

УДК 614.841.42:630:004

КОМПЛЕКСНОЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ БОРЬБЫ С ЛЕСНЫМИ ПОЖАРАМИ

С. Ю. Антонов¹, Г. Н. Исаков²

¹ Главное управление МЧС России по ХМАО – Югре, santonov1971@mail.ru

² Сургутский государственный университет, isak_nik@mail.ru

В статье на основе большого количества отечественных и зарубежных научных публикаций проведен анализ существующих моделей и алгоритмов, которые применяются или могут быть применены для моделирования, прогнозирования и поддержки принятия решений при борьбе с лесными пожарами. Предложена структура комплексной информационно-аналитической компьютерной системы по борьбе с лесными пожарами. Предложена классификация задач, которые могут быть решены с помощью такой системы, а также соответствующих моделей и алгоритмов.

Ключевые слова: лесной пожар, математическое и имитационное моделирование, управление процессом тушения лесного пожара, система поддержки принятия решений, методы принятия управленческих решений, критерии управления.

COMPLEX ALGORITHMIC SUPPORT OF INFORMATION ANALYSIS COMPUTER SYSTEM FOR FIGHTING FOREST FIRES

S. Yu. Antonov¹, G. N. Isakov²

¹ Central Administration of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation, Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra, santonov1971@mail.ru

² Surgut State University, isak_nik@mail.ru

The article considers an analysis of existing models and algorithms that are or can be applied for simulating, forecasting and supporting decision-making in fighting forest fires. The analysis is based on a large number of domestic and foreign scientific publications. The structure of a complex information analysis computer system for fighting forest fires is proposed. A classification of problems that can be solved by such system, as well as by corresponding models and algorithms, is proposed.

Keywords: forest fire, mathematical and simulation modeling, forest fire extinguishing process control, decision support system, management decision support system, control measure.

Структура информационно-аналитической компьютерной системы для борьбы с лесными пожарами. Леса России являются одним из главных национальных достояний и важнейшей сырьевой базой для многих отраслей промышленности и народного хозяйства. Кроме того, леса являются экосистемной основой для ведения охотхозяйства, сбора дикорастущих растений, обладающих уникальными лечебными и пищевыми свойствами, составляют базу для туристического и рекреационного бизнеса. Особая важность лесов как источника перечисленных ресурсов определяется их принципиальной возобновляемостью. Площадь, занятая лесами, особенно широколиственными, является важным фактором контроля динамики содержания парникового газа диоксида углерода в атмосфере.

Одним из важнейших факторов обеспечения стабильности, возобновления и развития лесного фонда и лесных ресурсов Российской Федерации является обеспечение комплексных мер по борьбе с лесными пожарами. Для регулирования такой деятельности Правительством Российской Федерации, профильными министерствами и ведомствами, прежде всего

Министерством по чрезвычайным ситуациям Российской Федерации и Рослесхозом, разработаны пакеты соответствующих нормативных документов [1–3].

Эффективное выполнение положений нормативных документов невозможно без своевременного мониторинга ситуации с возникновением, предотвращением, локализацией и устранением лесных пожаров, включая заблаговременное размещение и проверку состояния готовности сил и средств пожаротушения в пожароопасных районах лесных массивов на территориях субъектов Российской Федерации.

Одним из важнейших инструментов обеспечения перечисленных направлений деятельности является разработка комплексной информационно-аналитической компьютерной системы (ИАКС), состоящей как минимум из следующих подсистем:

- хранилища данных, в том числе о лесных пожарах прошлых сезонов, их обнаружении, протекании, принятых мерах с оценкой эффективности принятых мер по локализации и устранению, а также оценкой достаточности/недостатков в отношении имевшихся в распоряжении сил и средств, использованных при тушении пожара;
- системы сбора, обработки и анализа данных мониторинга и прогнозирования развития текущей ситуации по лесным пожарам;
- системы поддержки принятия решений по предупреждению, локализации и устранению лесных пожаров в текущем сезоне;
- системы анализа достаточности и эффективности использования сил и средств и стратегического планирования действий по предупреждению лесных пожаров на будущие сезоны.

Целесообразно, чтобы указанная комплексная информационно-аналитическая система была организована в виде структуры кластеров как минимум трех уровней:

- совокупности локальных территориальных информационно-аналитических и прогнозных центров (возможно, соотнесенных с субъектами Российской Федерации);
- информационно-аналитических центров федеральных округов Российской Федерации;
- головного информационно-аналитического центра федерального уровня (рис. 1).

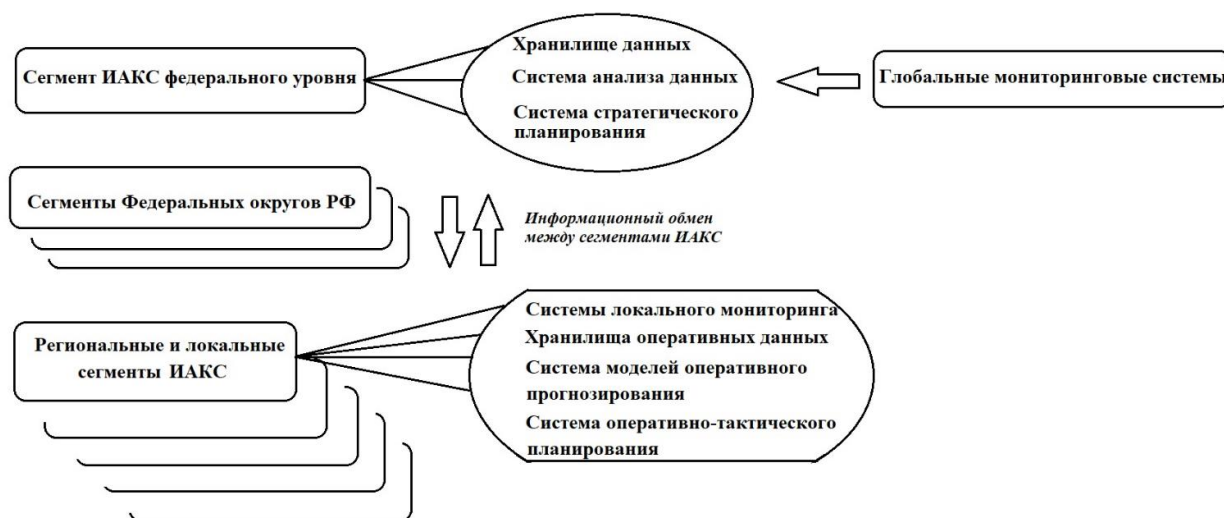


Рис. 1. Территориальная структура ИАКС

Взаимодействие между кластерами ИАКС должно осуществляться на основе новейших сетевых технологий с применением надежных средств авторизации доступа и защитой передаваемых сообщений, т. е. должно быть основано на современных принципах информационной безопасности.

Для обеспечения эффективного функционирования ИАКС необходимо использование в ее составе проверенных (практически верифицированных) математических компьютерных алгоритмов, предназначенных для своевременного и эффективного решения поставленных

перед ИАКС задач. Как задачи, так и применяемые для их решения алгоритмы должны быть классифицированы по основным направлениям использования (применения) ИАКС (рис. 2).



Рис. 2. Классификация задач ИАКС и алгоритмов для их решения

Ввиду того, что процессы возникновения, распространения, локализации и устранения лесных пожаров являются сложными многофакторными процессами, существующие в настоящее время математические модели и алгоритмы имеют ограниченную применимость в зависимости от конкретных ситуаций, начальных данных и условий реальных задач. Поэтому целесообразно проведение целенаправленной работы по комплексному тестированию, отбору и классификации алгоритмов, применяемых в рамках отдельных направлений ИАКС, с целью наиболее адекватного и эффективного их применения при анализе, прогнозировании и принятии решений в реальных ситуациях. Так же, как при отборе существующих математических моделей и алгоритмов для ИАКС для борьбы с лесными пожарами, так и при разработке новых эффективных моделей и алгоритмов должны быть учтены новые долгосрочные факторы и глобальные тенденции, которые будут оказывать существенное влияние на возникновение лесных пожаров на территории РФ в ближайшем будущем.

Ключевые долгосрочные факторы и глобальные тенденции, влияющие на динамику возникновения и развития лесных пожаров на территории РФ. К основным факторам, повышающим вероятность возникновения лесных пожаров на территории РФ в долгосрочной перспективе, следует отнести глобальное потепление и увеличение присутствия людей на территории лесных массивов в пожароопасный период. Причем следует отметить, что действуя в совокупности, оба этих фактора обеспечивают возникновение синергетического системного эффекта, который еще более увеличивает вероятность возникновения лесных пожаров в пожароопасный период.

В докладе, составленном специалистами Почвенного института им. В. В. Докучаева совместно с Институтом географии РАН и Институтом физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, его авторы отмечают, что потепление практически во всех регионах Российской Федерации идет быстрее, чем на других территориях и в среднем по планете[11]. Так, рост среднегодовых температур на территории Российской Федерации за последнее десятилетие составляет 0,45 °С. Если же рассматривать статистику температурных измерений только на европейской части территории РФ, то среднегодовые температуры на этой территории выросли за десять лет на 0,54 °С. При этом на суше северного полушария рост среднегодовых температур составил 0,38 °С за десятилетие, а глобальный рост (в целом

по Земле) составил 0,17 °С. Относительно плавное увеличение летних температур в период до 2006 г. сменилось неравномерным ростом с большими пиками в 2010 г. и в 2014–2016 гг., когда летние температуры на территории РФ достигали рекордных значений. Также ожидается более быстрое сокращение длительности зимних волн холода по сравнению с увеличением продолжительности волн тепла летом. Указанные тенденции означают, что существует большая вероятность увеличения длительности засушливых периодов и периодов повышенной температуры именно в пожароопасный период, а это, в свою очередь, приведет к повышению вероятности возникновения лесных пожаров практически по всей территории Российской Федерации.

Вместе с температурой воздушной среды повышается и среднегодовая температура почв вплоть до глубины в 50–100 см. Отдельного рассмотрения и учета в плане последствий требует изменение границы вечной мерзлоты, которая на данный момент занимает более половины территории Российской Федерации.

Повышение концентрации диоксида углерода в атмосфере вместе с увеличением среднегодовых температур является фактором потенциального увеличения продуктивности как природных геобиоценозов, включая лесные массивы, так и сельскохозяйственных угодий. Если для сельского хозяйства и лесоводства данная тенденция может быть оценена как позитивная, однако она усложняет ситуацию с возникновением лесных пожаров, так как может вызвать разрастание почвопокровных растений нижнего яруса, подлеска и древовидных кустарников в лесных массивах, что станет фактором усложнения ситуации при возникновении и распространении лесных пожаров. Помимо этого, указанная тенденция потребует дополнительного мониторинга и усилий по поддержанию противопожарных просек, рвов и проходимости лесных дорог.

Вторым фактором повышения риска возникновения лесных пожаров является увеличение присутствия людей на территории лесных массивов в пожароопасный период. Известно, что до 70 % лесных пожаров на территории РФ возникают по вине человека, а для лесных массивов, расположенных вблизи населенных пунктов, эта величина возрастает. Особую опасность представляет неконтролируемый туризм, охота и рыболовство, включая браконьерскую деятельность в лесах в весенне-летний период.

Обзор существующих моделей и алгоритмов для моделирования лесных пожаров и их классификация по основным направлениям использования ИАКС. Как уже отмечалось выше, применяемые в составе ИАКС модели и алгоритмы должны быть классифицированы относительно направлений применения ИАКС, следовательно, относительно основных составляющих ее подсистем. В соответствии с приведенным ранее перечнем подсистем ИАКС может быть предложена следующая классификация моделей и алгоритмов по моделированию лесных пожаров.

Класс А. Фундаментальный уровень моделирования, к которому относятся модели, описывающие процессы совместного горения различного рода горючих материалов, составляющих ярусы леса, исходя из их физико-химических свойств и влажности, а также процессы экстракции масел и газообразных веществ из указанных лесных горючих материалов при их нагревании с различной интенсивностью тепловых потоков (включая нагревание солнечными лучами, потоком нагретых дымовых газов, а также тепловым излучением от фронта пламени), пиролитические процессы.

Класс В. Гидродинамические и иные модели локального тепло-массопереноса при распространении пламени в лесном массиве с учетом текущей метеорологической обстановки и ключевых метеорологических факторов, таких как влажность воздуха, температура и скорость ветра.

Класс С. Моделирование распространения лесного пожара на реальной территории с учетом ландшафтного рельефа и фактической неоднородности характеристик горючих материалов лесного массива, с прогнозом контуров распространения, локального класса опасности и иных характеристик лесного пожара, определяющих оперативно-тактические

действия по его локализации и тушению, а также моделирование сценариев применения сил и средств пожаротушения в текущей конкретной ситуации и априорная оценка эффективности такого применения.

Класс D. Моделирование лесных пожаров как событий в системе функционирования охраны леса и наборы соответствующих алгоритмов.

Каждому из классов моделей могут быть соотнесены определенные характерные временной и пространственный масштабы. Так, для класса А указанные характерные масштабы определяются скоростями протекания основных физико-химических процессов при возгорании и последующем горении лесных горючих материалов. Эти масштабы могут быть оценены от нескольких секунд до нескольких минут по времени и от нуля до нескольких метров по пространству.

Характерные масштабы для моделей класса В – от нескольких минут до одного-двух часов по времени и от нескольких десятков до нескольких сотен метров по пространству. Однако необходимо отметить, что уже для моделей класса В, как и для моделей класса С, характерные временной и пространственный масштабы зависят от скорости ветра и от преимущественного типа пожара, поскольку, например, в зависимости от скорости ветра беглый верховой пожар может распространяться со скоростью до 4 500–4 800 м/ч (70–80 м/мин).

Характерные масштабы для моделей класса С составляют от одного-двух до нескольких часов по времени и от нескольких сотен метров до нескольких километров (в случае верхового пожара – до 10–20 км) по пространству.

Модели класса D оперируют площадями лесных массивов, начиная от нескольких десятков гектар, и временными промежутками, определяемыми волнами потепления и похолодания в пожароопасный период, периодами засухи и тому подобными временными диапазонами, вплоть до длительности пожароопасного периода в целом.

Отметим, что модели и соответствующие им алгоритмы, относящиеся к классу D, по используемому математическому аппарату могут быть отнесены преимущественно к статистическим методам анализа данных, а также к таким разделам так называемого машинного обучения, как автоматизированная классификация и кластеризация данных.

В классе С, к которому относятся модели и алгоритмы непосредственного обеспечения оперативно-тактического планирования действий по локализации и устранению лесных пожаров, в настоящее время применяются преимущественно эмпирические и полуэмпирические модели распространения контура пожара. Среди наиболее широко используемых современных моделей такого типа следует упомянуть модели Фонса [28], Байрама [27], Н. П. Курбатского и Г. П. Телицина [20], а также Ротермела [29] и др. При их разработке были использованы экспериментальные данные о горении лесных горючих материалов, полученные либо в ходе лабораторных и стендовых экспериментов, либо исходя из анализа распространения реальных пожаров.

Следует отметить, что в существующих эмпирических моделях класса С слабо учитываются или совсем не учитываются профили ландшафта, на котором размещен лесной массив. Так, для горных склонов крутизной до 30–45 градусов скорость распространения пламени вверх по склону, особенно при наличии попутного ветра, возрастает из-за наличия естественных восходящих вверх конвективных потоков, которые являются особенно интенсивными в утренние часы и в первой половине светового дня для склонов, освещаемых солнцем. Напротив, при распространении лесного пожара в низинах могут возникать устойчивые аэродинамические конфигурации типа конвективной колонки или квазистационарного вихря. Такие явления частично учтены в модели Байрама.

К классу С следует отнести также модели и алгоритмы, предназначенные для решения задач локализационного управления лесным пожаром [14, 24]. В таких моделях в явном виде учитывается воздействие на пожар сил и средств пожаротушения.

Модели класса А составляют основу для моделей класса В, поскольку предоставляют для них термохимические и кинетические данные в части процессов горения твердых фракций лесных горючих материалов, их сушки подходящим фронтом пламени, пиролиза и газификации. Модели класса А вместе с соответствующими экспериментальными данными, использованными для их идентификации, описаны, в частности, в работах [17, 20] и др.

Модели класса В основаны на законах сохранения энергии и массы в форме, применяемой в задачах тепло- и массопереноса, и записываются обычно в форме системы уравнений в частных производных. Такого рода уравнения аналогичны уравнениям гидродинамики и механики реагирующих сред [5, 12, 18], и модели содержит несколько десятков уравнений. Численное решение столь высокоразмерной системы уравнений требует привлечения специальных методов типа метода крупных частиц [5], контрольного объема [25], расщепления по физическим процессам [18], что, в свою очередь, может привести к дальнейшему накоплению вычислительных погрешностей и снижению точности модели. Проблема размерности может быть также разрешена с использованием суперкомпьютерных кластеров [6, 10] и так называемых интеграционных вычислительных платформ, которые могут быть развернуты на кластерных или облачных сетевых вычислительных ресурсах [23].

Таким образом, на современном этапе модели класса В далеки от всеобъемлющего решения практических задач, связанных с борьбой с лесными пожарами. Однако важность моделей данного класса состоит в выяснении глубинных закономерностей распространения лесных пожаров и подробном анализе частных модельных случаев, таких как распространение пожаров через искусственные и естественные преграды, возникновение новых очагов возгорания перед фронтом пламени, распространения пламени с повышенной скоростью в виде узких полос и т. п. [25–26].

К важному подклассу моделей класса В относятся полумпирические модели, в которых выводятся и используются системы уравнений для изменения во времени границы лесного пожара. Именно положение границы лесного пожара и его изменение с течением времени является одним из основных компонентов входных данных для оперативно-тактического планирования мероприятий по локализации и тушению лесных пожаров. В работах [15–16] построены мажорирующие оценки в рамках методов множеств достижимости, которые на плоскости сводятся к тому, что реальный профиль границы лесного пожара описывается мажорирующим эллипсом или системой эллипсов. При этом параметры эллипса и их изменение во времени могут быть определены по нескольким профилям границы пожара в различные моменты времени, которые могут быть получены посредством спутниковой или аэрофотосъемки, либо по наземным наблюдениям на местности путем определения конечного набора реперных точек (рис. 3).

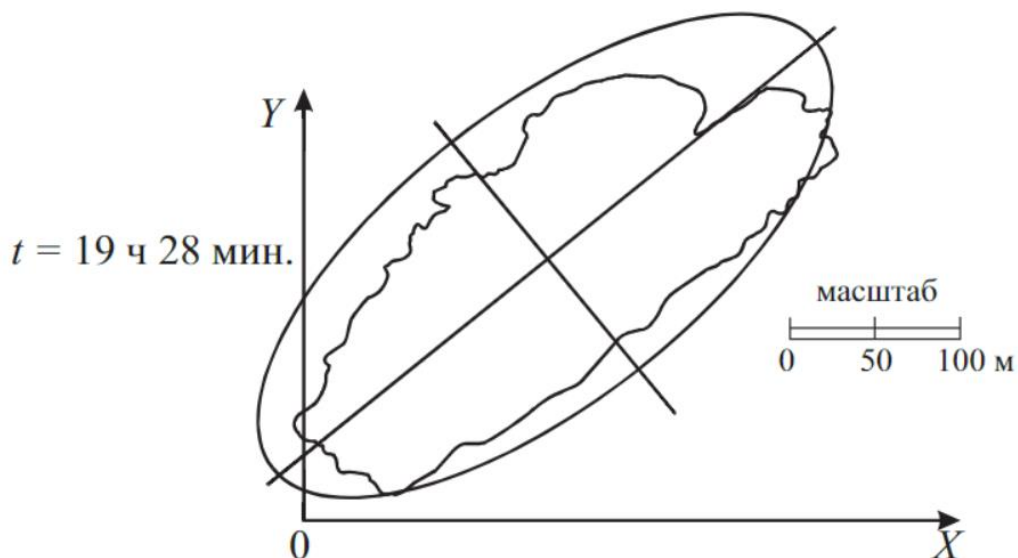


Рис. 3. Аппроксимация контура лесного пожара мажорирующим эллипсом

В заключение данного раздела отметим, что для обеспечения превентивных мер по предупреждению лесных пожаров в состав системы моделей должны быть включены модели прогнозирования пожарной опасности в данной местности. Простейшей моделью такого рода является показатель Нестерова [21], а также показатели пожарной опасности ПВ-1 и ПВ-2. Поскольку одним из главных предикторов пожароопасности является влажность лесных горючих материалов, ее прогнозирование с использованием моделей, верифицированных на реальных данных, является важной составляющей адекватной оценки пожароопасности в данный период на данной территории [19].

Наконец, необходимо учитывать, что измерение показателей и параметров даже для эмпирических или полумэмпирических моделей для реальных лесных массивов является трудоемкой задачей, в связи с чем возникает необходимость оценки параметров моделей косвенным образом по результатам измерения других параметров, допускающих измерение дистанционным образом (на основе данных спутниковых систем или аэрофотосъемки). При этом выбор методов дистанционного зондирования составляет отдельный круг задач. Здесь возможно использование фотосъемки лесных массивов со спутников или самолетов в инфракрасном диапазоне [13], с использованием гиперспектрального подхода [4, 7] или с применением радиометрических методов [8–9].

Выводы. Совокупность рассмотренных глобальных долгосрочных факторов, которые будут существенно влиять на возникновение лесных пожаров и увеличение вероятности их возникновения в пожароопасный сезон на различных территориях Российской Федерации в будущие периоды времени, определяет очевидную необходимость разработки и внедрения комплексной информационно-аналитической компьютерной системы ИАКС для мониторинга и прогнозирования возникновения и развития (распространения) лесных пожаров, а также стратегического и оперативно-тактического планирования мероприятий по их локализации и устранению, включая планирование необходимых сил и средств и их территориального распределения.

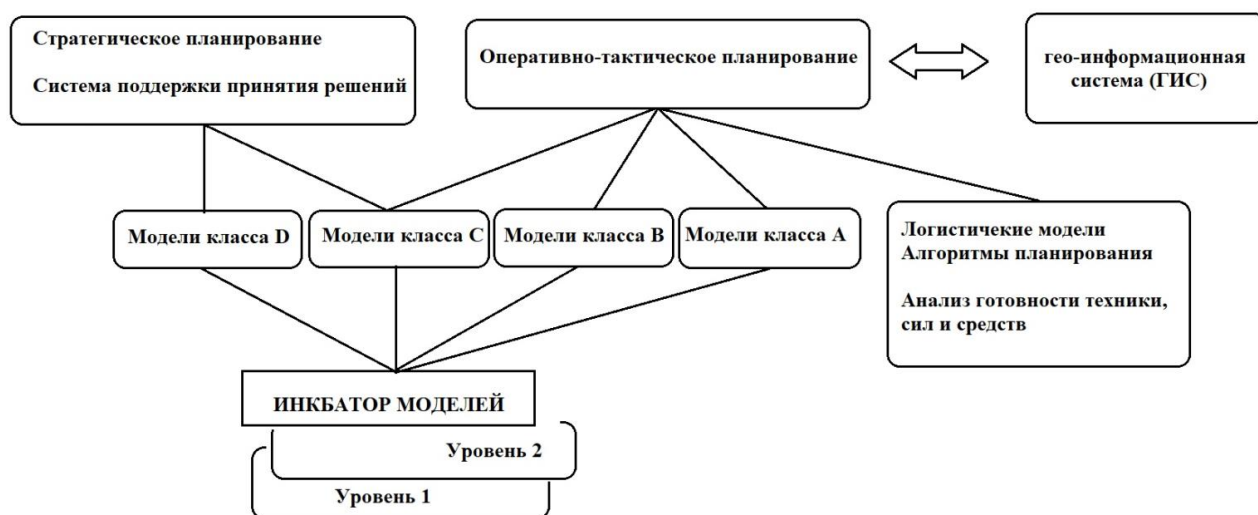


Рис. 4. Алгоритмическая структура ИАКС

По вышеуказанным причинам в состав ИАКС необходимо включить двухуровневый инкубатор моделей. На первом уровне инкубатора специалисты ведомственных организаций (МЧС, Рослесхоз, Минприроды) и независимые исследователи из университетов и частных профильных компаний проверяют разработанные ими модели на основе статистических и иных данных о лесных пожарах на территории РФ за прошедшие периоды времени. На втором уровне новые модели проходят системную проверку, верификацию и апробацию профильными специалистами соответствующих ведомств, по результатам чего принимается решение о практическом использовании данных моделей в борьбе с лесными пожарами (рис. 4).

Литература

1. Об утверждении Правил осуществления контроля за достоверностью сведений о пожарной опасности в лесах и лесных пожарах : постановление Правительства РФ от 18.08.2011 № 687, ред. от 09.06.2014.
2. Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды : приказ Рослесхоза от 05.07.2011 № 287, зарегистрировано в Минюсте РФ 17.08.2011 № 21649.
3. Методика тушения ландшафтных пожаров. М. : МЧС РФ, 2015. 52 с.
4. Родионов И. Д., Родионов А. И., Ведешин Л. А., Виноградов А. Н., Егоров В. В., Калинин А. П. Авиационные гиперспектральные комплексы для решения задач дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 81.
5. Асылбаев Н. А. Математическое моделирование распространения степного пожара // Компьютер. исслед. и моделирование. 2010. Т. 2. № 4. С. 377–384.
6. Барановский Н. В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // Параллельные вычислительные технологии ПАВТ 2007 : тр. Междунар. науч. конф. Челябинск : Изд-во ФУрГУ, 2007. Т. 1. С. 227–236.
7. Борзов С. М., Потатуркин О. И. Классификация типов растительного покрова по гиперспектральным данным дистанционного зондирования земли // Электрон. архив НГУ. 2014. URL: <http://www.nsu.ru/xmlui/handle/nsu/7712> (дата обращения: 20.03.2018).
8. Бородин Л. Ф., Валендик Э. Н., Миронов А. С. СВЧ радиометрические методы и проблемы лесных и торфяных пожаров // Радиотехника и электроника. 1978. № 10. С. 2120–2131.
9. Валендик Э. Н., Богомолов А. А. Дистанционная оценка влагосодержания растительного напочвенного покрова по его СВЧ-излучению // Прогнозирование лесных пожаров : тр. ИЛИД СО АН СССР. Красноярск : ИЛИД СО АН СССР, 1978. С. 26–40.
10. Вдовенко М. С., Доррер Г. А. Моделирование лесных пожаров с использованием кластерных вычислительных систем // Хвойные бореальной зоны. 2009. № 2. XXVI.
11. Кудеяров В. Н., Демкин В. А., Гиличинский Д. А., Горячкин С. В., Рожков В. А. Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
12. Гришин А. М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. 2002. Т. 1. № 4. С. 41–89.
13. Доррер Г. А., Василевский В. В. Оперативная оценка параметров лесных пожаров по их ИК-снимкам на основе решения обратной задачи распространения // Оперативное управление охраной лесов : тез. докл. Всесоюзн. науч.-техн. совещания. Красноярск, 1984. С. 14–16.
14. Доррер Г. А., Ушанов С. В. Расчет оптимальных путей локализации лесных пожаров // Горение и пожары в лесу : тез. докл. Межреспубл. конф. Красноярск, 1984. С. 72–74.
15. Доррер Г. А. Оптимальные гарантированные оценки параметров процессов распространения // Совещание-семинар по механике реагирующих сред : тез. докл. VII Всесоюзн. конф. Красноярск, 1988. С. 115–117.
16. Доррер Г. А. Теория распространения лесного пожара как волнового процесса : дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 1989.
17. Конев Э. В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск : Наука, 1977. 239 с.

-
18. Кулешов А. А., Мышецкая Е. Е., Якуш С. Е. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели // Матем. моделирование. 2016. Т. 28. № 12. С. 20–32.
19. Курбатский Н. П. Сезонные изменения влажности хвои, листьев и веточек у основных древесных пород тайги // Вопр. лесной пирологии : тр. ИЛиД СО АН СССР. Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1970. С. 155–185.
20. Курбатский Н. П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов // Вопр. лесной пирологии : тр. ИЛиД СО АН СССР. Красноярск : ИЛиД СО АН СССР, 1970. С. 5–58.
21. Нестеров В. Г. Горимость леса и методы ее определения. Л. : Гослесбумиздат, 1949. 74 с.
22. Остриков В. Н., Плахотников О. В., Кириенко А. В. Обработка гиперспектральных данных, получаемых с авиационных и космических носителей // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 2. С. 243–251.
23. Перминов В. А., Шатохин А. А. Математическое моделирование процессов тепломассопереноса при пожарах с использованием программного обеспечения Phoenix // Вестн. науки Сибири. 2014. № 1 (11). С. 34–39. URL: <http://sjs.tpu.ru> (дата обращения: 23.03.2018).
24. Фадеенков О. В. Оптимальная маршрутизация при управлении борьбой с лесными пожарами : дис. ... канд. техн. наук. СибГТУ, Красноярск, 2006.
25. Халдина Е. А. Математическое моделирование распространения верховых лесных пожаров с учетом противопожарных преград // Вестн. науки Сибири. 2013. № 4 (10). С. 98–103. URL: <http://sjs.tpu.ru> (дата обращения: 23.03.2018).
26. Шипулина О. В. Математическое моделирование распространения фронта вершинного лесного пожара в однородном лесном массиве и вдоль просеки : дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2000. 25 с.
27. Byram G. M., Martin R. E. The modeling of fire whirlwinds // Forest Science. 1970. V. 16. № 4. P. 386–398.
28. Fons W. L. Analysis of fire spread in light forest fuels // Journal of Agricultural Researches. 1946. Vol. 72. № 3. P. 93–121.
29. Rothermel R. C. A mathematical model for fire spread predictions in wildland fuels // USDA Forest Service Research. 1972. № 115. 40 p.