов (в первую очередь hotspot), получаемых в NASA;
- интегрирование данных, получаемых в российских центрах, в мировые системы мониторинга лесных пожаров.

Второй блок задач, требующих решения, связан с развитием методов и средств прогнозов возникновения пожаров (в частности, степени пожарной опасности) и их эволюции во времени и пространстве.

Проблема математического и физического моделирования лесных пожаров далеко не исчерпана. Представляет интерес исследование следующих принципиальных вопросов:

1. Учет влияния механических колебаний элементов ЛГМ на их тепло- и массообмен с окружающей средой в зоне пожара и процесс распространения фронта пожара в рамках более совершенной математической модели лесных пожаров.

2. Решение задач о возникновении и распространении лесных пожаров с учетом селективности оптических свойств ЛГМ.

3. Учет влияния турбулентности на скорости физико-химических процессов, протекающих во фронте лесного пожара (сушка, пиролиз, реакция горения газообразных и конденсированных горючих продуктов пиролиза).

4. Исследование механизма спиральной турбулентности, возникающей при определенных условиях в случае массовых лесных пожаров, и создание математической модели этого явления.

5. Разработка методики численного решения трехмерных задач реальных лесных пожаров с учетом рельефа местности, турбулентности течения и физико-химических превращений во фронте пожара.

6. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния малых энергетических воздействий на тепло- и массообмен элементов ЛГМ с окружающей средой в зоне лесного пожара.

7. Разработка методики и экспериментальное определение концентраций газообразных продуктов в зоне пиролиза реальных низовых и верховых лесных пожаров.

8. Учет влияния рельефа местности и создание теории распространения лесных пожаров в горных лесах.

9. Использование общей математической модели для создания методик раннего обнаружения и идентификации типов лесных пожаров и аэрокосмического мониторинга лесных пожаров.

10. Создание методик численного прогноза лесной пожарной опасности и экологических последствий лесных пожаров.

11. Усовершенствование методик прогноза лесной пожарной опасности и аэрокосмического мониторинга лесных пожаров.

12. Создание физико-математической теории торфяных пожаров (определение полей температур, скоростей и концентрации, исследование предельных условий возникновения и распространения пожара на торфянике и прогноз экологических последствий).

Решение этих вопросов позволит в первом приближении завершить построение математической теории лесных пожаров и использовать ее для создания как способов и средств для борьбы с лесными пожарами, так и прогнозов экологических последствий лесных пожаров. На основании имеющегося опыта исследования

задач теории лесных пожаров можно утверждать, что для их решения необходимо сочетать экспериментальные и теоретические методы исследования.

В качестве методической основы построения теории лесных пожаров целесообразно использовать механику многофазных реагирующих сплошных сред и теорию горения. В качестве основного метода исследования лесных пожаров целесообразно использовать метод математического моделирования с применением технологии распараллеливания вычислительных операций на суперкомпьютерах, что позволит существенно уменьшить затраты машинного времени и получать поле температур и другие характеристики лесного пожара в режиме, опережающем реальное время его развития.

Применение общей математической модели лесных пожаров позволит усовершенствовать методику прогноза лесной пожарной опасности, так как с помощью этой модели можно учесть такие существенные факторы, как влияние излучения Солнца, тип почвы и тип растительности на сушку слоя ЛГМ. Кроме того, в рамках этой модели можно определить поля плотности излучения над очагом лесного пожара в различные моменты времени, что в принципе позволяет создать, используя метод акад. А.Н. Тихонова и математическую теорию катастроф, новую методику обнаружения и диагностики лесных пожаров по данным аэрокосмического мониторинга.

Решение этого круга задач, с точки зрения авторов, позволит создать более совершенную систему спутникового мониторинга лесных пожаров, которая станет штатным средством, используемым в службах охраны лесов для реального управления лесными пожарами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АМИ	Априорная метеорологическая информация
АОТ	Аэрозольная оптическая толщина
ВТЗ	Высокотемпературная зона
ГИС	Географическая информационная система
ИК	Инфракрасный
ИКИ	Институт космических исследований РАН
ИКФИА	Институт космофизических исследований и аэронавтики СО РАН
ИЛ	Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН
ИОА	Институт оптики атмосферы СО РАН
ИСЗ	Искусственный спутник Земли
ИСЗФ	Институт солнечно-земной физики СО РАН
КА	Космический аппарат
КГУ	Красноярский государственный университет
ЛГМ	Лесной горючий материал
ЛП	Лесной пожар
МИЛ	Международный институт леса
ПО	Пожарная опасность
ПП	Подстилающая поверхность
РАН	Российская академия наук
РТ	Радиотепловой
РЦПОД	Региональный центр приема и обработки спутниковых данных
СКО	Среднеквадратичное отклонение
СО	Сибирское отделение
ТГУ	Томский государственный университет
ТПП	Температура подстилающей поверхности
ЦКМ	Центр космического мониторинга
ЦЭПЛ	Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН
AERONET	Aerosol Robotic Network
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
TOVS	Радиометр TIROS-TIROS Operational Vertical Sounder

ЛИТЕРАТУРА

1. Геоинформационные системы. Обзорная информация. – М.: ЦНИИГАИК, 1992. – 52 с.
2. Валендик Э.Н., Доррер Г.А., Сухинин А.И. Система дистанционного контроля и оперативного прогнозирования распространения лесных пожаров // Космические методы изучения природной среды Сибири и Дальнего Востока. – Новосибирск: Наука, 1983. – С. 136 – 155.
3. Космическая система сбора данных о Земле (КОСДАН) / Системный проект. – М.: Российское космическое агентство, 1992.
4. Forest fire fighting. The Ramses scanner. MS2i. Imageri of Informatique, 1989.
5. Sindre Landaas. Temporal and Spatial Distribution of Savanna Fires in Senegal and The Gambia, West Africa, 1989 – 1990, Derived from Multi-temporal AVHRR Night Images // The International Journal of Wild Land Fire 2(1), 1992. – P. 21 – 36.
6. Артюхин Ю.П. и др. Методы организации и проведения космовизуальных наблюдений в целях охраны лесов от пожаров / Ю.П. Артюхин, Ю.П.Семенов, В.И. Сухих, Е.А. Щетинский. – М.: МЛХ РСФСР, ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 1987.
7. Стрельцов В.А., Горелов В.А. Пути повышения эффективности космических систем исследования природных ресурсов Земли. – М.: ЦНИИГАИК, ГУГК СССР, 1990.
8. Сухинин А.И. Вероятность обнаружения лесных пожаров дистанционными методами // Лесные пожары и борьба с ними. – Красноярск: ВНИИПОМлесхоз, 1991. – С. 56 – 69.
9. Исаев А.С. и др. Отчет "Разработка геоинформационной системы и методы использования космической информации для мониторинга лесных пожаров" / А.С. Исаев, Г.Н. Коровин, Р.Р. Азметов и др., Междунар. ин-т леса. – М., 1993. – 260 с. – Регистр. № 16734678.
10. Щетинский В.Е. Организация в СССР охраны лесов от пожаров // Междунар. учеб. семинар ООН по практ. применению данных ДЗ Земли в области лесного хоз-ва. – М., 1984. – С. 9.
11. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 220 с.
12. Барталев С.А. и др. Опыт и перспективы организации оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов / С.А. Барталев, Е.А. Лулян, В.Е. Щетинский и др. // Исследование Земли из космоса. – 1998. – № 3. – С. 89 – 95.
13. Барталев С.А. и др. Организация оперативного спутникового мониторинга территории России в целях службы пожароохраны лесов / С.А. Барталев, Е.А. Лулян, В.Е. Щетинский и др. Препринт ИКИ РАН. Пр-1981. – М., 1998. – 18 с.
14. Беляев А.И. и др. Разработка ГИС мониторинга лесных пожаров в России на основе ARCVIEW GIS 3.0 и глобальной сети INTERNET / А.И. Беляев, Г.Н. Коровин, Е.А. Лулян и др. // ARCREVIEW – современные геоинформационные технологии. – 1998. – № 1 (4). – С. 6 – 7.
15. Абушенко Н.А. и др. Система сбора, обработки и доставки спутниковых данных для решения оперативных задач службы пожароохраны лесов России / Н.А. Абушенко, С.А. Барталев, А.И. Беляев и др. // Научные технологии. – 2000. – Т. 1, № 2. – С. 4 – 8.

16. Букчин М.А. и др. Первичная обработка данных метеорологических спутников на локальных станциях приема / М.А. Букчин, Е.А. Лупян, А.А. Мазуров и др. // Исследования Земли из космоса. – 1994. – № 5. – С. 112 – 117.
17. Loupian E.A. et al. Flexible System of Updating Software for Satellite Images Processing / E.A. Loupian, M.Yu. Zakharov, A.A. Mazurov, E.V. Flitman // Proc. 1st International Symposium on "Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations". – Chilton, Oxfordshire, 1995. – P. 61.1 – 61.5.
18. Loupian E.A. et al. Development of Fully Automated Systems for Satellite Data Acquisition with Remote Control over the Internet / E.A. Loupian, M.Yu. Zakharov, A.A. Mazurov et al. // 2nd International Symposium on "Reducing the Cost of Spacecraft Ground Systems and Operations". Proc. 1997. RAL Keble College. Oxford. – P. 76.1 – 76.10.
19. Лупян Е.А. и др. Система автоматического приема и архивирования спутниковых данных / Е.А. Лупян, А.А. Мазуров, А.А. Прошин и др. Препринт ИКИ РАН. Пр-1988. – М., 1998. – 19 с.
20. Абушенко Н.А. и др. Создание интегрированной многоуровневой ГИС мониторинга лесных пожаров и прогнозирования динамики лесных ресурсов / Н.А. Абушенко, А.В. Татарников, С.А. Тащилин и др. // Тезисы докладов Сибирской региональной ГИС-конференции. – М.: ГИС-Ассоциация, 2002. – С. 35 – 38.
21. Коровин Г.Н., Андреев Н.А. Авиационная охрана лесов. – М.: ВО "Агропромиздат", 1988. – 223 с.
22. The 1987 national fire-danger rating-system. USDA Forest and Range Experiment. Station, Ogden, Utah 84401, 1983.
23. Sukhinin A.I., Kashkin V.B., Ponomarev E.I. Monitoring Forest Fires in Eastern Siberia from Space // Proc. of SPIE. – Vol. 3983. – P. 206.
24. Валендик Э.Н., Кисилыхов Е.К., Сухинин А.И. Оценка пожарной опасности таежных лесов по радиотепловому излучению // Исследования Земли из космоса. – 1980. – № 3. – С. 14 – 19.
25. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. – Новосибирск: Наука, 1990. – 203 с.
26. Stocks B.J., Simard A.J. Forest fire management in Canada // Disaster Management. – 1993 – Vol. 5, № 1.
27. Пономарев Е., Сухинин А. Использование информации с ИСЗ NOAA для оценки пожарной опасности лесных территорий по условиям погоды // Профилактика и тушение лесных пожаров. – Красноярск: ВНИИПОМлесхоз, 1998. – С. 89 – 99.
28. Шикин Е.В., Борсков А.В., Зайцев А.А. Начала компьютерной графики. – М.: Диалог-МИФИ, 1993.
29. Gutman G. Garik. Vegetation Indices from AVHRR: an Update and Future Prospects // Remote Sensing of Environment. – 1991. – Vol. 35, № 2 & 3. – P. 121 – 136.
30. Курбатский Н.П. Терминология лесной пирологии / Вопросы лесной пирологии. – Красноярск, 1972. – С. 171 – 230.
31. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968.
32. Сухинин А., Пономарев Е. Оценка влагосодержания лесных горючих материалов по радиационной температуре. – Деп. в ВИНТИ 15.04.1998 г. – № 1144-B98.
33. Семенов В.И., Соличева О.И., Тикунов В.С. Геоинформатика: понятия, этапы развития // Геодезия и картография. – 1991. – № 5. – С. 35 – 37.
34. Трофимов А.М., Панасюк М.В. Геоинформационные системы и проблемы управления окружающей средой. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1984. – С. 142.
35. Сухинин А.И. // Сибирский экологический журнал. – 1996. – Т. 1. – С. 85 – 91.
36. Жданко В.А., Грищенко М.В. Метод анализа лесопожарных сезонов: Практические рекомендации. – Л.: ЛНИИЛХ, 1980.
37. Пономарев Е.И., Сухинин А.И. Использование информации с ИСЗ NOAA для пространственной оценки пожарной опасности лесных территорий // Сиб. экол. журн. – 2001. – № 5. – С. 577 – 589.
38. Kaufman Y.J. Atmospheric effects on remote sensing of surface reflectance. SPIE // Remote Sensing. – 1984. – Vol. 475. – P. 20 – 33.

39. Белов В.В., Афонин С.В., Макушкина И.Ю. Перенос ИК-изображений через атмосферу // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10, № 4 – 5. – С. 449 – 462.
40. Belov V.V., Afonin S.V. Distorting effect of the atmosphere in satellite monitoring of small-sized high-temperature anomalies // Proceedings of International Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VIII (AeroSense 2002). – Orlando, USA, 2002. Proc. SPIE. – Vol. 4725. – P. 471 – 478.
41. Белов В.В., Афонин С.В. Роль атмосферной коррекции в задаче космомониторинга малоразмерных (subpixel) высокотемпературных объектов на подстилающей поверхности // Международный симпозиум стран СНГ по атмосферной радиации "МСАР-2". – СПб., 2002. – С. 96 – 97.
42. Афонин С.В., Белов В.В. Эффективность применения спутниковых технологий для оперативного мониторинга лесных пожаров в Томской области // Исследования Земли из космоса. – 2002. – № 1. – С. 42 – 50.
43. Kaufman Y.J., Justice C.O. MODIS ATBD: Fire Products (Version 2.2, Nov. 10, 1998), EOS ID#2741, 1998.
44. Boles S.H., Verbyla D.L. Comparison of three AVHRR-based fire detection algorithms for Interior Alaska // Remote Sensing of Environment. – 2000. – Vol. 72. – P. 1 – 16.
45. Абушенко Н.А. и др. Разработка автоматизированного алгоритма обнаружения очагов пожаров по данным прибора AVHRR/ NOAA для территории Восточной Сибири / Н.А. Абушенко, Н.П. Минько, С.М. Семенов и др. // Международная школа молодых ученых и специалистов "Физика окружающей среды". – Томск, 1999. – С. 46 – 49.
46. Абушенко Н.А. и др. Автоматизированный алгоритм обнаружения лесных пожаров по многоспектральным данным прибора AVHRR/NOAA / Н.А. Абушенко, Н.П. Минько, С.М. Семенов и др. // III Всероссийская научная конференция "Применение дистанционных радиофизических методов в исследованиях природной среды". – Муром, 1999. – С. 210 – 211.
47. Dowty P.R. A Theoretical Investigation of Fire Detection with AVHRR Data, M.S. Thesis, Department of Environmental Sciences, University of Virginia, Charlottesville, Virginia, 1993.
48. Giglio L., Kendall J.D., Justice C.O. Evaluation of global fire detection algorithms using simulated AVHRR infrared data // Int. J. Remote Sensing. – 1999. – Vol. 20. – P. 1947 – 1985.
49. Кондратьев К.Я. и др. Космическое дистанционное зондирование атмосферного аэрозоля / К.Я. Кондратьев, А.А. Григорьев, О.М. Покровский, Е.В.Шалина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 216 с.
50. Kaufman Y.J., Fraser R.S., Ferrare R.A. Satellite Measurements of Large-Scale Air-Pollution: Methods // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95D, № 7. – P. 9895 – 9909.
51. Kaufman Y.J. Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance // Ibid. – 1993. – Vol. 98D, № 2. – P. 2677 – 2692.
52. Афонин С.В., Белов В.В. Информационно-методические основы построения эффективных систем спутникового мониторинга лесных пожаров // Вычисл. технологии. – 2003. – Т. 8, спец. вып. – С. 35 – 46.
53. Афонин С.В. и др. Сравнение спутниковых (AVHRR/NOAA) и наземных измерений характеристик атмосферного аэрозоля / С.В.Афонин, В.В. Белов, Б.Д. Белан и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 12. – С. 1118 – 1123.
54. Захаров М.Ю., Лупян Е.А. Организация формата записи данных, поступающих со спутников серии NOAA, для решения локальных задач // Исследование Земли из космоса. – 1993. – № 3. – С. 66 – 70.
55. Дистанционное зондирование: количественный подход / Ред. Ф. Свейн и Ш. Девис. – М.: Недра, 1983. – 415 с.
56. Kaufman, Y.J., Tucker C.J., Fung I. Remote sensing of biomass burning in the tropic // J. Geophys. Res. – 1990. – Vol. 95. – P. 9927 – 9939.
57. Arino O., Melinotte J-M., Rosaz J.M. et al. ESA Fire Product. Proceedings of the 7th ISPRS conference on Physical Measurement and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, 7 – 11 April 1997.

58. Жеребцов Г.А. и др. Использование данных AVHRR с ИСЗ NOAA для обнаружения лесных пожаров / Г.А. Жеребцов, В.Д. Кокуров, В.В. Кошелев, Н.П. Минько // Исследование Земли из космоса. – 1995. – № 5. – С. 74 – 77.
59. Белов В.В. и др. Тематическая обработка и атмосферная коррекция аэрокосмических изображений / В.В. Белов, С.В.Афонин, Ю.В.Гриднев, К.Т. Протасов // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12, № 10. – С. 991 – 1000.
60. Гриднев Ю.В. Выделение облачных полей на космических снимках алгоритмом сегментации, основанным на свойствах локальной однородности данных // Там же. – 1998. – Т. 11, № 4. – С. 430 – 432.
61. Афонин С.В., Белов В.В., Гриднев Ю.В. Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Ч. 1. Организация системы космомониторинга // Там же. – 2000. – Т. 13, № 11. – С. 996 – 1004.
62. Афонин С.В., Белов В.В. Система космомониторинга лесных пожаров на территории Томской области. Ч. 2. Оценка эффективности космомониторинга. // Там же. – 2001. – Т. 14, № 8. – С. 692 – 696.
63. Shuts M.M., Solovyev V.S. Remote Sensing of the Environment in Northern Siberia // Research Reports of IHOS. – Nagoya, Japan, March 1997. – № 3. – P. 82 – 84.
64. Соловьев В.С., Мулларов В.А. Возможность комплексного мониторинга возгорания лесных массивов вследствие грозовой активности // Материалы международного семинара "Стратегия сохранения, восстановления и устойчивого использования бореальных лесов", 16 – 17 декабря 1996 г., Якутск. Проект МСОП № 75127. – С. 56 – 69.
65. Шац М.М., Ковалева В.М., Соловьев В.С. ГИС-проект: Мониторинг последствий освоения геосистем Арктической Якутии // Материалы международной конференции Интеркарто-5 "ГИС для устойчивого развития территорий", 17 – 19 июня 1999 г., Якутск. – Ч. 3. – С. 78 – 82.
66. Архипов В.И., Афанасьева В.М., Соловьев В.С. Использование ГИС-технологий в системе экологического мониторинга Республики Саха (Якутия) // Там же. – С. 23 – 25.
67. Соловьев В.С., Лихоход А.Н. Экологический мониторинг окружающей среды по спутниковым данным // Наука и образование. – 2000. – № 1 (17). – С. 100 – 103.
68. Соловьев В.С., Васильев Е.К. Спутниковый мониторинг лесных пожаров и оценка их последствий // Там же. – № 4 (20). – С. 24 – 27.
69. Соловьев В.С., Васильев Е.К., Соловьева Н.М. Спутниковый мониторинг арктических регионов России и трассы Северного морского пути // Сб. докладов "Арктика и Северный морской путь" по материалам региональной научно-практической конференции "Влияние Северного морского пути на социально-экономическое развитие Российского Севера", 24 – 25 августа 2000 г., п. Тикси. – С. 62 – 64.
70. Solovyev V.S., Vasilyev E.K., Solovyeva N.M. Satellite monitoring of forest fire in the territory of Yakutia and the evaluation of their consequences // Proceedings of international conference "The role of permafrost ecosystems in global climate change", Yakutsk, 3 – 5 May 2000. – Yakutsk Scientific Center Publishing House, 2001. – P. 178 – 180.
71. Solovyev V.S. The Disastrous Floods on the Rivers of the Yakutia in 1998 – 2001 years // Int. Conf. "The First Severe Winter of 21-th Century", Nagaoka, Japan, September 20 – 21, 2001. – P. 3. (на яп. языке).
72. Соловьев В.С. Спутниковый мониторинг в Якутии // Космофизические исследования в Якутии. – Якутск: ЯФ изд-ва СО РАН, 2001. – С. 302 – 308.
73. Соловьев В.С., Васильев Е.К. Результаты спутникового мониторинга лесных пожаров на территории Восточной Сибири // Сб. докладов III Всероссийской конференции "Аэрокосмические методы и геоинформационные технологии в лесоведении и лесном хозяйстве", посвященной памяти Г.Г. Самойловича (Москва, 18 – 19 апреля 2002 г.). – М.: ЦЭПЛ РАН, 2002. – С. 201 – 202.
74. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир. – 1978. – С. 142 – 161.
75. Rosell F.A., Wilson R.H. Resent Physical Experiments and the Display Signal-to-Noise Ratio Concept. Ch. 5 // Perception of Displayed Information, L.M. Biberman, Plenum, 1973. – P. 134 – 145.
76. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио.

77. Michael Matson, Jeff Dozier. Identification of Sub resolution High Temperature Sources Using a Thermal IR Sensor // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1981. – Vol. 47, № 9, September. – P. 1311 – 1318.
78. Hirst S.N., Kruckeberg R.F., Madden F.H. The bispectral forest fire detection system // USDA Forest Service Northern Forest Fire Laboratory. – Missoula, Montana, 1990. – 191 p.
79. Weber R.O. Modelling fire spread through fuel beds // Prog. Everg. Combust. Sci. – 1990. – Vol. 17. – P. 65 – 82.
80. Linn R.R. A transport model for prediction of wildfire behavior / Los-Alamos National Laboratory (USA). – 1997. – 195 p.
81. Porterie B. et al. Wild fire Propagation / B.Porterie, D. Morvan, M. Larini, J.C. Lorand // A Two-Dimensional Multiphase Approach Physica gorenia e vzriva. – 1998. – № 2. – P. 261 – 278.
82. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров // Численные методы механики сплошных сред. – Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1978. – С. 30 – 56.
83. Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров. – Томск: Изд-во ТГУ, 1981. – 277 с.
84. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.
85. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и её приложение // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 5. – С. 34 – 54.
86. Grishin A.M. Mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them (Translated by Marek Czuma, Chikina and L. Smokotina; Edited by Frank Albini). – Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. – 390 p.
87. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1994. – 218 с.
88. Гришин А.М., Плюхин В.В. Экспериментальное исследование структуры фронта верхнего лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1985. – № 1. – С. 21 – 26.
89. Спиринов А.Н., Фомин А.А. Исследование теплопереноса в окрестности очага пожара. – Томск, 1989. – 59 с. (Деп. в ВИНТИ 22.04.87. – № 2812-B87).
90. Гришин А.М., Голованов А.Н., Смирнов В.Г. О методике экспериментального определения параметров в зоне лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1995. – № 3. – С. 3 – 9.
91. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 471 с.
92. Лапин Ю.В. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. – М.: Наука, 1982. – 312 с.
93. Турбулентные течения реагирующих газов / Под ред. П.А. Либби, Ф.А. Вильямса. – М.: Мир, 1983. – 325 с.
94. Ламли Дж. и др. Методы расчета турбулентных течений / Дж. Ламли, У. Шуманн, В. Роди и др. – М.: Мир. – 1984. – 463 с.
95. Романенко П.Н. Гидродинамика и теплообмен в пограничном слое. – М.: Энергия, 1974. – 464 с.
96. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н. Турбулентные течения при воздействии объемных сил неавтономности. – М.: Машиностроение, 1975. – 96 с.
97. Penner L.E., Haselman L.C., Edwards L.L. Buoyant plume calculation // AIAA Pap. – 1985. – № 459. – P. 1 – 9.
98. Фомин А.А. Структура течения и прогрев окружающей среды над локальным очагом лесного пожара: Дис. ... канд. ф.-м. н. – Томск, 1989. – 221 с.
99. Kumar S. Mathematical modelling of natural convection in fire. A state of the art review of the field modelling of variable density turbulent flow // Fire and Materials. – 1983. – Vol. 7, № 1. – P. 1 – 24.
100. Абрамович Г.Н. и др. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников и др. – М.: Наука, 1984. – 713 с.
101. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1981. – 714 с.
102. Гришин А.М. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред / А.М. Гришин, А.Я. Кузин, В.Л. Миков и др. – Томск: Изд-во ТГУ, 1987. – 246 с.

103. Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. – М.: Наука, 1985. – 304 с.
104. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. – М.: Стройиздат, 1984. – 358 с.
105. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред (Ч. 1). – М.: Наука, 1987. – 464 с.
106. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред (Ч. 2). – М.: Наука, 1987. – 359 с.
107. Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. – Новосибирск: Наука. – 1977. – 239 с.
108. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. – Минск: Наука и техника. – 1975. – С. 318.
109. Гришин А.М. Математическое моделирование некоторых нестационарных аэротермохимических явлений. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1973. – 282 с.
110. Гришин А.М., Берцун В.Н., Зинченко В.И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1981. – 160 с.
111. Грузин А.Д. Аэродинамика и сопряженный тепломассоперенос в приземном слое атмосферы при распространении лесных пожаров: Дис. ... канд. ф.-м. н. – Томск, 1983. – 180 с.
112. Зверев В.Г. Математическое моделирование аэродинамики и тепломассопереноса при распространении вершинных лесных пожаров: Дис. ... канд. ф.-м. н. – Томск, 1985. – 222 с.
113. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения массовых и верховых лесных пожаров с учетом теплообмена и двухтемпературности среды: Дис. ... канд. ф.-м. н. – Томск, 1995. – 187 с.
114. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 152 с.
115. Гришин А.М., Грузин А.Д. Конвективный тепломассоперенос и закономерности распространения горящих частиц в приземном слое атмосферы при верховых лесных пожарах // ДАН СССР. – 1983. – Т. 253. – С. 549 – 553.
116. Гришин А.М., Зверев В.Г., Грузин А.Д. Математическое моделирование процесса распространения верховых лесных пожаров // Там же. – Т. 269, № 4. – С. 822 – 826.
117. Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. Математическая теория верховых лесных пожаров. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. – С. 38 – 75.
118. Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. Тепломассообмен и распространение горящих частиц в приземном слое атмосферы при верховых лесных пожарах // Физика горения и взрыва. – 1981. – Т. 17, № 4. – С. 78 – 84.
119. Гришин А.М. и др. Распространение в приземном слое атмосферы термиков, возникающих при лесных пожарах. Теплофизика лесных пожаров / А.М. Гришин, Н.А. Алексеев, О.П. Брабандер, В.Ф. Зальмеж. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. – С. 76 – 85.
120. Grishin A.M. et al. Propagation of termic developing fire in the near-earth atmospheric layer. Heat Transfer Soviet Research / A.M. Grishin, N.A. Alekseev, O.P. Brabander, V.F. Zalmez // Scripta Technica USA. – 1984. – Vol. 16. – P. 28 – 38.
121. Grishin A.M., Zverev V.G., Gruzin A.D. Mathematical theory of crown forest fire // Heat Transfer Soviet Research. – 1986. – Vol. 17, № 6. – P. 41 – 49.
122. Гришин А.М., Зеленский Е.Е., Шевелев С.В. Двумерная неустойчивость фронта верхового лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1990. – № 3. – С. 7 – 17.
123. Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. Исследование структуры и пределов распространения фронта верхового лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1985. – № 1. – С. 11 – 21.
124. Гришин А.М., Зеленский Е.Е., Шевелев С.В. Устойчивость распространения фронта лесного пожара // Механика реагирующих сред и ее приложения. – Новосибирск, 1989. – С. 5 – 21.
125. Гришин А.М., Зеленский Е.Е. Устойчивость распространения фронта верхового лесного пожара при конечной скорости межфазного теплообмена // Физическая газодинамика реагирующих сред. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 47 – 60.

126. Гришин А.М. О стационарном распространении фронта верхового лесного пожара // ДАН СССР. – 1984. – Т. 279, № 3. – С. 550 – 554.
127. Гришин А.М., Зверев В.Г., Шевелев С.В. О стационарном распространении вершинных верховых лесных пожаров // Физика горения и взрыва. – 1986. – № 6. – С. 101 – 108.
128. Гришин А.М., Зверев В.Г. Воспламенение полого леса при верховых пожарах и расчет ширины противопожарных заслонов // Там же. – 1982. – Т. 18, № 4. – С. 3 – 11.
129. Гришин А.М., Перминов В.А. Переход низового лесного пожара в верховой // Там же. – 1990. – № 6. – С. 3 – 10.
130. Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов в результате космических и техногенных катастроф // Там же. – 1996. – № 3.
131. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Там же. – 1995. – № 5. – С. 107 – 115.
132. Гришин А.М., Ковалев Ю.М. Исследование закономерностей взаимодействия взрывных волн с растительностью и фронтом лесного пожара // Физическая газодинамика реагирующих сред. – Новосибирск: Наука, 1990. – С. 60 – 68.
133. Гришин А.М., Ковалев Ю.М. Об усилении ударных волн при взаимодействии с фронтом лесного пожара // ДАН СССР. – 1990. – Т. 313, № 1. – С. 50 – 54.
134. Гришин А.М., Ковалев Ю.М. Экспериментальное и теоретическое исследование воздействия взрыва на фронт верхового лесного пожара // Физика горения и взрыва. – 1989. – № 6. – С. 72 – 79.
135. Гришин А.М., Ковалев Ю.М. Экспериментальное исследование воздействия взрыва конденсированных ВВ на фронт верхового лесного пожара // ДАН СССР. – 1989. – Т. 308, № 5. – С. 77 – 78.
136. Гришин А.М., Сеницын С.П. Воздействие фронта лесного пожара на стеклопластик // Физика горения и взрыва. – 1990. – № 6. – С. 35 – 42.
137. Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров. – М.: Гос. комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. – 25 с.
138. Гришин А.М., Долгов А.А., Цимбалюк А.Ф. Методика расчета выбросов от источников горения при разливе нефти и нефтепродуктов. – М.: Гос. комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. – 24 с.
139. Конев Э.В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. – С. 99 – 125.
140. Гришин А.М., Звягильская А.И., Субботин А.Н. Влияние влагосодержания и тепло- и массообмена с окружающей средой на критические условия возникновения очага низового пожара // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 5. – С. 97 – 106.
141. Гришин А.М. и др. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима и др. // Там же. – № 6. – С. 3 – 11.
142. Гришин А.М. и др. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов/ А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима и др. // ФГВ. – 1998. – Т. 34, № 6. – С. 14 – 22.
143. Гришин А.М. и др. Тепловизионные исследования развития и распространения низового лесного пожара / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.П. Зима, Р.Ш. Цык // Оптика атмосферы и океана. – 1997. – Т. 10, № 10. – С. 1139 – 1150.
144. Гришин А.М. и др. Исследование распространения низовых лесных пожаров по опадку хвойных и лиственных пород / А.М. Гришин, А.А. Долгов, В.В. Рейно и др. // Там же. – 1999. – Т. 12, № 8. – С. 721 – 724.
145. Гришин А.М. и др. Экспериментальное исследование лесных пожаров горения штабелей древесины и инфразвуковые колебания давления / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, А.А. Долгов и др. // Избранные доклады международной конференции "Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии". – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2000. – С. 102 – 125.
146. Гришин А.М., Голованов А.Н. О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влияние на режимы воспламенения и горения // Прикладная механика и техническая физика, 2001. – Т. 42, № 4. – С. 127 – 135.

147. Гришин А.М., Голованов А.Н. О потухании лесных горючих материалов при постоянных и переменных воздействиях потока инертного газа на зону горения // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 5. – С. 75 – 80.
148. Гришин А.М. и др. О сушке слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Инженерно-физический журнал / Национальная академия наук Беларуси, АНК ИТМО им. А.В. Лыкова. – 2001. – Т. 74, № 4. – С. 58 – 64.
149. Гришин А.М. и др. Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 65 – 76.
150. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 122 с.
151. Гришин А.М., Фильков А.И. Параметрический анализ упрощенной математической модели сушки слоя лесного горючего материала // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии: Материалы междунар. конф. Томск, 15 – 20 сентября 2002 г. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – С. 63 – 64.
152. Лобода Е.Л. Физико-математическое моделирование сушки и зажигания лесных горючих материалов: Дисс. ... канд. ф.-м. н. – Томск, 2002. – 126 с.
153. Борисов А.А., Борисов А.А., Горелик Р.С. Экспериментальное и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров. – Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. – С. 5 – 25.
154. Игнатенко Н.А., Игнатенко Е.М., Тимошенко В.В. О нестационарном распространении фронта пожара на торфяниках // Там же. – С. 38 – 49.
155. Субботин А.Н. Математическое распространение фронта пожара на торфяниках // Механика реагирующих сред и ее приложения. – Новосибирск: Наука, 1989. – С. 57 – 63.
156. Субботин А.Н. О некоторых особенностях распространения подземного пожара // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – С. 151 – 152.
157. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. – Новосибирск: Наука, 1984. – 318 с.
158. Алексеев Б.В., Гришин А.М. Физическая газодинамика реагирующих сред. – М.: Высшая школа, 1985. – 464 с.
159. Зельдович Я.Б. и др. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович, Г.М. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
160. Васильковский В.А., Малышкин В.Э. Синтез параллельных программ и систем на основе вычислительных моделей. – Новосибирск: Наука, 1988. – 129 с.
161. Малышкин В.Э. Параллельная реализация численных математических моделей // Материалы международной конференции "Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия. – Томск: Изд-во ТГУ, 1999. – С. 96 – 103.
162. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – Новосибирск: Наука, 1974. – 224 с.
163. Постон Т., Стюарт М. Теория катастроф и ее приложения. – М.: Мир, 1980. – 607 с.
164. Гришин А.М. и др. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред / А.М. Гришин, А.Я. Кузин, В.Л. Миков и др. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1987. – 246 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Абушенко Николай Александрович – научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, e-mail: nick1@iszf.irk.ru, тел. 8 (3952) 425865
- Алтынцев Дмитрий Александрович – научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, e-mail: alt@iszf.irk.ru, тел. 8 (3952) 425865
- Антонов Валерий Николаевич – начальник Западно-Сибирского регионального центра приема и обработки спутниковых данных, e-mail: avr@rcpod.siberia.net
- Афонин Сергей Васильевич – ведущий научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН, e-mail: afonin@iao.ru
- Белов Владимир Васильевич – заместитель директора Института оптики атмосферы СО РАН, e-mail: belov@iao.ru
- Гриднев Юрий Владимирович – научный сотрудник Института оптики атмосферы СО РАН, e-mail: yuri@iao.ru
- Гришин Анатолий Михайлович – профессор, заведующий кафедрой Томского государственного университета, e-mail: fire@fire.tsy.tomsk.su
- Ершов Дмитрий Владимирович – заведующий лабораторией Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, к.т.н., e-mail: ershov@ifi.rssi.ru, тел. 8 (095) 3326877
- Коровин Георгий Николаевич – заместитель директора Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, д.с.-х.н., e-mail: korovin@cepl.rssi.ru, тел. 8 (095) 3322320
- Кошелев Владимир Васильевич – Институт солнечно-земной физики СО РАН, д.ф.-м.н., e-mail: koshelev1@iszf.irk.ru, тел. 8 (3952) 511653
- Лупян Евгений Аркадьевич – заместитель директора Института космических исследований РАН, д.т.н., e-mail: evgeny@d902.iki.rssi.ru, тел. 8 (095) 3335313
- Мазуров Алексей Анатольевич – заведующий лабораторией Института космических исследований РАН, к.ф.-м.н., e-mail: alexei@d902.iki.rssi.ru, тел. 8 (095) 3335313

- Матвиенко Геннадий Григорьевич – директор Института оптики атмосферы СО РАН, д.ф.-м.н., e-mail: mgg@iao.ru
- Новик Владимир Петрович – научный сотрудник Центра по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, e-mail: novik@ifi.rssi.ru, тел. 8 (095) 332-6877
- Пономарев Евгений Иванович – научный сотрудник Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, e-mail: evg@ksc.krasn.ru, тел. 8 (3912) 494092
- Соловьев Владимир Степанович – заведующий лабораторией Института космофизических исследований и аэронауки СО РАН, e-mail: solo@ikfia.ysn.ru
- Сухинин Анатолий Иванович – ведущий научный сотрудник Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, e-mail: boss@ksc.krasn.ru, тел. 8 (3912) 494092
- Татарников Андрей Владимирович – младший научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, e-mail: andrey@iszf.irk.ru
- Тащилин Сергей Анатольевич – научный сотрудник Института солнечно-земной физики СО РАН, e-mail: sergey@iszf.irk.ru, тел. 8 (3952) 425865
- Ткаченко Владимир Александрович – ведущий специалист Западно-Сибирского регионального центра приема и обработки спутниковых данных, e-mail: tva@rcpod.siberia.net
- Флитман Евгений Вадимович – научный сотрудник Института космических исследований РАН, e-mail: flitman@d902.iki.rssi.ru, тел. 8 (095) 3335313

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Глава 1. ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В СПУТНИКОВОМ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ	5
1.1. Космические средства мониторинга лесных пожаров. Общие (идеальные) требования к ним	6
1.2. Функциональная структура ГИС мониторинга лесных пожаров.....	8
1.2.1. Федеральная ГИС "Авиалесоохрана"	8
1.2.2. ГИС "Лесные пожары Иркутской области"	17
1.2.3. Региональная система спутникового мониторинга ГО и ЧС (г. Красноярск)	18
1.3. Организация баз данных по уровням ГИС.....	27
Глава 2. ОЦЕНКА ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СО СПУТНИКОВ NOAA	31
2.1. Исходные требования к системе определения пожарной опасности.....	31
2.1.1. Охват территории	31
2.1.2. Периодичность получения информации	32
2.1.3. Учет местных особенностей ЛПМ.....	33
2.2. Возможности спутников NOAA для оценки индекса пожарной опасности	33
2.3. Анализ данных собранных за тестовый пожароопасный период	34
2.3.1. Оценка пространственного распределения температуры по данным AVHRR	34
2.3.2. Оценка температуры воздуха по данным TOVS	35
2.3.3. Температура точки росы по данным TOVS	36
2.4. Показатель ПО Нестерова, восстановленный по данным NOAA	37
2.5. Пространственное представление индекса ПО	42
Глава 3. ОБНАРУЖЕНИЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ	44
3.1. Физические основы алгоритмов обнаружения лесных пожаров из космоса	44
3.2. Подходы к постановке задачи о спутниковом мониторинге очагов лесных пожаров	46
3.3. Информационно-методические основы подсистемы атмосферной коррекции AVHRR-изображений.....	48
3.3.1. Алгоритмы восстановления яркостных характеристик очага пожара.....	48

3.3.2. Характеристики подстилающей поверхности (ПП)	50
3.3.3. Характеристики оптического состояния атмосферы (оптическая погода)	50
3.3.4. Восстановление характеристик атмосферного аэрозоля по спутниковым данным	52
3.4. Пороговый алгоритм	55
3.5. Особенности обнаружения малоразмерных пожаров в пороговых алгоритмах	56
3.6. Алгоритм составной модели пожара	58
3.7. Двухшаговый алгоритм на основе потенциальных функций и поверхностей	61
3.8. Алгоритм феноменологической модели малоразмерных пожаров	65
3.9. Эффективность применения порогового алгоритма в спутниковом мониторинге лесных пожаров на территории Якутии	70
3.10. Вероятностный алгоритм обнаружения и энергетической диагностики лесных пожаров спутниковыми средствами	72
Глава 4. ОБЩИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЛЕСНЫХ И ТОРФЯНЫХ ПОЖАРОВ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ	80
4.1. Цель и алгоритм научного исследования лесных и торфяных пожаров	81
4.2. Основные понятия теории лесных пожаров	82
4.3. Результаты физического моделирования лесных пожаров и общая физическая модель физико-химических процессов в зоне пожара	84
4.4. Основная система уравнений	89
4.5. Модели турбулентности	93
4.6. Модель излучения при лесных пожарах	96
4.7. Влияние порывов ветра на собственные колебания растений и замыкание основной системы уравнений	97
4.8. О замыкании основной системы уравнений	100
4.9. Граничные и начальные условия	102
4.10. Математическая модель торфяных пожаров второго поколения	105
4.11. База данных общих математических моделей лесных и торфяных пожаров и методики численного решения задач	108
4.12. Некоторые результаты математического и физического моделирования лесных пожаров	108
4.13. Сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными	116
4.14. Некоторые результаты исследования торфяных лесных пожаров	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ	122
ЛИТЕРАТУРА	123
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ	131

Абушенко Николай Александрович, Алтынцев Дмитрий Александрович
Антонов Валерий Николаевич, Афонин Сергей Васильевич
Белов Владимир Васильевич, Гриднев Юрий Владимирович
Гришин Анатолий Михайлович, Ершов Дмитрий Владимирович
Коровин Георгий Николаевич, Кошелев Владимир Васильевич
Лупян Евгений Аркадьевич, Мазуров Алексей Анатольевич
Матвиенко Геннадий Григорьевич, Новик Владимир Петрович
Пономарев Евгений Иванович, Соловьев Владимир Степанович
Сухинин Анатолий Иванович, Татарников Андрей Владимирович
Тащилин Сергей Анатольевич, Ткаченко Владимир Александрович
Флитман Евгений Вадимович

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В РОССИИ.
ИТОГИ. ПРОБЛЕМЫ. ПЕРСПЕКТИВЫ

Аналитический обзор

Компьютерная верстка выполнена Т.А. Калюжной

Лицензия ИД № 04108 от 27.02.01

Подписано в печать 28.11.2003. Формат 60x84/16.
Бумага писчая. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 8,7. Уч.-изд. л. 7,7. Тираж 300 экз.
Заказ N 300.

ГПНТБ СО РАН. Новосибирск, ул. Восход, 15, комн. 407, ЛИСА.
Полиграфический участок ГПНТБ СО РАН. 630200, Новосибирск,
ул. Восход, 15.