

В.И. Гончаренко¹, Лэ Луо², М.Ю. Прус³ (Россия, Тайвань)
(¹МАИ, ²Университет Чунг Хуа, ³Академия ГПС МЧС России;
e-mail: mai@mai.ru)

МОНИТОРИНГ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ГРУППОЙ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Разработан программный комплекс мониторинга лесных пожаров группой беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, модель лесного пожара.

V.I. Goncharenko, L. Luoh, M.Yu. Prus (Russia, Taiwan)
**THE MONITORING OF FOREST FIRES
BY THE USE OF DRONE'S GROUP**

The software complex of monitoring of forest fires by the use of drone's group is developed.
Key words: drone, forest fire model.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 27 июля 2015 г.

В настоящее время отмечается тенденция усиления тяжести последствий лесных пожаров. Вместе с тем, остаются нераскрытыми огромные потенциальные возможности беспилотной авиации для применения её в интересах борьбы с этими пожарами. К числу основных преимуществ **беспилотных летательных аппаратов (БПЛА)** относятся большая манёвренность, малые размеры, невысокая оптическая и радиолокационная заметность, отсутствие затратных систем жизнеобеспечения человека, возможность объединения БПЛА для группового решения задач. Все объективные предпосылки говорят о том, что одновременная реализация всех перечисленных и ряда других возможностей беспилотной авиации могла бы способствовать повышению пожарной безопасности окружающей природной среды [2].

Следует подчеркнуть, что эффективность использования БПЛА неразрывно связана с созданием сетей таких аппаратов. Сетевая организация может быть различной по своей структуре, но определяется высокой степенью взаимодействия как между самими БПЛА, так и между центрами, контролирующими их движение. При выполнении задач **группировкой БПЛА** перспективным является придание каждому БПЛА высокой степени автономности и самостоятельности в решении общих задач.

К числу важнейших задач обеспечения экологической безопасности относятся задачи мониторинга окружающей среды, решение которых уже признано целесообразным возложить на БПЛА. Но известные работы рассматривают эту задачу зачастую без учёта условий группового движения автономных БПЛА в сложных условиях мониторинга.

При практическом использовании БПЛА как элемента сформированной некоторой *сети объектов управления*, решающих общую задачу мониторинга, его необходимо наделить определёнными функциями [3]:

- способность действовать автономно;
- способность проводить анализ среды движения;
- механизм коммуникации, обмена информацией;
- способ изменения стратегии движения;
- механизм изменения целераспределение в процессе полёта;
- обязательства перед другими БПЛА.

Таким образом, каждый БПЛА действует автономно, функционирует с самоконтролем своих действий и внутреннего состояния, принимает решения в зависимости от условий среды, учитывая цели и намерения других БПЛА, выполняющих эти же или смежные задачи. Препятствия он преодолевает либо самостоятельно, либо используя информацию от других БПЛА, полученную в ходе обмена сообщениями. Вместе с тем, каждый БПЛА одновременно действует в рамках коллективного поведения. В процессе коллективного поведения БПЛА может извещать других БПЛА о возможности и/или невозможности выполнения им поставленной задачи, участвовать в переговорах БПЛА, "порождать" новые БПЛА (запрашивать помощь), объявлять о готовности жертвовать собой или просить пожертвовать собой другие БПЛА, просить активировать функции других БПЛА, сценариев деятельности, запоминания текущего состояния других агентов, объявление своих полномочий, передача своих обязательств по выполнению задач другим агентам и др.

В такой постановке БПЛА можно рассматривать как интеллектуального агента и использовать при моделировании его функционирования многоагентный подход [4].

Сформулируем следующую практическую задачу. На географической карте Российской Федерации выделяется зона, подлежащая мониторингу [5]. Она описывается границами (возможно неправильным многоугольником), распределением ограничений (запретов) на полет по данной территории, вдоль границ и по высоте. В процессе движения ограничения могут как "сниматься", так и возникать по результатам движения. В зону мониторинга направляется группировка из *M* БПЛА с задачей наблюдения и распознавания чрезвычайной ситуации и передачи доклада в Центр мониторинга. БПЛА действуют в агрессивной среде и могут становиться в процессе решения задач технически неработоспособными.

Типовая задача для отдельного БПЛА может рассматриваться следующим образом: двигаясь в группе себе подобных БПЛА, по заданной начальной позиции, при использовании собственной базы знаний об окружающей среде, в условиях потенциальных пространственно-временных ограничений (невозможность пролёта в определённых пространственных зонах и др.), при активном обмене информацией друг с другом относительно изменений окружающей среды, своего целеполагания, с учётом поведения других БПЛА построить оп-

тимальную пространственно-временную траекторию облёта совместно с группой БПЛА некоторого заданного пространства, выполняя необходимые действия по мониторингу заданного пространства.

При математическом описании движения БПЛА целесообразно представить как точку в четырехмерном пространстве (три пространственные координаты и одна временная). Предполагается, что модель движения БПЛА определена. В процессе движения лишь вырабатываются программы управления. Запас топлива на борту БПЛА ограничен и составляет H кг. Расход топлива составляет h кг/ч. БПЛА должен вернуться на свою базу для последующего использования. При неисправности и/или невозможности выполнения задачи БПЛА извещает другие БПЛА и просит "помощи".

Предполагается, что средства наблюдения каждого БПЛА позволяют обследовать географическую зону размером $m \cdot n$ км (по территории) и h км (по высоте). Каждый БПЛА оснащён датчиком опасности. В датчик закладывается лингвистический закон опасности с функцией принадлежности $f(g)$. При превышении заданного значения $f(g)$ вырабатывается сигнал опасности (нарушение ограничений), который передается внешним источникам и другим БПЛА.

В качестве общего подхода к построению моделей пространства мониторинга выбраны методы имитационного моделирования. В качестве программной среды для построения модели мониторинга выбрана среда AnyLogic.

В основу имитационной модели пространства мониторинга положена плоская модель лесного пожара, наблюдаемая сверху через "мутное стекло" неопределённости объективной картины. Модель лесного пожара реализует эстафетный алгоритм разнонаправленной передачи возгорания от горящего участка леса (агента-донора) к его соседним участкам (агентам-акцепторам), при этом граф состояний имеет только прямые переходы с заданной интенсивностью между агентами: от невозмущённого участка леса до участка леса, выгоревшего дотла. В свою очередь, модель неопределённости объективной картины лесного пожара "размывает" моделируемые контуры пожара и вносит в события временную задержку. Тем самым моделируется ситуация недостатка актуальной информации о полном множестве участков леса, а также моделируется задымление над горящим лесом и отстающее по времени осведомление сил и средств пожаротушения о динамике развития пожара.

Разработанная математическая модель мониторинга лесного пожара с использованием средств имитационного моделирования *AnyLogic* позволила с достаточной степенью достоверности описать динамическую внешнюю среду.

При разработке модели сетевого информационного взаимодействия БПЛА за основу взята модель технологической наземной радиосети обмена данными [9]. При этом основу сети образует канал множественного доступа, объединяющий всех БПЛА в единую информационную систему. Накопление и обновление объективной информации о состоянии наблюдаемой внешней среды производится совместными усилиями БПЛА, при этом текущее состояние среды фиксируется на виртуальной "доске объявлений".

При выполнении общей задачи БПЛА проводят "переговоры" с использованием виртуальной "доски объявлений", на которой каждый БПЛА размещает информацию о результатах мониторинга и своих возможностях по выполнению задач. Разработаны алгоритмы проведения переговоров, позволяющие осуществить перераспределение задач между БПЛА при невыполнении отдельными БПЛА своих функций. Ранжирование целей управления производится исходя из целевой функции группы БПЛА, заданной перед началом эксперимента, и является особенно актуальным в случае нехватки средств для своевременного выполнения всех задач в контексте общей групповой цели. При наличии нескольких пересекающихся задач предпочтение отдаётся той из них, которая сформирована БПЛА, находящимся в зоне наиболее важного с точки зрения решения общей задачи мониторинга.

Для формирования исходных траекторий облёта всей зоны мониторинга она разбита на участки. Целераспределение для БПЛА (соответствие задач облёта зон мониторинга номерам БПЛА) осуществляется с использованием алгоритмов задачи коммивояжера, где в качестве ключевого ограничения выбран запас топлива на борту БПЛА.

Программный комплекс (ПК) мониторинга местности, обнаружения и локализации лесных пожаров построен в среде моделирования *AnyLogic* и позволяет отображать процесс мониторинга местности и обнаружения, локализации лесных пожаров с помощью БПЛА.

Участок местности представляется в ПК в виде двухмерного пространства, имитирующего лес и совокупность его характеристик (наличие сухостоя, плотность деревьев, породы деревьев и пр.) с учётом характеристик окружающей среды (температура воздуха, сила и направление ветра, интенсивность дождя).

Двумерное дискретное пространство представляет собой прямоугольный массив ячеек, полностью или частично занятых агентами. В одной ячейке может находиться не больше одного агента. Поддержка этого типа пространства в *AnyLogic* включает в себя возможности по распределению агентов по ячейкам, их перемещению в соседние или любые другие ячейки, определению того, какие агенты являются соседями (согласно выбранной модели соседства), нахождению свободных ячеек и т.д.

В ходе разработки ПК решены следующие задачи:

1. Реализована модель соседства Мура, согласно которой каждый участок пространства с вероятностями, определяемыми характеристиками этого пространства и окружающей среды, способен вызывать определенные реакции соседних участков. Модель Мура отображает участок леса, в котором соседними считаются 8 ячеек, располагающиеся к северу, югу, востоку, западу, северо-востоку, северо-западу, юго-востоку и юго-западу от данной.

2. Построена модель леса для визуализации процесса горения и взаимосвязей между соседними участками.

3. Выявлены зависимости скорости и направления распространения огня от внешних факторов и изменение их непосредственно в ходе моделирования.

В ПК воспроизводится участок земной поверхности (зона облёта), в рамках которой БПЛА производит мониторинг. БПЛА должен производить облёт местности таким образом, чтобы просмотреть всю зону облёта. Интерфейс пользователя ПК является интерактивным и позволяет изменять различные параметры движения БПЛА.

К задачам исследования с помощью ПК относится моделирование следующих процессов:

- локализация эпицентра пожара;
- анализ данных (расчёт необходимых данных для полёта): дальность полёта, количество топлива и т.д.;
- выбор оптимального маршрута облёта территории;
- принятие мер (отдача приказа БПЛА на тушение данного очага, его полет на заправку водой и на эпицентр пожара с целью тушения, а также возврат к месту базирования).

В ПК реализован следующий алгоритм решения задачи. Для разработки алгоритма оптимального облёта местности расчётная территория полёта БПЛА поделена на три зоны таким образом, чтобы БПЛА, облётая данные зоны, мог более точно определять и локализовать лесные пожары, зондируя местность.

Разработанный алгоритм облёта участка местности БПЛА представлен в среде моделирования *AnyLogic* в диаграмме состояний *Statechart*, которая иллюстрируется на рис. 1.

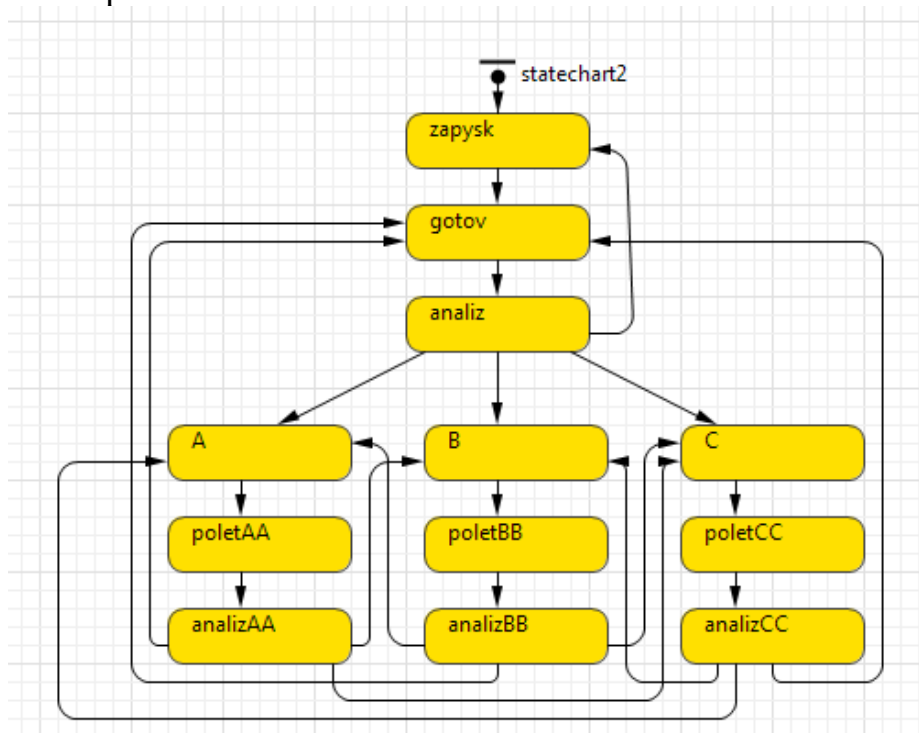


Рис. 1. Блок-схема алгоритма выбора оптимального маршрута облёта

Первые два блока ("zapysk" и "gotov"), изображённые на рис. 2, отвечают за подготовку БПЛА к полетам, а именно: установка начального значения топливного бака, определение точек облёта.

В блоке "*analis*" производится расчёт и анализ того, какая точка ближе всего к базированию БПЛА. Происходит расчёт затрат топлива на полет в заданную точку и обратно на базу, иначе БПЛА, долетев в одну из точек, может не вернуться на базу, так как ему не хватит топлива. В блоке "*analis*" происходит выбор первой точки облёта и далее в зависимости от того, какая точка была выбрана, переход на блок "A", "B" или "C".

В блоках "A", "B", "C" происходит запись в базу данной точки. Это сделано для того чтобы при выполнении алгоритма не происходило заикливания, и моделировался облёт БПЛА всех точек, на которые ему хватит запаса топлива на борту.

Каждая точка на карте (A, B и C) имеет координаты x и y . Если точка "A" (с координатами x_1 и y_1) и точка "B" (с координатами x_2 и y_2) две точки плоскости Oxy , а AB – расстояние между ними, то AB вычисляется из соотношения

$$AB = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

Соответствующим образом осуществляется расчёт расстояний BC и CA:

$$BC = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}.$$

$$CA = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2}.$$

где x_3 и y_3 – координаты точки "C".

Общий путь S , который пролетит БПЛА:

$$S = AB + BC + CA.$$

Блок "*polet*" имитирует перелёт БПЛА в заданную точку и, после отображения прилёта, передаёт данные расчётов в блок "*analis*". Далее происходит такой же анализ и расчёт по алгоритму, как было описано выше, но уже для двух оставшихся точек, исключая первую. Также учитывается та точка, из которой БПЛА вылетел в данную точку (чтобы исключить заикливание).

Кроме этого моделируется следующая ситуация: прилетев в какую-либо точку и проанализировав, что бака БПЛА не хватает для полёта в следующую ближайшую точку, БПЛА возвращается на базу для дозаправки, после чего продолжает дальнейший облёт. Тут так же учитывается предыдущая точка, в которой БПЛА был до полёта на базу.

Блок ПК, отображающий очаг возгорания, моделирует два состояния участка местности: "горит" или "не горит". Изначально рассматривается ситуация, в которой никаких возгораний нет. Возгорание каждого рассматриваемого участка моделируется с различной интенсивностью, поэтому условие перехода в состояние горения – это заданная интенсивность, а возврат в состояние "не горит" происходит после тушения.

Диаграммы, представленные на рис. 2, позволяют управлять в модели визуализацией очагов возгорания. Так, к примеру, если появляется возгорание, то на карте соответствующий очаг отобразится красным цветом.

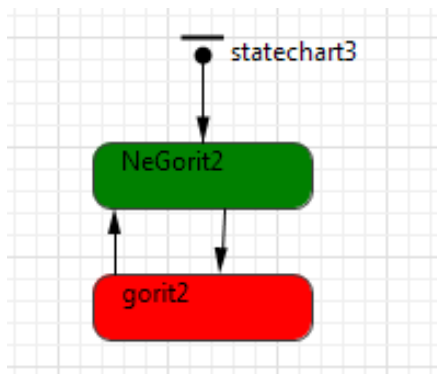


Рис. 2. Диаграмма очага возгорания

Демонстрация работы модели

Визуально рабочая зона главной видеоформы ПК поделена на три части, представленные на рис. 3:

- определение исходных данных: задание координат точек облёта, задание значения полноты бака. Значение задаётся не литрами, а единицами расстояния, которые сможет преодолеть БПЛА;
- запуск или остановка полёта БПЛА: позволяет приостановить облёт и просмотреть данные рассчитываемые в период облёта;
- формирование статистических данных. Они представлены в виде таблицы – точки, координаты, расстояния и т.д. также представлена диаграмма фиксации возгораний. По данной диаграмме можно посмотреть, как часто были зафиксированы возгорания и в какой точке.

1) Определите исходные данные

Координаты:

xA: 442, yA: 200, xB: 410, yB: 90, xC: 250, yC: 80

Заполни бак!

Бак = 10000

2) Запустить/остановить БПЛА

Запустить/Остановить

3) Статистические данные

Точки	Координаты	Расстояние	Бак (осталось км)	Возгорание
A	xA: 442, yA: 200	OA: 194.124, AC: 437.366	S: 10.000	
B	xB: 410, yB: 90	OB: 244.131, AB: 358.691	Бак Достаточно	
C	xC: 250, yC: 80	OC: 210.95, BC: 371.262		
tek		min		

Статистика возгораний: A: 9 (34.6%), B: 9 (34.6%), C: 8 (30.8%)

Рис. 3. Основные элементы главной видеоформы программного комплекса

При имитации функционирования БПЛА в среде моделирования *AnyLogic* БПЛА представляется "агентом". В имитационной модели БПЛА может иметь сценарий поведения, память (историю), контакты и т.д.

Создание агента обычно начинается с определения его интерфейса для связи с пунктом управления полётами и другими агентами. Начальное состояние и поведение агента могут быть реализованы различными способами. Состояние (накопленная история) агента в *AnyLogic* может быть представлено с помощью переменных либо с помощью диаграммы состояний. Поведение может быть либо пассивным (агенты реагируют только на прибытие сообщений или на вызов методов и не имеют собственных событий, запланированных на будущее), либо активным, когда внутренняя динамика агента (события, запланированные через заданные таймауты или процессы системной динамики) является причиной действий, совершаемых агентом. В последнем случае внутри агентов, скорее всего, должны быть заданы события и/или диаграммы состояний.

Демонстрация рабочей зоны

В рабочей зоне видеформы ПК отображается необходимая информация о ходе движения БПЛА (рис. 4). Например, в рабочей зоне размещён график визуализации результатов прогноза, того на сколько километров хватит бака БПЛА. На экран выводится начальное значение бака, а также предоставляется возможность изменять значения в любой момент времени выполнения модели.

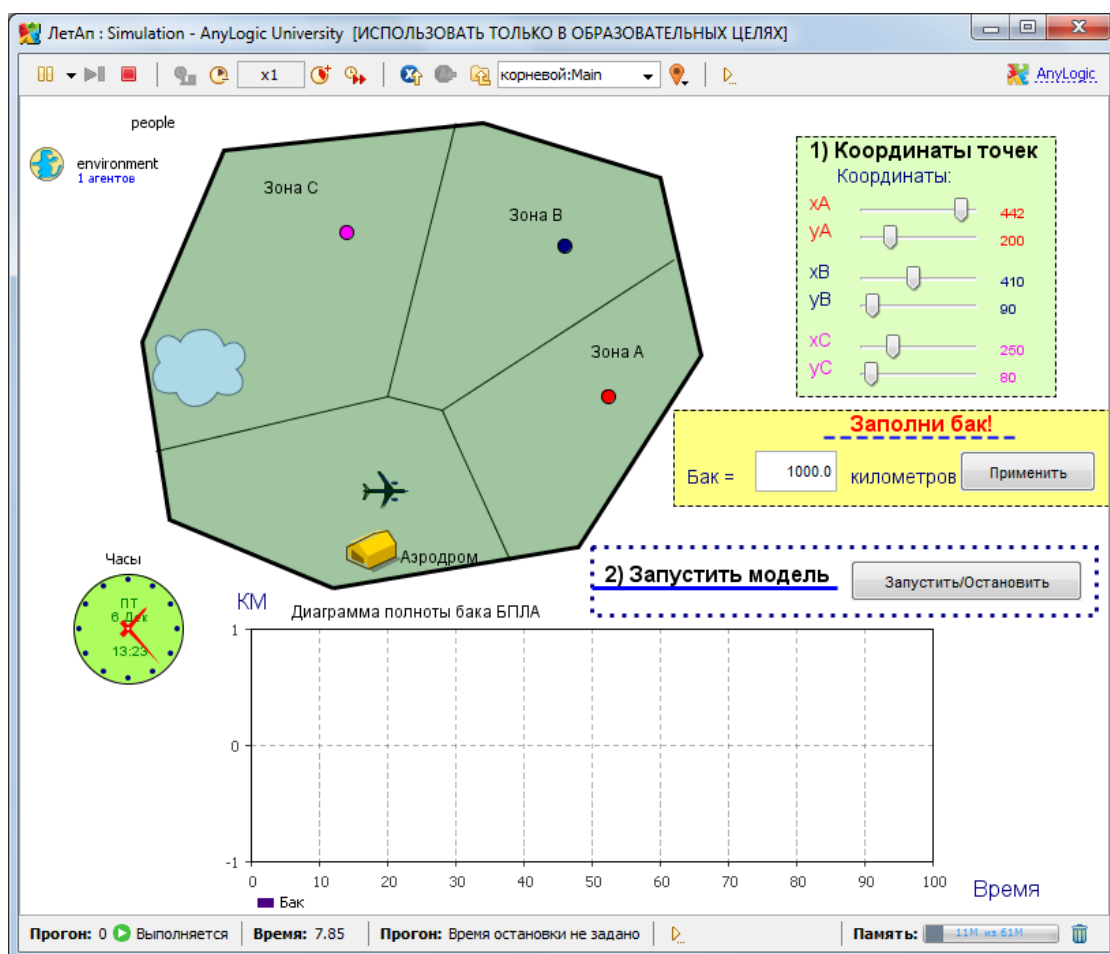


Рис. 4. Отображение информации о ходе полёта БПЛА на главной видеформе ПК

Представленная имитационная модель мониторинга критически опасных областей пространства входит в состав специального прикладного программного обеспечения "Тренаж-БПЛА", разрабатываемого для комплексного моделирующего тренажерного стенда и создаваемого в МАИ в интересах обучения операторов БПЛА для решения как военно-технических задач, так и задач применения БПЛА в интересах МЧС [10].

В ходе разработки модели мониторинга территорий с использованием интеллектуальных возможностей БПЛА получены следующие *результаты*.

Исследовано влияние условий радиосвязи на выполнение задач группой БПЛА. Качество связи с виртуальной доской объявлений определяет информированность БПЛА о решении задач всей группировкой. При снижении вероятности связи с доской объявлений до 0,8-0,85 до 20-27 % зон мониторинга оказываются необслуженными. Более того, БПЛА, не обладая необходимой информацией, направляются в потенциально опасные районы, где могут терять техническую способность выполнения задач; появляется также и неоправданное дублирование задач.

При количестве зон облёта каждым БПЛА более 5-7, и выходе из строя от 10 до 15 % БПЛА эффективность решения задачи мониторинга резко снижается за счет нехватки топлива, необходимого для облёта ранее незапланированных зон.

После обследования зоны БПЛА покидает ее, проинформировав Центр мониторинга об отсутствии проблем. Но скорость распространения последствий чрезвычайной ситуации (моделировалось случайным образом возникновение и развитие лесного пожара в различных зонах мониторинга) может быть столь значительной, что к моменту последующего обследования зоны чрезвычайная ситуация уже выходит из-под контроля.

В целом подтверждено, что многоагентный подход целесообразно применять в случае, когда индивидуальное поведение отдельных БПЛА для решения общей задачи является существенным. В противном случае лучше работают так называемые дискретно-событийные модели.

Литература

1. **Отчёт** о предварительных результатах проведённого комплексного учения с органами управления и силами РСЧС 23-26 апреля 2013 года. М: ВНИИ ГОЧС МЧС России. 459 с.
2. **Василенко В.В., Гончаренко В.И., Корольков В.Д.** Разработка концепции системы непрерывного территориального мониторинга на базе комплекса беспилотных летательных аппаратов // Российско-китайская международная конф. по проектированию аэрокосмической техники: труды конф. М.: изд. дом "ИНФОРМИЗДАТ", 2007. С. 230-232.
3. **Абросимов В.К.** Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистических средах. М.: изд. дом "Наука", 2013. 168 с.
4. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. СПб.: БВХ-Петербург, 2005. 400 с.
5. Разработка научно-методических подходов и технологии использования беспилотных летательных аппаратов в лесном хозяйстве // Отчёт о научно-исследовательской работе. ФГУ "Авиалесоохрана". Пушкино, 2010. 105 с. http://www.aviales.ru/files/documents/2011/08/ot_niokr.pdf.
6. **Фоменко А.А.** Управление группой беспилотных летательных аппаратов при мониторинге лесных пожаров // Научное обозрение. 2013. № 4. С. 137-143.
7. **Амелин К.С., Граничин О.Н.** Применение мультиагентного подхода для решения задач мониторинга местности группой лёгких БПЛА // Теория активных систем: труды междунар. науч.-практ. конф. 2011. С. 209-214.
8. **Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О.** Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике. Вып. 5. 2009. С. 157-166.
9. **Маргарян С.А.** Современные гетерогенные технологические радиосети обмена данными для топливно-энергетического комплекса // Беспроводные технологии. 2011. № 1. С. 52-57. <http://www.rodnik.ru/about/smi/files/15.pdf>.
10. **Абросимов В.К., Гончаренко В.И., Смирнов Д.И.** Модель группового полёта беспилотных летательных аппаратов в условиях чрезвычайной ситуации // Сб. тезисов докладов II всеросс. науч.-техн. конф. "Моделирование авиационных систем". М: НИЦ ФГУП "ГосНИИАС", 2013. С. 34-35.