

УДК: 630.43

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ БОРЬБОЙ С ПРИРОДНЫМИ ПОЖАРАМИ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2016 И.А. Буслов¹, А.Е. Гордеев¹, Г.А. Доррер¹, С.В. Кобыжакова², С.В. Яровой¹

¹ Сибирский государственный аэрокосмический университет, г. Красноярск

² Сибирская пожарно-спасательная академия МЧС России, г. Железногорск

Статья поступила в редакцию 28.09.2016

Предложен проект системы управления борьбой с природными пожарами, включающей программно-аппаратный комплекс для разведки и идентификации пожаров на базе беспилотного летательного аппарата, комплекс математических моделей и компьютерную имитационную систему для обучения оперативного персонала.

Ключевые слова: *беспилотный летательный аппарат, природный пожар, математическое моделирование, система обучения, персонал*

Стихийные природные пожары, к которым относятся пожары в лесах, степях, на торфяниках и других природных объектах – опасные и динамичные процессы, наносящие большой ущерб природе и объектам инфраструктуры, часто приводящие к гибели людей. Во многих странах, в том числе и в России, ежегодно приходится вести борьбу с природными пожарами, привлекая для этой цели большое количество противопожарных сил и средств. При этом возникают задачи рационального планирования и управления этими силами и средствами. Для их решения разработан ряд регламентирующих документов [1, 2]. Ведутся работы по созданию теории управления процессами борьбы с природными пожарами [3], однако в этих работах, как правило, предполагается, что управление осуществляется в разомкнутом режиме без учета фактического состояния системы. Не учитываются также возможные помехи и неполнота информации об объекте управления.

В последние годы в связи с созданием космических систем мониторинга природных пожаров таких, как ИСДМ-Рослесхоз (Рослесхоз), Космоснимки (фирма СКАНЭКС), Каскад (МЧС России), а также с быстрым развитием технологии использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) появилась возможность в режиме реального времени оценивать параметры природных пожаров, что открывает путь к созданию оперативных систем управления с обратной связью [4].

В настоящей работе рассматриваются основные параметры проекта многофункциональной информационно-управляющей системы, структурная схема которой показана на рис. 1. Система предназначена для мониторинга и оперативного управления борьбой с природными пожарами и основана на использовании космической информации и данных, полученных с БПЛА. Система также может использоваться для обучения оперативного персонала противопожарных служб. Работа выполняется совместно сотрудниками Сибирского государственного аэрокосмического университета и Сибирской пожарно-спасательной академии МЧС России.

Задачу управления противопожарными силами и средствами предлагается разделить на несколько уровней [4]. На первом уровне рассматривается модель с единственной фазовой переменной – площадью, пройденной пожаром. Динамика площади пожара является наиболее важным показателем, определяющим, с одной стороны, ущерб от пожара, а с другой – успешность борьбы с ним. Для этой переменной составляется уравнение динамики, на основе которого возможно получение алгоритма оптимального управления с помощью теории аналитического конструирования регуляторов (АКОР) [5]. Полученное решение служит планом-заданием для реализации и корректировки решений на последующих уровнях.

На втором уровне происходит переход к новой переменной, которая определяет объем работы по ликвидации пожара. Такой переменной служит протяженность горящей кромки, которую необходимо потушить. Этот параметр может быть оценен либо путем обработки снимка реального пожара, либо путем расчета и прогнозирования на основе геометрической модели процесса распространения пожара [3]. Здесь же решается задача по выбору состава и необходимого количества противопожарных сил и средств.

Буслов Игорь Александрович, аспирант. E-mail: vt244@mail.ru

Гордеев Алексей Евгеньевич, аспирант. E-mail: sincler55@yandex.ru

Доррер Георгий Алексеевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: g_a_dorrer@mail.ru

Кобыжакова Светлана Владимировна, адъюнкт. E-mail: svetkob84@mail.ru

Яровой Сергей Викторович, аспирант. E-mail: ach_bask@mail.ru

Далее производится моделирование процесса локализации и ликвидации пожара на карте местности с помощью специальной ГИС-ориентированной системы, которая прогнозирует конфигурацию пожара и определяет в динамике

величину его площади, длину горящей кромки и другие параметры. Эти данные также могут получаться и корректироваться путем непосредственной съемки пожара с помощью БПЛА.

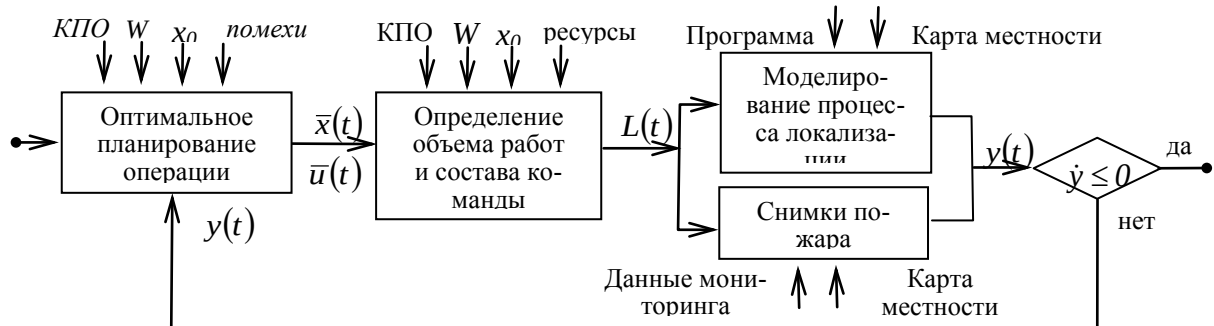


Рис. 1. Структурная схема системы управления противопожарными силами и средствами: $x(t)$ – фактическая площадь пожара; $u(t)$ – управляющее воздействие; $y(t)$ – оценка площади пожара; КПО – класс пожарной опасности; $L(t)$ – длина горящей кромки; W – скорость ветра

Полученная тем или иным способом оценка величины площади пожара является сигналом обратной связи, она поступает на верхний уровень системы, где с помощью фильтра Калмана корректируется управляющее воздействие, и весь цикл управления повторяется. Критерием останова описанного процесса управления является прекращение роста площади, пройденной пожаром, то есть равенство нулю производной величины площади по времени. Качество процесса управления оценивается квадратичным критерием, как это принято в АКОР.

Структура системы. Система состоит из следующих элементов:

- программно-аппаратный комплекс, включающий БПЛА марки Zala421, средства связи и телекоммуникаций;

- методы и алгоритмы идентификации параметров моделей природных пожаров на основе данных космического мониторинга лесов и БПЛА;
- математические модели динамики природных пожаров и процессов их ликвидации, реализованные в виде программно-информационной системы, и ориентированные на использование при принятии решений в службах охраны лесов и МЧС;
- компьютерная имитационная система для поддержки оперативного принятия решений и обучения персонала тактике борьбы с природными пожарами [14].

Структура разрабатываемой информационной системы представлена на рис. 2.

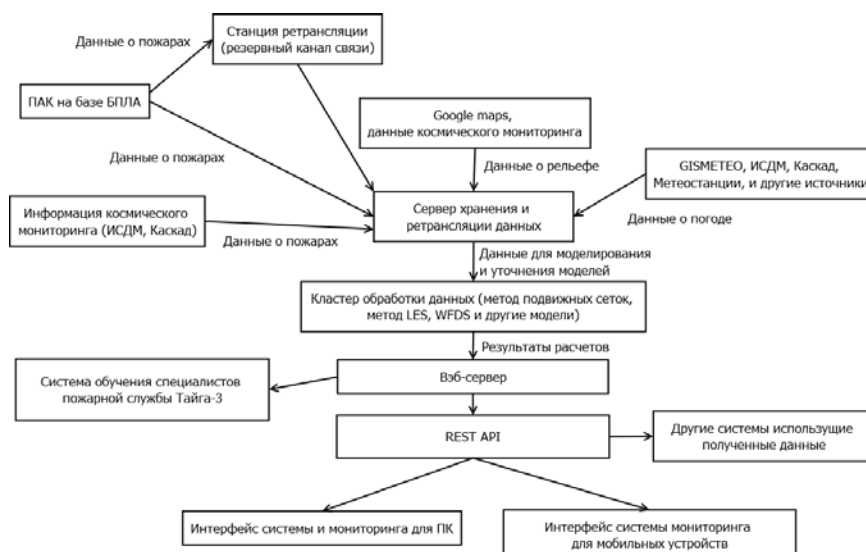


Рис. 2. Структурная схема информационной системы управления борьбой с природными пожарами и обучения оперативного персонала

Информационная система выполняет последовательно следующие функции:

- сбор данных,
- обработка информации,
- передача информации пользователям.

На этапе **сбора данных** используются следующие источники:

1) данные о действующих природных пожарах и о погоде, получаемые из информационных систем космического мониторинга лесов «Каскад» и «ИСДМ Рослесхоз». Эти информационные системы используются структурами, связанными с тушением природных пожаров и содержат актуальные данные, однако, как правило, невысокого разрешения.

2) интернет сайт Google Maps. Из этого источника разрабатываемая система получает данные о рельефе местности – наиболее точные данные, имеющиеся в открытом доступе, а также предоставляет удобное API.

3) данные от аппаратуры, установленной на БПЛА, и собираемые непосредственно с места действующего пожара. Эти данные обладают высоким разрешением, содержат информацию, как о пожаре, так и о лесу и метеорологической обстановке. Данные передаются на сервер хранения и ретрансляции данных по основному (GPRS) каналу и резервному (радио) каналу через станцию ретрансляции. Данные из разных источников, поступившие на сервер, анализируются и сравниваются, и после первичной обработки заносятся в базу данных, для дальнейшего использования.

Данные могут быть получены различными интерфейсами через REST-API и служат основой для оперативного принятия решений специалистами пожарной службы, а так же могут быть использованы сторонними информационными системами.

На этапе **обработки данных** производится оценка конфигурации и параметров действующего пожара, уточнение и корректировка математических моделей с учетом вновь поступающих данных, моделирование процесса распространения пожара по одному или нескольким алгоритмам. Производится оперативное прогнозирование распространения пожара, оценка необходимых сил и средств для его ликвидации. Полученные данные могут быть использованы в информационной системе «Тайга-3» в качестве исходных, уточняющих и статистических данных при обучении и тренировке персонала.

На этапе **передачи данных пользователям**. Вся информация, полученная в системе, хранится на сервере, откуда отправляется заинтересованным пользователям. Используется типичный сервер баз данных (в прототипе использована СУБД MySQL) под управлением ОС

GNU/Linux Debian. Обмен данными с БПЛА осуществляется по протоколу HTTP через REST API. Для обработки данных (в связи с ее асинхронностью, сложной предсказуемостью продолжительности этапов обработки и многоступенчатостью) может быть использован мультиагентный подход. Агенты 1-го типа получают «сырые данные от БПЛА» и заносят их в базу данных. Агенты 2-го типа дополняют эти данные (используя Google Maps API) характеристиками рельефа в окрестностях пожара. Агенты 3-го типа (исходя из направления и угла наклона датчика, географических координат БПЛА в момент обнаружения, данных рельефа, высоты БПЛА над уровнем моря) уточняют координаты точек горящей кромки. Агенты 4-го типа служат для обмена обработанными данными с другими частями разрабатываемого приборно-аппаратного комплекса (ПАК).

Агентная математическая модель динамики пожара и процесса его ликвидации. В настоящее время создано большое количество математических моделей в рассматриваемой нами области [6-9], они различаются по степени учета физико-химических процессов при горении растительных материалов (РГМ) и вычислительной сложности. Однако большинство из них не описывают одновременно процессы распространения природного пожара и его ликвидации. Авторами для этой цели предлагается агентный подход. Агентное моделирование (agent-based modeling, ABM) представляет собой новый подход к имитационному моделированию, который направлен на моделирование сложных динамических систем с помощью исследования поведения и взаимодействия автономных и независимых субъектов (агентов) в некоторой среде [10].

Для моделирования лесопожарных ситуаций особый интерес также представляют геоинформационные системы (ГИС), которые обладают возможностями хранения и визуализации пространственной информации. Совместное использование агентного моделирования и ГИС позволяет объединить преимущества обоих направлений, применить перспективные средства для моделирования процессов, протекающих в условиях реального ландшафта. Идея моделирования кромки природного пожара с помощью агентного подхода не нова [11, 12]. Агентные модели такого рода создавались с помощью специализированных систем для программного описания деятельности агентов и состояния среды (агентных платформ), таких как NetLogo, StarLogo, Repast Simphony и др. Данный подход позволяет упростить программную реализацию имитационной модели, но значительно затрудняет ее интеграцию с ГИС. Кроме того, в указанных работах производится моделирование

свободно распространяющегося пожара, без моделирования противопожарных сил и средств.

В разработанной авторами системе среда моделирования представляет собой участок карты реальной местности с нанесенным на нее слоем, описывающим растительные горючие материалы (РГМ). Таким образом, имеется возможность совмещать данные ГИС и агентной модели. В модели используются информация о населенных пунктах, реках, озерах, дорогах, оврагах, лесных насаждениях и др. Позиционирование на карте производится путем задания пространственных координат, различных для каждого объекта. В качестве модели горючего используется модель тонкого слоя [9]. В модели тонкого слоя лесной покров рассматривался как однородный слой на поверхности Земли с усредненными характеристиками РГМ. Эти характеристики определяются на основании пирологического описания выделов карты лесов. Для каждого местоположения на карте заранее задается тип поверхности, определяющий наличие основных проводников горения (ОПГ) и их тип. В зависимости от типа ОПГ определяется базовая скорость распространения кромки пожара $V_{\text{ОПГ}}$, м/мин, и теплота воспламенения слоя Q , Дж/м².

В качестве основных показателей среды принимаются следующие параметры:

- величина скорости ветра по данным ближайшей метеостанции $V_{\text{в}}$;
- вектор направления ветра W ;
- класс пожарной опасности по условиям погоды КПО.

Данные параметры в значительной степени влияют на скорость и направление распространения пожара, а также интенсивность горения.

В модели использованы два типа агентов. Агенты типа А используются для моделирования поведения природного пожара и в совокупности представляют контур пожара на карте. Модель допускает наличие одновременно несколько таких контуров, распространяющихся независимо друг от друга в различных частях карты. Основной целью, которой агенты А руководствуются при исполнении – это перемещение по среде моделирования. Расчет пространственных координат данных агентов на каждом шаге моделирования осуществляется по заранее заданному закону. Во время исполнения модели агенты А могут порождать новых агентов или погибать при определенных условиях. Расчет новых координат A_x , A_y на каждой итерации моделирования производится с помощью алгоритма, основанного на методе подвижных сеток [3].

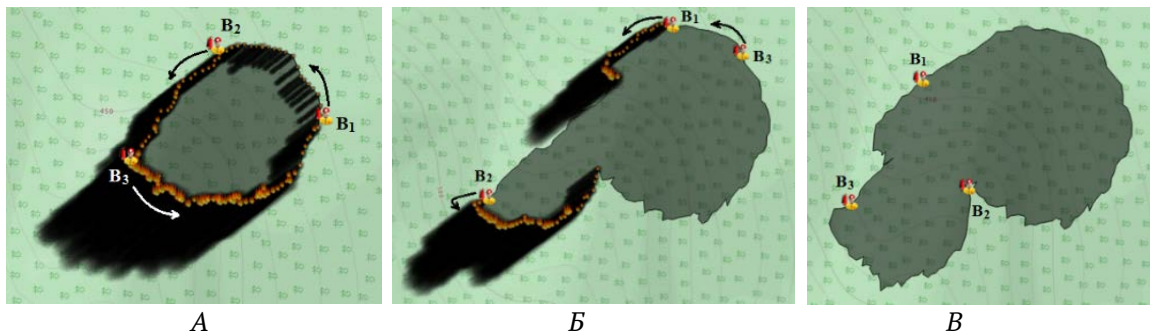


Рис. 3. Модель ликвидации пожара тремя командами, роль которых играют агенты B_1 , B_2 , B_3 .

Стрелками показано направление движения команд. Показаны также дымовые шлейфы, порождаемые агентами типа А

Слайд А: Начальная конфигурация пожара, команды приступили к тушению; $x(0) = 45$; Слайд Б: Команда ВЗ, завершив тушение своего участка кромки, приступила к тушению участка В₁; $x(4) = 130$. Слайд В: Локализация завершена; $x(6) = 150$. Таким образом, результаты моделирования показывают, что пожар локализован на 6-м шаге

Агенты типа В имитируют действия противопожарных сил и оказывают воздействие на агентов первого типа. При исполнении агенты типа В руководствуются одной единственной целью – «потушить» все очаги горения. Для этого агент В перемещается по среде к ближайшему

агенту A_i , и воздействует на его показатель интенсивности горения I . Как только данный показатель становится равным 0, агент A_i меняет свое состояние на «не горит», а агент В перемещается к следующему агенту $A_{R(i)}$.

Компьютерная имитационная система «Тайга-3». Целью создания системы «Тайга-3» является повышение качества подготовки и переподготовки специалистов, работающих в сфере охраны лесов от пожаров. Цель игры – локализовать пожар, окружив его непроходимыми для огня полосами, добиваясь минимума полного ущерба, который складывается из стоимости поврежденного пожаром леса и затрат на локализацию

пожара. В распоряжении игрока имеется набор сил и средств, которые он может выбирать для

локализации пожара, но каждое из них требует определенных затрат.

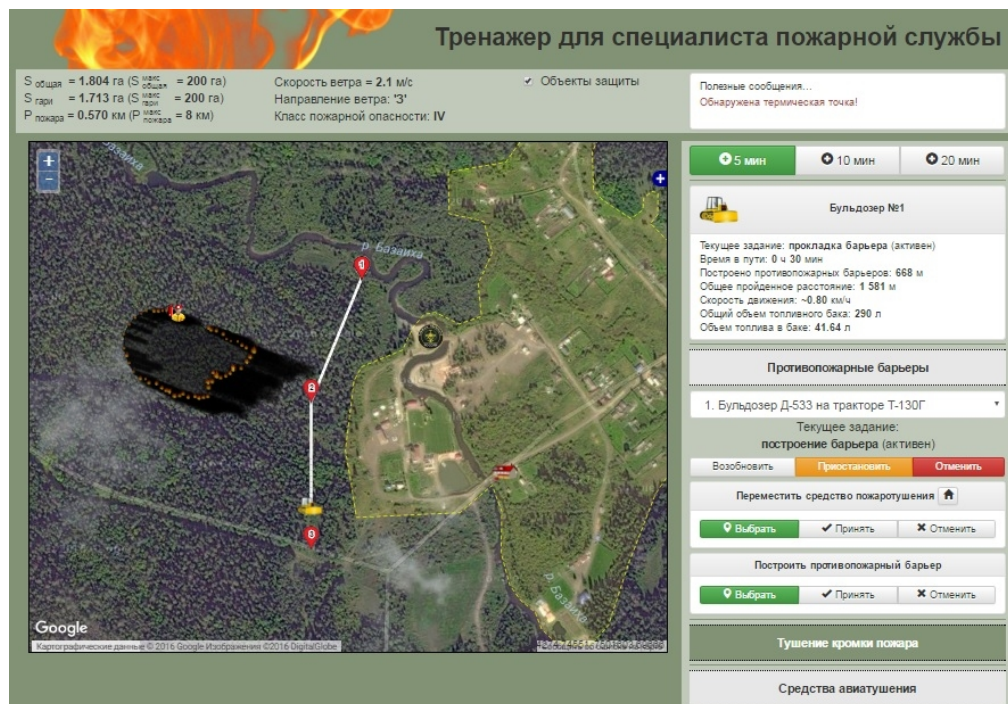


Рис. 4. Вид экрана учебно-тренажерной системы «Тайга – 3».

Решается задача по локализации природного пожара и защите населенного пункта

Ход игры отображается на экране монитора, воспроизводящем карту лесной территории. На картах выделены однородные участки леса, где скорость распространения пожара одинакова. При проведении обучения карты для каждого из игроков выбираются случайным образом из имеющегося набора, этот набор отражает особенности лесов региона. Руководитель обучения может по ходу игры изменять параметры пожара и доступные средства борьбы. Возможно динамическое управление локализацией пожара путем высадки десанта и целеуказанием для движения пожарных команд. Система разработана на основе агентного подхода и технологии геоинформационных систем, что позволяет объединить преимущества обоих направлений, применить перспективные средства для моделирования процессов, протекающих в условиях реального ландшафта. Проект реализуется в виде сетевой геоинформационной системы с привязкой к реальной местности, состоящей из серверной (PHP) и клиентской части (JavaScript). Для уменьшения нагрузки на сеть и лучшей масштабируемости большинство расчетов производится на клиентской части, что позволяет распределить нагрузку между всеми устройствами равномерно. На данный момент разработана

программная платформа системы, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [14].

Выводы: по отзывам специалистов МЧС предлагаемая система представляет большой интерес для оперативного управления борьбой с природными пожарами. Достоинствами системы является многофункциональность – сочетание функций разведки пожара, его идентификации, оперативной выработки альтернатив решений по борьбе с пожаром, а также ее автономность, что важно при работе в удаленных районах. Положительной чертой системы является также возможность обучения персонала в режиме тренажера. В настоящий момент создан прототип системы и проводятся предварительные испытания в условиях полигона. Испытание системы в условиях действующих природных пожаров планируется в пожароопасный сезон 2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. – М., 1985. 96 с.
2. Андреев, Ю.А. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае-Саянского экорегиона): справочное пособие // Ю.А. Андреев, А.В. Брюханов. – Красноярск, 2011. 272 с.

3. *Доррер, Г.А.* Динамика лесных пожаров. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 404 с.
4. *Доррер, Г.А.* Система управления борьбой с природными пожарами // Информатизация и связь. 2016. №3. С. 66-72.
5. *Афанасьев, В.Н.* Математическая теория конструирования систем управления // *В.Н. Афанасьев, В.Б. Колмановский, В.Р. Носов.* – М.: Высшая школа, 1998. 574 с.
6. *Andrews, P.L.* Behave Plus fire modeling system, version 2.0: User's Guide // *P.L. Andrews, C.D. Bevins, R.C. Seli* // USDA Forest Service Gen. Techn. Rep. RMRS-GTR-106WWW. Ogden, 2003, 45 p.
7. *Finney, M.A.* FARSITE: Fire are simulator model, development and evaluation. - USDA Forest Service, Res. Paper RMRS-RP-4. Ogden, 1998, 47 p.
8. *Mell, W.* A physics-based approach to modeling grassland fires / *W. Mell, M.A. Jenkins, J. Gould, Ph. Cheney* // International Journal of Wildland Fire. 2007. Vol. 16. P. 1-22.
9. *Shatalov, P.S.* Parallel computation of forest fire and its interaction with infrastructure objects / *P.S. Shatalov, G.A. Dorrer* // Fourth Fire Behave and Fuels Conference, conference abstracts. St. Petersburg. 2013. P. 3.
10. *Аксенов, К.А.* Динамическое моделирование мультиагентных процессов преобразования ресурсов // *К.А. Аксенов, Н.В. Гончарова.* - Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ. 2006. 311 с.
11. *Кухта, В.Б.* Метод моделирования распространения низового пожара в лесных насаждениях с использованием агентного подхода // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2014. №5. С. 92-97.
12. *Dai, D.* Simulating fire spread in a community using an agent-based model / *D. Dai, Y. Zhang* // Proceedings of the 12th International Conference on Geo-Computation. LIESMARS Wuhan University, Wuhan, China, 2013. P. 130-132.
13. *Яровой, С.В.* Применение агентных моделей для имитации процесса локализации природных пожаров // Электронный научный журнал «Программные продукты, системы и алгоритмы». 2016. № 2
14. *Буслов, И.А.* Платформа для учебно-тренажерной системы по основам тактики борьбы с лесными пожарами / *И.А. Буслов, С.В. Яровой, Г.А. Доррер.* Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015662521, зарегистрировано 26.11.2015.

CONTROL SYSTEM OF FIGHT AGAINST THE WILD FIRES ON THE BASIS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

© 2016 I.A. Buslov¹, A.E. Gordeev¹, G.A. Dorrer¹, S.V. Kobyzhakova², S.V. Yarovoy¹

¹ Siberian State Aerospace University, Krasnoyarsk

² Siberian Rescue and Fire Fighting Academy of Emercom Russia, Zheleznogorsk

The project of control system for fight against the wild fires including a hardware-software complex for investigation and identification of fires on the basis of unmanned aerial vehicle, complex of mathematical models and computer simulation system for training the operation personnel is offered.

Key words: *unmanned aerial vehicle, wild fire, mathematical model operation, system of tutoring, personnel*

Igor Buslov, Post-graduate Student. E-mail: vt244@mail.ru

Aleksey Gordeev, Post-graduate Student. E-mail: sincler55@yandex.ru

Georgiy Dorrer, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: g_a_dorrer@mail.ru

Svetlana Kobyzhakova, Adjunct. E-mail: svetkob84@mail.ru

Sergey Yarovoy, Post-graduate Student. E-mail: ach_bask@mail.ru