

А.А. АКИМОВ, Ю.А. ГНАТЕНКО, Р.Г. БОЛБАКОВ  
**МНОГОУРОВНЕВАЯ СТРАТЕГИЯ БЕЗОПАСНОЙ  
НАВИГАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РОЯ БПЛА  
ДЛЯ МОНИТОРИНГА ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ**

---

*Акимов А.А., Гнатенко Ю. А., Болбаков Р.Г. Многоуровневая стратегия безопасной навигации и распределения роя БПЛА для мониторинга лесных пожаров.*

**Аннотация.** Лесные пожары являются одной из наиболее опасных и трудно прогнозируемых природных угроз, что требует постоянного мониторинга линии распространения огня в реальном времени. Традиционные средства, такие как спутниковая съемка или наземные наблюдательные посты, не обеспечивают необходимой оперативности и полноты данных. Перспективным решением становится использование роя беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), однако их эффективная координация в условиях динамичной обстановки и ограниченных ресурсов связи и вычислений требует разработки специальных алгоритмов. В работе представлена многоуровневая стратегия управления роем БПЛА, объединяющая три механизма. Горизонтальная навигация реализуется методом искусственных потенциальных полей (Artificial Potential Field, APF), обеспечивающим притяжение к линии фронта пожара и отталкивание от препятствий и соседних аппаратов. Распределенный протокол согласования стабилизирует полет на общей опорной высоте, что гарантирует сопоставимые углы обзора. Для оптимального распределения вдоль линии фронта используется модифицированный алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO), позволяющий снизить конкуренцию между дронами и уменьшить лишние манёвры. Проведена серия вычислительных экспериментов, в которых сопоставлены классический APF и гибридный APF+PSO для решения задачи оптимизации функционала эффективности движения роя БПЛА. Гибридная схема APF+PSO снижает значение функционала эффективности почти на порядок по сравнению с классическим методом APF; уменьшает вариативность поведения роя; поддерживает согласованную высоту без выраженного перерегулирования и обеспечивает корректный обход препятствий при движущемся фронте. Минимальные междронные дистанции не опускались ниже порогового значения 5 м, что подтверждает соблюдение требований безопасности. Алгоритм демонстрирует устойчивое слежение за движущимся фронтом на протяжении всего горизонта моделирования, обеспечивая корректный обход препятствий. Разработанная стратегия сочетает вычислительную простоту с высокой надежностью. Дальнейшие исследования будут направлены на учет данных бортовых сенсоров (видео и тепловизоров), моделирование влияния ветра и рельефа, анализ задержек и потерь связи, а также расширение алгоритма на крупные группы БПЛА.

**Ключевые слова:** искусственные потенциальные поля, алгоритм роя частиц, распределённое управление, многоуровневая стратегия, навигация роя, оптимизация маршрутов, согласование высот, гибридные алгоритмы.

---

**1. Введение.** Масштабные ландшафтные пожары остаются одной из наиболее труднопредсказуемых и быстро эволюционирующих угроз для экосистем, инфраструктуры и населения, и потому требуют непрерывного наблюдения за фронтом распространения огня в реальном времени [1]. Критические решения (куда направить наземные бригады, какой очаг возгорания тушить

в первую очередь, как эвакуировать людей) принимаются на основе информации о текущем положении и скорости продвижения линии огня. На форму и направление фронта пожара каждую минуту влияют ветер, влажность, рельеф и наличие горючего материала. Спутниковая съёмка даёт снимки лишь раз в несколько часов, а наземные посты наблюдения редко охватывают всю зону бедствия [2].

Использование роя беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) частично решает проблему оперативного сбора данных. Дроны способны одновременно сканировать большую площадь, передавать термокадры в реальном времени и работать в труднодоступных или опасных районах. Но сама по себе группа дронов не гарантирует высокое качество наблюдений [3]. В условиях быстро меняющейся картины пожара фиксированное построение роя БПЛА быстро отстаёт от реального контура, индивидуальные реакции дронов приводят к распаду роя и к появлению незакрытых участков наблюдения. Передача каждому БПЛА полного глобального плана полёта в реальном времени практически невозможна, так как канал связи в зоне пожара перегружён, а вычислительные ресурсы бортовых контроллеров ограничены. Дополнительный риск создают манёвры в задымлённой среде. Растёт вероятность сближений между аппаратами и попадания в зоны повышенной температуры. Наконец, тепловизоры и видеокамеры имеют ограниченный угол поля зрения, поэтому для получения непрерывной мозаичной картины требуется удерживать почти одинаковую опорную высоту над рельефом местности, обеспечивая сопоставимые масштабы наблюдения для всех аппаратов.

Таким образом, возникает актуальная задача: на основе локальных измерений и обмена информацией с ближайшими соседями разработать распределённый алгоритм координации роя БПЛА, корректирующий траектории в реальном времени, удерживающий группу вдоль текущей линии фронта огня, выравнивающий высоту полёта и сохраняющий работоспособность при порывах ветра, появлении новых очагов и кратковременных потерях связи. При этом алгоритм должен укладываться в доступные ресурсы сети и бортовых вычислений.

**2. Обзор тематических научных работ.** БПЛА стали неотъемлемым инструментом для раннего обнаружения и реагирования на лесные пожары, поскольку обеспечивают сбор данных в режиме реального времени, что является критически важным фактором для действий при ЧС [4]. Особое внимание уделяется повышению эффективности обнаружения и оценке динамики пожара средствами одиночных и групповых платформ [5, 6]. Данные

наблюдений служат основой оперативных решений (распределения наземных сил, выбора приоритетных участков тушения и организации эвакуации), поэтому требуется практически непрерывное покрытие динамически изменяющегося фронта огня.

Для существующей проблемы предложены как алгоритмические, так и организационно-технические решения. Показана стратегия совместных действий нескольких роев БПЛА на основе улучшенного оптимизационного алгоритма, обеспечивающая согласование задач и маршрутов в меняющейся обстановке [7]. Описаны системы мониторинга с применением БПЛА: архитектура, типовые полезные нагрузки, каналы передачи данных, особенности развёртывания и ограничения реального применения, а также практические рекомендации по организации наблюдений [8]. Представлены классификации платформ и оценка их пригодности для мониторинга [9].

Современные методы отмечают смещение акцента к распределённым подходам и алгоритмам, способным адаптироваться к быстро меняющейся обстановке на фронте пожара. В частности, онлайн-овые и гибридные методы оценки фронта пожара используются вместе с вероятностными и эвристическими планировщиками маршрутов, что позволяет строить траектории с учётом ограничений сети и вычислительных ресурсов, например, при планировании маршрутов в средах с ненадежной связью [10].

В работе [11] предложена совместная схема распределения задач и маршрутизации группы БПЛА в динамичной обстановке на рельефной местности. Траектории планируются по многокритериальному функционалу, учитывающему время, покрытие/угол обзора, перепады высоты и погодные риски при ограничениях связи. При этом не всегда вводится явный механизм распределённого согласования параметров полёта между аппаратами, например, выравнивание высоты или углов обзора камер.

Наряду с глобальной оптимизацией маршрута и локальными обходами препятствий важна устойчивость построения группы. Необходимо предотвращать «развал» роя при внешних воздействиях (ветровые порывы, новые очаги пожара, кратковременная потеря связи), а также поддерживать общую высоту полёта и связность сети. Современные работы предлагают распределённые законы взаимодействия между соседями и схемы формирования роя, позволяющие при внешних возмущениях сохранять связность группового графа и возможность агентам перестраиваться в рое в отсутствие глобального централизованного координатора [12].

В задачах распределённого управления роем широко используются методы согласования состояний (положение, скорость, высота) на основе локального обмена данными. В работе [13] предложена многоуровневая архитектура распределённого согласования для крупного роя: иерархический граф взаимодействий (уровни подграфов) сохраняет связность и надёжность при росте числа БПЛА. В каждом уровне применяются потенциальные функции для формирования целевой конфигурации и предотвращения столкновений; далее реализуется выравнивание курсов за счёт обмена информацией внутри и между уровнями, что ускоряет унификацию направлений движения.

Эвристические алгоритмы, такие как генетический (Genetic Algorithms, GA), муравьиный (Ant Colony Optimization, ACO), эволюционные (Differential Evolution, DE; Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES) активно применяются в планировании траекторий БПЛА, поскольку позволяют оптимизировать сложные нелинейные функционалы [14, 15].

Генетические алгоритмы особенно эффективны в дискретных комбинаторных задачах маршрутизации и распределения заданий и требуют на каждом шаге операции «отбор, скрещивание, мутации» часто с процедурами восстановления допустимости решений при нарушении ограничений [14].

Муравьиные алгоритмы ориентированы на графовые дискретные постановки и поддерживают феромонные структуры [14], обновление которых создаёт вычислительные и коммуникационные расходы и инерцию из-за испарения, что нежелательно при быстро меняющейся линии фронта пожара и локальном обмене в рое.

Непрерывные эволюционные методы (DE, CMA-ES) успешно применяются в планировании [10], но требуют многократных оценок целевой функции (DE) или работы с ковариационной матрицей размерности  $D \times D$  (CMA-ES), что повышает ресурсоёмкость работы на борту БПЛА в режиме онлайн.

На основе метода оптимизации роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) [16] в работе [17] предложен улучшенный метод LGPSO (Lévy–Greedy PSO), в котором к классическому PSO добавлены случайные шаги для выхода из локальных минимумов (полёты Леви) и правило принятия шага с использованием «жадного» алгоритма. В трёхмерных сценариях это приводит к более гладким траекториям с умеренными наборами высоты, снижению энергозатрат и повышению устойчивости полёта [18].

Одним из широко применяемых подходов для локальной навигации и устойчивого обхода препятствий являются методы искусственных потенциальных полей (Artificial Potential Field, APF) [19]. Однако классическая постановка метода APF имеет ряд ограничений: склонность к попаданию в локальные минимумы потенциального поля, возникновение нежелательных колебаний и избыточной извилистости траектории, а также риск недостижимости цели при сложной конфигурации препятствий [20].

Работа [21] рассматривает комбинацию улучшенного искусственного потенциального поля (IAPF) с протоколом согласования. Предложенный алгоритм нацелен на формирование и восстановление ожидаемого построения после обхода препятствий с достижением согласования по относительному положению, высоте и скорости БПЛА. Каждый аппарат корректирует курс и удерживает заданную геометрию строя с учётом избегания столкновений и следования траектории. Показаны устойчивость и масштабируемость построения, а также сглаженные колебания курса БПЛА при моделировании [22 – 24].

Таким образом, существующие подходы показывают, что PSO-алгоритмы эффективны для планирования многоцелевых маршрутов БПЛА с учетом безопасности и экономии энергии [17]; являются практичным компромиссом для бортового применения; соответствуют непрерывной постановке; устойчивы к негладкости и многокритериальности; их реализация не требует тяжёлых популяционных структур [10, 13, 14, 16]. Методы согласования состояний вместе с искусственными потенциальными полями обеспечивают безопасное сплоченное движение дронов с быстрым восстановлением построения [23]; многоуровневое согласование гарантирует масштабируемость и устойчивость при большом количестве БПЛА [24]. В нашей работе мы интегрируем эти идеи для решения задачи слежения за фронтом пожара, где поддерживается коллективное равновесие роя БПЛА по опорной высоте и оптимизируются траектории полета по многоцелевому критерию.

**3. Математическая модель управления роем БПЛА.** В бортовой практике применяется иерархическая структура управления летательными аппаратами [1, 2, 10]: внутренний (быстрый) уровень стабилизирует ориентацию и реализует заданные линейные/угловые ускорения аппарата, а внешний (медленный) уровень решает задачи навигации (ведёт положение/скорость, формирует опорные воздействия и распределяет аппараты по цели).

Сделаем ряд допущений.

1. Внутренний уровень управления БПЛА с помощью автопилота быстро стабилизирует ориентацию и обеспечивает соблюдение ограничений по ускорениям.

2. Внешний уровень действует на существенно более медленных временных масштабах и задаёт опорные воздействия для движения. При этом характерные скорости и углы крена/тангажа остаются умеренными.

3. БПЛА представляется геометрической точкой с массой без собственных размеров и без явной вращательной динамики.

Введенных допущений достаточно, чтобы в качестве математической модели, описывающей динамику и управление полётом БПЛА, рассматривать упрощённую точечную кинематическую модель внешнего уровня без потери адекватности на горизонте планирования [1, 2, 10].

Для каждого дрона  $i, i = \overline{1, N}$  введём состояние,  $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i, h_i)$ , где  $(x_i, y_i)$  – горизонтальная позиция,  $h_i$  – высота над землей. Заметим, что вектор состояния и управляющие воздействия являются функциями времени  $t$ . Зависимость от времени для краткости записи опускается, если это не имеет принципиального значения для изложения.

Высота  $h_i$  поддерживается отдельно по распределённому закону согласования, управляющее действие напрямую задаёт ускорение аппарата, а горизонтальное положение получается двойным интегрированием ускорения по времени

$$\ddot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{u}_i + \mathbf{F}_i, \quad (1)$$

где  $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$  – горизонтальная координата  $i$ -го дрона,  $\mathbf{u}_i$  – вектор управляющего ускорения (внешний планировщик), а  $\mathbf{F}_i$  – вектор результирующих сил от искусственных потенциалов (притяжение к фронту пожара, отталкивание от препятствий и от других дронов).

Для эффективного уклонения от препятствий при формировании траектории  $\mathbf{x}$  применим метод APF [25]. Суммарная сила  $\mathbf{F}_i$  на БПЛА складывается из составляющих:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_{i,L} + \sum_{o \in Obst} \mathbf{F}_{i,o} + \sum_{i \neq j} \mathbf{F}_{i,j}, \quad (2)$$

где  $F_{i,L}$  – притягивающая сила к цели (линия фронта пожара),  $F_{i,o}$  – отталкивающая сила от каждого препятствия  $o$  из множества препятствий  $Obst$ ,  $F_{i,j}$  – потенциал от другого БПЛА  $j$ , обеспечивающий предотвращение столкновений и моделирующий коммуникационный вес.

Опишем каждую результирующую силу в формуле (2).

**Притяжение к фронту пожара.** Целевая конфигурация – это согласованная линия из БПЛА, следующая за линией фронта пожара.

Фронт в общем случае представляет собой непрерывную кривую на местности, изменяющуюся во времени с ограниченной скоростью без скачков и разрывов. Для оперативного задания фронта будем использовать его дискретное представление в виде набора опорных (реперных) точек  $s_L$ , извлекаемых из термо- и мультиспектральных спутниковых данных и постоянно обновляемых по мере поступления новых наблюдений [1–3, 23]. Эти точки упорядочим по длине дуги и по ним проведем кусочно-линейную аппроксимацию кривой линии фронта. В результате сформируем ориентированную ломаную  $L(t)$ , задающую согласованные касательные и нормали, используемые в законах управления.

В практике оперативного мониторинга пожаров и дистанционного зондирования с применением БПЛА ориентированная ломаная является стандартным форматом задания маршрута (набор точек и отрезков), совместимым с бортовыми планировщиками [10]. Адекватность кусочно-линейной аппроксимации обеспечивается при естественных для практики допущениях:

- 1) ограниченная кривизна линии фронта на рабочем горизонте (в местах высокой изломанности узлы уточняются);
- 2) частота обновления узлов ломаной выше характерной скорости деформации фронта, чтобы ошибка, обусловленная задержкой обновления, оставалась существенно меньше допустимой ширины зоны слежения;
- 3) шаг между соседними опорными точками согласован с пространственным разрешением исходных данных.

При улучшении качества и частоты наблюдений аппроксимация автоматически уточняется без изменения структуры управления. Для задач, требующих повышенной гладкости, ломаная может быть заменена сплайном без модификации принципов управления.

Чтобы рой БПЛА последовал за линией фронта пожара, введем притягивающий потенциал

$$U_{i,L}(\mathbf{p}_i) = \frac{1}{2} \alpha \|\mathbf{p}_i - \mathbf{s}_L\|^2, \quad (3)$$

где  $\alpha > 0$  – коэффициент притяжения, регулирующий силу стремления к линии и обеспечивающий плавность подтягивания дронов к линии фронта без резких бросков.

В качестве управляющего воздействия на БПЛА рассмотрим антиградиент потенциала  $U_{i,L}$ :

$$\mathbf{F}_{i,L} = -\nabla_{\mathbf{p}_i} U_{i,L}.$$

Сила  $\mathbf{F}_{i,L}$  направлена по нормали к ломаной  $L(t)$ , то есть перпендикулярно фронту, и линейно растёт с отклонением.

**Отталкивание от препятствий.** БПЛА должны удерживаться на безопасном расстоянии от неподвижных и подвижных препятствий (деревьев, столбов, горных выступов, а также опасных зон с высокой температурой или смога), которые представляются точкой  $\mathbf{p}_o$  и радиусом воздействия  $d_{safe}$ .

Пусть  $d_{io} = \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_o\|$  – расстояние от дрона  $i$  до объекта  $o$ . Для каждого препятствия  $o$  введем модель отталкивающего потенциала  $U_{i,o}$ : как только дрон вторгается в зону воздействия объекта  $o$ , то есть  $d_{io} < d_{safe}$ , запускается потенциал  $U_{i,o}$  в виде квадратичной функции:

$$U_{i,o} = \begin{cases} \frac{1}{2} \beta \left( \frac{1}{d_{io}} - \frac{1}{d_{safe}} \right)^2, & d_{io} < d_{safe}, \\ 0, & d_{io} \geq d_{safe}; \end{cases}$$

где  $\beta > 0$  – коэффициент отталкивания от препятствий, задающий жёсткость барьера.

Сила отталкивания, как антиградиент отталкивающего потенциала  $U_{i,o}$ , будет иметь вид:



$$\mathbf{F}_{i,o} = \begin{cases} -\nabla_{\mathbf{p}_i} U_{i,o}, & d_{io} < d_{safe}, \\ 0, & d_{io} \geq d_{safe}; \end{cases} = \begin{cases} \beta \left( \frac{1}{d_{io}} - \frac{1}{d_{safe}} \right) \frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_o}{d_{io}^3}, & d_{io} < d_{safe}, \\ 0, & d_{io} \geq d_{safe}. \end{cases}$$

Если дрон приближается к препятствию, то сила  $\mathbf{F}_{i,o}$  растёт очень быстро и при этом удерживает аппарат за пределами опасной зоны.

**Взаимодействие между БПЛА.** Чтобы избежать столкновений и обеспечить согласованное движение, между дронами вводится дополнительный потенциал отталкивания по отношению к близким соседям

$$U_{i,j} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{ij} \left( \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| - d_{ij}^* \right)^2, & \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\| < d_{ij}^*, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $d_{ij}^*$  – минимальная дистанция между дронами, которую выбирают так, чтобы камеры не заслоняли друг друга и оставалось время на реакцию;  $k_{ij}$  – коэффициент отталкивания между агентами (чем  $k_{ij}$  больше, тем сильнее отталкиваются дроны). Сила  $\mathbf{F}_{i,j}$  действует только при критическом сближении, а при угрозе столкновения быстро увеличивает дистанцию.

$$\mathbf{F}_{i,j} = \begin{cases} -\nabla_{\mathbf{p}_i} U_{i,j}, & d_{ij} < d_{ij}^*, \\ 0, & d_{ij} \geq d_{ij}^*; \end{cases} = \begin{cases} k_{ij} \frac{d_{ij}^* - d_{ij}}{d_{ij}} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j), & d_{ij} < d_{ij}^*, \\ 0, & d_{ij} \geq d_{ij}^*. \end{cases}$$

Отталкивающая сила симметрична относительно дрона  $j$  :  
 $\mathbf{F}_{j,i} = -\mathbf{F}_{i,j}$ .

Таким образом, сила отталкивания  $\mathbf{F}_{i,j}$  обеспечивает нулевое взаимодействие на желаемом расстоянии и пропорциональное отталкивание при недопустимом сближении, предотвращая столкновения между дронами, но не распуская строй при допустимой дистанции.

Одновременно с силами горизонтального перемещения реализуется распределённый закон согласования высоты с опорой [26], обеспечивающий полёт всего роя на заданной опорной высоте  $h_{grid}$  в отсутствие централизованного координатора. Опорная высота  $h_{grid}$  задаётся регламентами связи/безопасности. Это означает, что для любого дрона  $i$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (h_i(t) - h_{grid}) = 0, \quad (4)$$

тем самым разброс высот исчезает, и рой выстраивается на опорной высоте  $h_{grid}$ .

Для реализации требования (4) вводится распределённый динамический закон согласования высоты первого порядка с опорой

$$\dot{h}_i = -k_h \sum_{j \in N_i} (h_i - h_j) + k_{ref} (h_{grid} - h_i), \quad (5)$$

$k_h > 0$  – коэффициент согласования (чем значение больше, тем быстрее происходит выравнивание всех  $h_i$ );  $k_{ref} > 0$  – коэффициент привязки к опорной высоте;  $N_i$  – множество соседей дрона  $i$  в графе связи.

В законе (5) первое слагаемое сглаживает отклонения относительно соседних дронов, второе обеспечивает приведение высоты к опорной высоте  $h_{grid}$ .

Все необходимые для безопасного и целесообразного перемещения требования уже заложены в структуру потенциалов (2): притягивающий член формирует «потенциальный колодец» (локальный минимум) с дном на линии огня, так что градиент направляет траекторию БПЛА к этой линии, а барьерные члены обеспечивают избегание опасных зон и соблюдение минимальных дистанций. Если поверх этого поля вводить ещё один внешний планировщик  $\mathbf{u}_i$ , возникает дублирование функций и регулятор должен уравнивать собственные команды с теми же силами APF, от чего увеличивается вычислительная сложность и усложняется доказательство устойчивости. Поэтому примем инженерное решение отказаться от отдельного  $\mathbf{u}_i$  и непосредственно использовать градиент

потенциального поля как команду. Формально это эквивалентно случаю, когда в уравнении (1)  $\mathbf{u}_i \equiv 0$ .

Таким образом, результирующая вертикально-горизонтальная схема управления роем БПЛА выглядит так:

$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{F}_i, \\ \dot{h}_i = -k_h \sum_{j \in N_i} (h_i - h_j) + k_{ref} (h_{grid} - h_i) \end{cases} \quad (6)$$

Горизонтальный вектор  $\mathbf{F}_i$  непрерывно реагирует на движущийся фронт пожара  $L(t)$ , тогда как вертикальное согласование (5) гарантирует экспоненциальное выравнивание всех высот, не требуя внешнего лидера.

Принятая упрощённая модель (6) сочетает в себе вычислительную лёгкость и требуемые свойства безопасности: горизонтальный градиент APF реагирует на динамику фронта пожара и препятствия, тогда как протокол согласования стабилизирует высотное расположение роя.

**4. Задача оптимизации маршрутов и управляющих воздействий на рой БПЛА.** Задача для роя из  $N$  дронов заключается в том, чтобы непрерывно следовать вдоль линии фронта  $L(t)$ , сохраняя сеточную согласованную опорную высоту полёта  $h_{grid}$  и при этом минимизируя:

- угол обзора дрона для охвата наиболее широкой зоны фронта камерой;
- энергозатраты, зависящие от длины траектории и крутизны подъёмов;
- риск столкновения с препятствиями (деревья, рельеф, зоны сильного тепла) для поддержания безопасной дистанции.

Тогда целевую функцию, описывающую эффективность движения роя БПЛА, представим в виде

$$J = J_\theta + J_E + J_R, \quad (7)$$

где  $J_\theta$  – угловой показатель,  $J_E$  – энергетический показатель,  $J_R$  – показатель риска столкновения с препятствиями.

На итоговый результат функционала (7) эффективности движения роя влияют значения, полученные от каждого дрона в рое, то есть

$$J(t) = \sum_{i=1}^N J_i(t), \quad (8)$$

$$J_i(t) = \omega_\theta J_{\theta,i}(t) + \omega_E J_{E,i}(t) + \omega_R J_{R,i}(t), \quad (9)$$

где  $J_i(t)$  – локальный вклад  $i$ -го дрона; коэффициенты  $\omega_\theta, \omega_E, \omega_R > 0$  задают относительную важность широкого охвата, экономии батареи и безопасности соответственно [13].

Используя модель (6), зададим показатели (9) для локального вклада каждого дрона в функционал эффективности движения роя (8).

**Угловой показатель.** Пусть дрон летит на высоте  $h_i$  и должен контролировать отрезок линии фронта длиной  $l_i$  (точки  $\mathbf{s}_{L,i}$  – середины отрезков). Минимальный требуемый полуугол обзора

$\theta_i = \arctg\left(\frac{l_i/2}{h_i}\right)$ . Тогда угловой показатель для  $i$ -го дрона

$$J_{\theta,i} = \theta_i^2 = \arctg^2\left(\frac{l_i}{2h_i}\right).$$

**Энергетический показатель.** За один дискретный такт  $\Delta t$  горизонтальный пробег дрона равен  $\|\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_i(t - \Delta t)\|$ , вертикальный пробег  $|h_i(t) - h_i(t - \Delta t)|$ . Модель удельных затрат:

$$J_{E,i} = \|\mathbf{p}_i(t) - \mathbf{p}_i(t - \Delta t)\|^2 + \gamma_h |h_i(t) - h_i(t - \Delta t)|^2,$$

где  $\gamma_h > 0$  – относительная «дороговизна» изменения высоты.

**Показатель риска столкновения с препятствиями.** Для каждого близкого препятствия  $o$  (дерево, скальный выступ, горячий очаг) и каждого близкого соседа  $j$  введем штраф

$$\phi_{obs}(d_{io}) = \beta \left( \frac{1}{d_{io}} - \frac{1}{d_{safe}} \right)^2, \quad \phi_{uav}(d_{ij}) = k_{ij} (d_{ij} - d_{ij}^*)^2,$$

где  $x_+ = \max\{x, 0\}$ . Тогда риски столкновения и термических зон:

$$J_{R,i} = \sum_{o \in O_i} \phi_{obs}(d_{io}) + \sum_{j \in N_i} \phi_{uav}(d_{ij}).$$

Таким образом, задача сводится к управлению системой дифференциальных уравнений (6), описывающих движение каждого БПЛА, при одновременном согласовании высот с целью минимизации функционала (7).

**5. Применение метода PSO к задаче оптимизации маршрутов и управляющих воздействий.** Введённый притягивающий потенциал (3) гарантирует, что каждый дрон быстро стремится к точке огневого фронта  $L(t)$  в направлении, параллельном вектору нормали. Однако одного только нормального притяжения недостаточно, так как, если не добавить распределяющего механизма, дроны могут сконцентрироваться на одном участке линии, оставив другие сегменты без наблюдения, либо будет выстроена траектория, требующая лишних манёвров и расхода батареи.

Для равномерного и энергосберегающего распределения вдоль самой линии  $L(t)$  добавим планировочный слой глобального поиска. В качестве такого слоя выберем поисковый слой алгоритма PSO [16], где каждому дрону сопоставим собственную «частицу», которая существует не в пространстве реальных координат  $\mathbf{p}_i$ , а в абстрактном пространстве желательных позиций  $\mathbf{s}_i$ . Алгоритм PSO будет оптимизировать расположение дронов по тангенциальному направлению относительно линии фронта  $L(t)$ .

Пусть для каждого момента времени  $t^k$  длина ломаной фронта параметризована абсциссой дуги  $s \in [0, S(t^k)]$  и отображением  $\mathbf{L}(s, t^k) = (x_L^k, y_L^k)$ , где  $S(t^k)$  – суммарная длина всей ломаной в момент  $t^k$ . Для каждого дрона  $i$  вводится скалярная виртуальная координата  $s_i(t^k)$ , определяющая положение закреплённой за ним точки на линии фронта. Текущая цель притягивающей силы формируется как  $\mathbf{s}_i(t^k) = \mathbf{L}(s_i, t^k)$ ; именно к этой точке направлен

градиент  $-\frac{1}{2}\alpha\|\mathbf{p}_i - \mathbf{s}_i\|^2$  в формуле (3) для притягивающего потенциала. Из-за того, что  $\mathbf{s}_i$  всегда принадлежит  $L(t)$ , нормаль к фронту сохраняется, а сам фронт остаётся единственной несущей линией, на которой располагается рой.

Чтобы уменьшить вычислительную нагрузку, будем применять однопараметрическую версию алгоритма PSO, где состояние частицы ограничивается одной скалярной величиной  $s_i(t^k)$ . При этом все атрибуты метода PSO (поисковая скорость, личная память и глобальная память) остаются, но каждый дрон-частица будет хранить и обновлять только свои.

В начале шага  $t^k$  частица  $i$  оценивает свой локальный вклад  $J_i$ , при этом каждая компонента в целевой функции (8) берёт в расчёт лишь величины, относящиеся к самой частице и ее ближайшим соседям. Вычисление не требует полной карты положения всего роя и поэтому легко выполняется на борту.

Сравнив  $J_i$  с хранящимся в памяти значением, частица обновляет свою личную лучшую абсциссу  $P_i$ , если новый результат оказался лучше. После обмена сообщениями между ближайшими частицами определяется глобальный победитель:  $G$  будет равен тому  $s_i(t^k)$ ,  $i = \overline{1, N}$ , при котором достигается минимальный из всех локальных показателей. Далее применяется классическое правило изменения поисковой скорости и позиции метода PSO на  $m$ -ой итерации [16]:

$$w_i^m = \omega w_i^{m-1} + c_1 r_1 (P_i - s_i^{m-1}) + c_2 r_2 (G - s_i^{m-1}),$$

$$s_i^m = s_i^{m-1} + w_i^m;$$

где  $P_i$  – лучшая позиция  $i$ -ой частицы (личный опыт);  $G$  – лучшая позиция всего роя частиц (глобальный опыт);  $\omega$  – коэффициент инерции скорости;  $c_1, c_2$  – коэффициенты, определяющие влияние личного и коллективного опыта;  $r_1, r_2$  – случайные числа из промежутка  $[0, 1]$ . В случае выхода  $s_i(t^k)$  за пределы промежутка

$[0, S(t^k)]$  необходимо отразить виртуальную точку  $s_i(t^k)$  от концов промежутка.

Описанная процедура выполняется несколько раз подряд (три-пять микрошагов) прежде чем перейти к расчёту сил искусственного поля. Этого достаточно, так как фронт между двумя последовательными глобальными шагами меняется незначительно, а личная и глобальная памяти частиц уже содержат стабилизированные приближения. Полученный набор  $s_i(t^k)$  передаётся силовому слою, где формируется притягивающий градиент, дополняемый потенциалами отталкивания от препятствий при малых междроновых дистанциях. Модель (6) перемещает аппарат ближе к новой цели, после чего весь цикл повторяется.

Для поиска оптимальной расстановки беспилотников вдоль движущегося фронта пожара  $L(t)$  применяется двухуровневая схема управления. Первый поисковый уровень заключается в том, что на каждом дискретном временном шаге  $t_k$  внешние датчики обновляют геометрию линии  $L(t_k)$ , протокол согласования (5) корректирует высоты, а роевой планировщик (метод PSO) сдвигает параметры  $s_i(t^k)$ , тем самым задавая новые точки  $\mathbf{s}_i$ . Второй силовой уровень (метод APF), описанный механической моделью (6), пересчитывает градиенты потенциалов и задаёт ускорения двойного интегратора, которые плавно подтягивают реальные координаты  $\mathbf{p}_i$  к «желательным» точкам  $\mathbf{s}_i$  на фронте.

Таким образом, метод PSO отвечает за глобальный, пусть даже идеалистический, поиск конфигурации, а метод APF превращает этот поиск в физически осуществимую и безопасную траекторию.

### **6. Гибридный алгоритм APF+PSO.**

Этап 1. Инициализация ( $t = 0$ ). Подготовка перед стартом миссии.

1. Получить исходную ломаную фронта  $L(0)$  и её длину дуги  $S(0)$ , задать опорную высоту  $h_{grid}$ .

2. Для каждого дрона  $i$ ,  $i = \overline{1, N}$  выбрать начальную абсциссу  $s_i(0) = \frac{i-1}{N-1} S(0)$  (базовое равномерное распределение).

3. Для метода PSO задать поисковые параметры:

$$w_i(0) = 0, \quad P_i = s_i(0), \quad J(P_i) = +\infty.$$

4. Задать константы APF и согласования  $\alpha, \beta, \gamma, k_h$  и параметры PSO  $\omega, c_1, c_2$ .

5. Зафиксировать дискретный шаг времени  $\Delta t$  и число микрошагов  $M$  для метода PSO за такт.

Этап 2. Основной цикл по дискретному времени  $t_k = k \Delta t$ .

1. Актуализация среды: от внешних сенсоров получить новую ломаную  $L(t_k)$  и список препятствий  $O(t_k)$ ; одновременно фиксировать длину дуги  $S(t_k)$ .

2. Обмен высотами и согласование:

$$h_i(t_k) = h_i(t_{k-1}) - k_h \Delta t \sum_{j \in N_i(t_k)} (h_i(t_{k-1}) - h_j(t_{k-1})) + k_{ref} \Delta t (h_{grid} - h_i(t_{k-1})).$$

3. Внутренний поисковый цикл PSO (для  $m = \overline{1, M}$ ).

а. для каждого дрона вычислить локальный вклад  $J_i^m(t_k)$  в целевую функцию (8);

б. обновить личную память: если  $J_i^m(t_k) < J(P_i)$ , то  $P_i = s_i^{m-1}(t_k)$ ,  $J(P_i) = J_i^m(t_k)$ ;

в. обновить глобальную память: если  $G(t_k) = \arg \min_i J(P_i)$ , то  $P_i = s_i^{m-1}(t_k)$ ,  $J(P_i) = J_i^m(t_k)$ ;

г. для каждой частицы обновить ее скорость и положение:

$$w_i^m(t_k) = \omega w_i^{m-1}(t_k) + c_1 r_1 (P_i - s_i^{m-1}(t_k)) + c_2 r_2 (G(t_k) - s_i^{m-1}(t_k)),$$

$$s_i^m(t_k) = s_i^{m-1}(t_k) + w_i^m(t_k);$$

д. если после обновления скорости частица выходит за допустимый диапазон  $[0, S(t^k)]$ , то отразить частицу:

$$s_i^m(t_k) = \begin{cases} -s_i^m(t_k), & s_i^m(t_k) < 0, \\ 2S(t^k) - s_i^m(t_k), & s_i^m(t_k) > S(t^k); \end{cases}$$



е. по завершении внутреннего поискового цикла:

$$s_i(t_k) = s_i^M(t_k), w_i(t_k) = w_i^M(t_k).$$

4. Вычислить силы APF:

а. точка цели  $s_i(t_k) = \mathbf{L}(s_i(t_k), t_k)$ ;

б. сила притяжения к линии фронта:

$$\mathbf{F}_{i,L}(t_k) = -\alpha(\mathbf{p}_i(t_{k-1}) - \mathbf{s}_i(t_{k-1}));$$

в. силы отталкивания от препятствий:

$$\mathbf{F}_{i,o}(t_k) = - \sum_{o \in O_i(t_k)} \nabla_{\mathbf{p}_i} U_{i,o};$$

г. силы междронового взаимодействия:

$$\mathbf{F}_{i,j}(t_k) = - \sum_{i \neq j} \nabla_{\mathbf{p}_i} U_{i,j};$$

д. суммарные силы:

$$\mathbf{F}_i(t_k) = \mathbf{F}_{i,L}(t_k) + \mathbf{F}_{i,o}(t_k) + \mathbf{F}_{i,j}(t_k).$$

5. Обновить координаты роя дронов. Проинтегрировать на интервале  $\Delta t$  дифференциальное уравнение  $\ddot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{F}_i(t_k)$  и получить  $\mathbf{p}_i(t_k), \dot{\mathbf{p}}_i(t_k)$ .

Этап 3. Завершение. Повторить шаги 1 – 5 этапа 2 для  $k = 1, \dots, \lfloor T / \Delta t \rfloor$ . В результате будут получены траектории  $\mathbf{p}_i(t_k), h_i(t_k)$  всех БПЛА, обеспечивающие минимизацию функционала эффективности движения  $J(t_k) < \sum_i J_i^M(t_k)$  при

сохранении безопасности и согласованной высоты полёта.

**7. Вычислительный эксперимент.** Для проверки работоспособности предложенной архитектуры управления и количественной оценки её характеристик была проведена серия из 50 вычислительных экспериментов. В рамках компьютерных симуляций

моделировалось кооперативное сопровождение роем из  $N$  БПЛА за движущимся криволинейным фронтом пожара с учётом препятствий и ограничений на междроновые расстояния.

Численные эксперименты выполнены в среде Python 3.11 с использованием библиотек NumPy 1.26 и Matplotlib 3.8. Вычисления проведены на ноутбуке с процессором Intel Core i7-11800H и 16 Гбайт оперативной памяти.

Приведем параметры модели и алгоритма.

**Размер роя.** В работах [1 – 3, 10, 23] по мониторингу лесных пожаров отмечается, что в реальной эксплуатации применяются небольшие группы БПЛА из-за ограничений канала связи (полоса, помехи, задымление), требований к надзору операторов и бортовых вычислительных ресурсов. Поэтому рассматривается рой из  $N = 6$  дронов.

**Характеристики фронта пожара и временной горизонт.** Для имитации динамики пожара вводится продольный дрейф фронта огня вдоль оси  $X$  :

$$y(x, t) = 30 + 10 \sin(0,05(x - v_{front}t) + 0,1t).$$

Каждое положение точки фронта со временем смещается на  $\Delta x = v_{front}t$  в горизонтальном направлении, скорость дрейфа постоянна  $v_{front} = 0,5$  (м/с). Такой тип движения фронта моделирует его продольное распространение по местности, например, под действием ветрового переноса или особенностей рельефа.

Выбранная синусоидально дрейфующая кривая – это минимальная воспроизводимая модель нестационарного фронта со строго ограниченными наклоном, кривизной и скоростью изменений. Она достаточна, чтобы надёжно проверить устойчивость и поведение алгоритма сопровождения роем.

Пространственная длина волны фронта  $\lambda = 2\pi / 0,05 \approx 126$  (м). При фиксированном  $x$  фаза  $\theta(x, t) = 0,05(x - v_{front}t) + 0,1t$  меняется во времени с угловой частотой

$$\omega_t = \partial\theta / \partial t = 0,1 - 0,05v_{front} = 0,075 \text{ (рад / с)},$$

что соответствует периоду  $T_t = 2\pi / \omega_t \approx 84$  (с) . Поэтому выберем горизонт моделирования  $T$  30-100 с, так как он захватывает разгон и

как минимум один установившийся цикл деформаций ( $\approx 84$  с), что достаточно для оценки устойчивости и режимов сопровождения.

Шаг интегрирования  $\Delta t = 0,1$  (с) = 10 (Гц) – типичная частота внешнего контура автопилота.

**Параметры APF.** Коэффициент притяжения к фронту  $\alpha = 0,2$ .

При  $\Delta t = 0,1$  (с) эффективный дискретный шаг притяжения  $\alpha \Delta t = 0,2 \cdot 0,1 = 0,02$  (2 % ошибки за такт), что даёт характерное время затухания порядка нескольких секунд и исключает перерегулирование при типичных скоростях роя.

Согласно нормативу международной организации гражданской авиации (ICAO) [27] минимальное междроновое расстояние  $d^* = 5$  (м) и радиус воздействия между дроном и препятствием  $d_{safe} = 5$  (м). Таким образом, 5 м – минимально допустимый интервал между аппаратами и минимальная дистанция до опасного объекта.

Коэффициент отталкивания от препятствий  $\beta = 100$ ; коэффициент отталкивания между дронами  $k_{ij} = 50$ . Параметры выбраны так, чтобы при приближении к порогу 5 м отталкивающий «ускоряющий» градиент был соизмерим с реализуемыми внешним контуром ускорениями (порядка  $1 \text{ м/с}^2$ ), а при более опасном сближении ( $3 \text{ м}$ ) – возрастал до  $3-4 \text{ м/с}^2$  и срабатывал до входа в запретную зону.

**Препятствия и опасные зоны.** Сгенерированы  $O = 10$  точечных объектов (отдельные деревья, скальные выступы, горячие очаги), абсциссы которых распределены равномерно вдоль рассматриваемого участка фронта, ординаты – по закону нормального распределения. Радиусы опасных зон вокруг препятствий считаются незначительными по сравнению с  $d_{safe}$ , то есть дрон реагирует на препятствие только войдя в зону 5 м вокруг него.

**Параметры PSO.** Количество микрошагов  $M = 5$ . Чтобы сохранить инерцию вдоль движущегося фронта примем  $\omega = 1$ , равные веса «личной» и «глобальной/социальной» памяти  $c_1 = c_2 = 1,7$  исключают систематический дрейф к одному из полюсов (индивидуальная память против общего лучшего), что важно при равномерном покрытии фронта.

**Алгоритм согласования высоты.** Опорная высота  $h_{grid} = 100$ (м) соответствует оптимальной высоте обзора при мониторинге пожара и находится в безопасном диапазоне по отношению к очагам огня [27]; коэффициент согласования  $k_h = 0,1$  и коэффициент привязки к опорной высоте  $k_{ref} = 0,05$  выбраны так, чтобы обеспечивались устойчивость, отсутствие колебаний и достижение требуемой точности по опорной высоте за  $\sim 8-10$  с. Связность графа обмена по высоте поддерживается либо через пороговую дальность (соседями считаются дроны в радиусе 30 м), либо с помощью случайного графа с вероятностью наличия каждого ребра около 0,5.

**Начальные условия.** Исходные позиции дронов выбираются поблизости от фронта пожара. Дроны стартуют на небольшом фиксированном нормальном расстоянии позади линии огня (около 10 м позади фронта, что обеспечивает изначально безопасное удаление) и с равномерным распределением вдоль участка фронта. Начальные высоты дронов заданы с разбросом около опорной высоты  $h_{grid}$ .

**Эксперимент 1.** Сравнение значений функционала эффективности движения (7) методами APF и APF+PSO.

Сравниваются два подхода горизонтального управления роем: классический «реактивный» контур на основе искусственных потенциалов (APF) и гибридный контур (APF+PSO). Оба контура работают в идентичных условиях. На каждом такте моделирования для обеих групп вычисляется текущее значение функционала эффективности движения роа  $J(t)$ , определяемого формулой (7).

Для наглядности изменения функционала  $J(t)$  показаны в логарифмической шкале по оси ординат (рисунок 1). Серия из 50 симуляций подтвердила статистическую устойчивость результатов. Для гибридного алгоритма APF+PSO значения функционала в среднем находятся в пределах порядка  $10^3 - 10^4$ , тогда как для классического APF аналогичные значения вычисляются на уровне  $10^4 - 10^5$ . Таким образом, переход от APF к APF+PSO приводит к уменьшению значений функционала  $J(t)$  почти на один порядок.

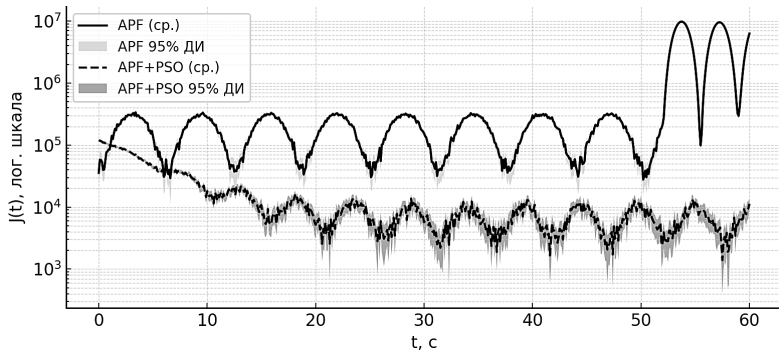


Рис. 1. Значения функционала эффективности движения роя  $J(t)$  для различных алгоритмов

Для обоих алгоритмов наблюдаются колебания значений функционала  $J(t)$  (рисунок 1), однако их размеры и характер различны. Для APF величина отклонений колебаний достигает 20–25% от среднего значения функционала. Это связано с тем, что алгоритм использует только локальные градиенты искусственных потенциалов. Каждый дрон реагирует на ближайшее окружение, и это приводит к конкуренции за соответствующие участки фронта и образованию выраженных разностных режимов. В случае APF+PSO колебания также присутствуют, но их величина значительно ниже (8–12%). Подобный эффект обусловлен итеративной процедурой оптимизации методом PSO. Обновления позиций частиц происходят порциями и со случайными параметрами, поэтому появляются небольшие колебания, но они подавляются настройками алгоритма и притяжением сил APF к линии фронта. В результате значение функционала для APF+PSO меньше, чем у APF, и на качество движения роя это заметно не влияет.

Таким образом, эксперимент 1 показывает, что гибридный алгоритм APF+PSO не только уменьшает значения функционала эффективности движения роя, но и уменьшает амплитуду колебаний более чем в два раза, что обеспечивает устойчивое поведение роя во всех 50 прогонах симуляции.

#### Эксперимент 2. Согласование высот с опорной высотой.

Проверяется согласованность полёта роя на опорной высоте  $h_{grid} = 100(\text{м})$ , и оценивается скорость выравнивания. Для того, чтобы считать фронт неподвижным, рассматривается короткий горизонт  $T = 10(\text{с})$ . Граф связности по высоте – случайный неориентированный

(вероятность ребра  $\approx 0,5$ ). Начальные высоты намеренно различны (диапазон порядка десятков метров относительно  $h_{grid}$ ). Связь разреженная  $k_{ref} = 0,05$ .

Для количественной оценки качества согласования высот используется метрика средних модульных отклонений высот от опорной высоты:

$$e_h(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i(t) - h_{grid}|.$$

Полученные кривые (рисунок 2) демонстрируют экспоненциальное затухание ошибки  $e_h(t)$ . К 8–10-й секунде все прогоны входят в полосу  $\pm 0,5$  м и далее в ней удерживаются. Перерегулирования не зафиксировано, так как после первого входа в допуск  $\pm 0,5$  м повторных выходов за пределы полосы не наблюдалось ни в одном запуске. Монотонность  $e_h(t)$  и сужающийся 95% доверительный интервал (ДИ) показывают, что ни средняя траектория, ни подавляющее большинство реализаций не демонстрируют таких «выбросов». Такая «спокойная» динамика обеспечивает стабильные углы обзора камер дронов в рое и сопоставимость масштабов наблюдений.

Таким образом, даже при разреженной связи и умеренном коэффициенте согласования  $k_h = 0,1$  алгоритм APF+PSO обеспечивает быстрый и гладкий выход роя на заданный опорный уровень.

**Эксперимент 3.** Сопровождение дрейфующего фронта.

Проверяется способность алгоритма APF+PSO удерживать рой на движущемся фронте пожара в течение длительного времени  $T = 40$  (с). В окружении присутствуют 10 случайно сгенерированных препятствий.

Для фиксации эволюции системы взаимодействия роя с линией фронта огня для одного из прогонов показана последовательность моментальных кадров положения роя через равные интервалы времени (рисунок 3). Девять кадров снимаются каждые 5 с, образуя покадровый коллаж движения роя вдоль фронта. На каждом кадре отображается текущая линия фронта, дроны помечены маркерами разной формы, препятствия обозначены в виде малых черных точек.

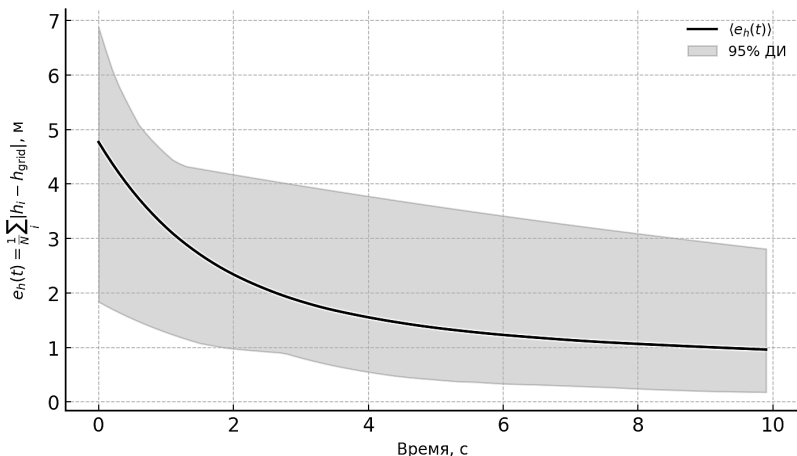


Рис. 2. Динамика средней ошибки по высоте

На основании покадровой визуализации (рисунок 3) можно заключить, что рой успешно сопровождает движущийся фронт пожара на всём промежутке времени. Дроны устойчиво держатся возле локального профиля линии огня, невзирая на её движение. Скопления нескольких БПЛА в одной точке фронта не возникает.

Количественная проверка выполнена по временным траекториям минимальных дистанций «БПЛА–БПЛА» и «БПЛА–препятствие», усреднённых по сериям прогонов с построением 95%-го доверительного интервала (рисунок 4).

Средняя кривая «минимальная дистанция БПЛА–БПЛА» менее чем за 5 с выходит к уровню 5,25–6 м и держится в допустимом коридоре; её 95%-й интервал остаётся целиком выше порога безопасности 5 м. Такая конфигурация поддерживается тем, что в модель включено жёсткое условие на безопасность: после каждого шага интегрирования все пары «БПЛА–БПЛА» и «БПЛА–препятствие» итеративно разводятся минимум до 5,25 м. Таким образом, обеспечивается гарантированный запас  $\approx 0,25$  м даже при дискретизации по времени, и нижняя граница 95%-го интервала не пересекает порог безопасности 5 м.

Медианная кривая «БПЛА–препятствие» располагается выше кривой «БПЛА–БПЛА» и сопровождается более широким доверительным интервалом. Это объясняется тем, что часть препятствий располагается существенно дальше активной зоны полёта, и потому минимальная дальность до ближайшего из них

заметно варьирует и часто значительно превосходит порог 5 м. При этом 95%-й коридор сужается по мере стабилизации построения, а его нижняя граница сохраняет положительный запас над минимальным безопасным расстоянием 5 м, что подтверждает корректный обход препятствий силами APF при дополнительной защите за счёт указанного жёсткого условия.

Предложенный алгоритм APF+PSO позволяет рою длительно сопровождать дрейфующий фронт пожара, не нарушая при этом требований локальной безопасности.

Результаты экспериментов показывают, что гибридная схема APF+PSO при выбранных настройках уверенно решает задачу сопровождения динамического фронта с соблюдением ограничений безопасности и согласованием по высоте. Алгоритм остаётся вычислительно лёгким и пригодным для последующей интеграции в бортовые реализации.

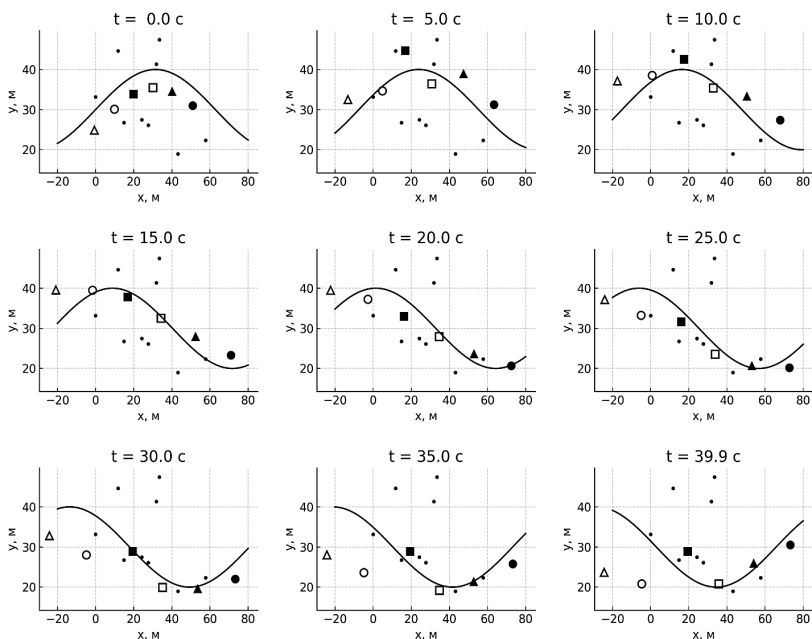


Рис. 3. Показровое сопровождение роём БПЛА дрейфующего фронта пожара



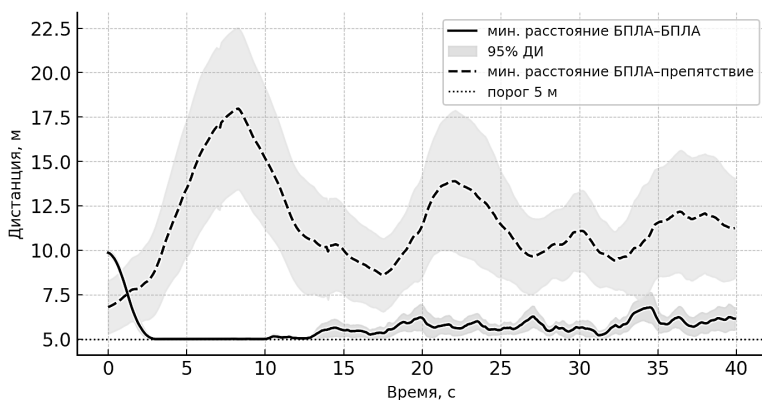


Рис. 4. Временные траектории минимальных дистанций

**8. Заключение.** В работе предложена и обоснована гибридная архитектура координации роя БПЛА для сопровождения динамического фронта лесного пожара, сочетающая три взаимодополняющих механизма: горизонтальное управление на основе метода искусственных потенциальных полей (APF), при котором результирующая сила формируется как суперпозиция сил притяжения к линии огня  $L(t)$ , междронового и препятственного взаимодействия; распределённый закон согласования по опорной высоте, обеспечивающий экспоненциальное выравнивание высот  $h_i$  при связанном графе связи; однопараметрическая модификация метода роя частиц (PSO) для оптимизации распределения БПЛА по длине дуги линии фронта. Предложенная архитектура позволяет одновременно удерживать дроны вблизи движущейся кромки огня при соблюдении безопасных дистанций (не менее 5 м) и обеспечивать равномерное распределение роя вдоль фронта, снижая избыточные манёвры и энергозатраты.

Серия из 50 вычислительных экспериментов показала, что дроны равномерно распределяются вдоль динамически изменяющейся линии огня  $L(t)$ ; высоты  $h_i$  сходятся к опорной высоте  $h_{grid}$ , что подтверждает корректность выбранного закона согласования; значения функционала эффективности движения роя  $J(t)$  для гибридного подхода APF+PSO заметно ниже, чем для классического APF. Важно, что требования безопасности обеспечиваются локальными барьерными функциями и не требуют централизованной системы контроля ограничений.

Проведённое исследование выполнено для роя из шести БПЛА. Алгоритм опирается на локальные взаимодействия между соседними дронами. При фиксированном числе соседей вычислительная и коммуникационная нагрузка на одного агента не растёт с увеличением количества дронов. Тем не менее поведение системы при росте численности роя зависит от связности графа, задержек и потерь в каналах, а также плотности препятствий. Поэтому масштабируемость на большие группы требует отдельной проверки.

Дальнейшее развитие исследований предусматривает переход от аналитически заданного описания фронта к его оценке по данным бортовых сенсоров (видео, тепловизоры) с моделированием влияния ветра и рельефа; учёт задержек и потерь в каналах связи при синтезе управления; масштабирование подхода на более крупные группы БПЛА.

### **Литература**

1. Akhloufi M.A., Couturier A., Castro N.A. Unmanned Aerial Vehicles for Wildland Fires: Sensing, Perception, Cooperation and Assistance // *Drones*. 2021. vol. 5. no. 1.
2. Merino L., Caballero F., Martinez-de-Dios J.R., Maza I., Ollero A. An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. vol. 65. no. 1. pp. 533–548.
3. Martinez-de-Dios J.R., Merino L., Caballero F., Ollero A. Automatic Forest-Fire Measuring Using Ground Stations and Unmanned Aerial Systems // *Sensors*. 2011. vol. 11. no. 6. pp. 6328–6353.
4. Косинов Д.Э. Обзор использования беспилотных летательных аппаратов при мониторинге лесных пожаров // *Материалы Нац. науч.-практ. конф. «Циркулярная экономика для целей устойчивого развития отраслей и территорий»*. Воронеж: ВГЛУ им. Г.Ф. Морозова, 2024. С. 193–198.
5. Zhu P., Song R., Zhang J., Xu Z., Gou Y., Sun Z., Shao Q. Multiple UAV Swarms Collaborative Firefighting Strategy Considering Forest Fire Spread and Resource Constraints // *Drones*. 2025. vol. 9. no. 1.
6. Liu Y., Chen C., Wang Y., Zhang T., Gong Y. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field // *Aerospace Science and Technology*. 2024. vol. 147.
7. Wu R.-Y., Xie X.-C., Zheng Y.-J. Firefighting Drone Configuration and Scheduling for Wildfire Based on Loss Estimation and Minimization // *Drones*. 2024. vol. 8. no. 1. DOI: 10.3390/drones8010017.
8. Кузнецов А.В. Системы мониторинга лесных пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов // *Пожарная и аварийная безопасность: материалы XVIII Междунар. конф.* 2023. С. 622–626.
9. Серебряков А.Е., Гура Д.А., Дражецкий Д.А., Панченко Е.А. Типы БПЛА и возможности использования в целях мониторинга и предотвращения лесных пожаров // *Наука. Техника. Технологии (Политехнический вестник)*. 2021. № 4. С. 175–178.
10. Debnath D., Vanegas F., Sandino J., Hawary A.F., Gonzalez F.A. A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications // *Remote Sensing*. 2024. vol. 16. no. 21.

11. Zhu P., Jiang S., Zhang J., Xu Z., Sun Z., Shao Q. Multi-Target Firefighting Task Planning Strategy for Multiple UAVs Under Dynamic Forest Fire Environment // *Fire*. 2025. vol. 8. no. 2.
12. Sun B., Gu Z., Xiong T. Event-Triggered Formation Tracking Control for Unmanned Aerial Vehicles Subjected to Deception Attacks // *Electronics*. 2021. vol. 10. no. 22.
13. Wang T., Zhao S., Xia Y., Pan Z., Tian H. Consensus Control of Large-Scale UAV Swarm Based on Multi-Layer Graph // *Drones*. 2024. vol. 6. no. 12. DOI: 10.3390/drones6120402.
14. Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Аналитический обзор подходов к распределению задач в группах мобильных роботов на основе технологий мягких вычислений // *Информатика и автоматизация*. 2022. Т. 21. № 4. С. 729–757.
15. Смирнов А.В. Исследование влияния степени овражности целевой функции на погрешность определения координат ее минимума // *Российский технологический журнал*. 2023. Т. 11. № 6. С. 57–67.
16. Akimov A.A., Sapozhnikova K.A., Gnatenko Y.A. A Discrete Swarm Optimization Modification for the Multi Agent Traveling Salesman Problem // *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. IEEE, 2025. pp. 418–424.
17. Cheng Q., Zhang Z., Du Y., Li Y. Research on Particle Swarm Optimization-Based UAV Path Planning Technology in Urban Airspace // *Drones*. 2024. vol. 8. no. 12.
18. Горшков И.Ф., Акимов А.А. Динамическая маршрутизация дронов для доставки заказов // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2025. № 6. С. 202–205.
19. Rimon E., Koditschek D.E. Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1992. vol. 8. no. 5. pp. 501–518. DOI: 10.1109/70.163777.
20. Hao G., Lv Q., Huang Z., Zhao H., Chen W. UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method // *Aerospace*. 2023. vol. 10. no. 6.
21. Xiong H., Deng G., Liu Y., Wu W. Distributed event-triggered formation control of UGV-UAV heterogeneous multi-agent systems for ground-air cooperation // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. vol. 37. no. 12. pp. 458–483.
22. Hartley J., Shum H., Ho S., Wang H., Ramamoorthy S. Formation control for UAVs using a Flux Guided approach // *Expert Systems with Applications*. 2022. vol. 205.
23. Partheepan S., Sanati F., Hassan J. Autonomous Unmanned Aerial Vehicles in Bushfire Management: Challenges and Opportunities // *Drones*. 2023. vol. 7. no. 1. DOI: 10.3390/drones7010047.
24. Shao R., Tao R., Liu Y., Yang Y., Li D., Chen J. UAV cooperative search in dynamic environment based on hybrid-layered APF // *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2021. vol. 2021.
25. Wang N., Dai J., Ying J. UAV Formation Obstacle Avoidance Control Algorithm Based on Improved Artificial Potential Field and Consensus // *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2021. vol. 22. no. 6. pp. 1413–1427.
26. Vicsek T., Czirók A., Ben-Jacob E., Cohen I., Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles // *Physical Review Letters*. 1995. vol. 75. no. 6. pp. 1226–1229. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.1226.
27. Riedel M. A Review of Detect and Avoid Standards for Unmanned Aircraft Systems // *Aerospace*. 2025. vol. 12. no. 4.

**Акимов Андрей Анатольевич** — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры, кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет». Область научных интересов: дифференциальные уравнения, методы оптимального управления,

прикладная информатика. Число научных публикаций — 60. [akimov\\_a@mirea.ru](mailto:akimov_a@mirea.ru); проспект Вернадского, 78, 119454, Москва, Россия; р.т.: +7(499)600-8080,20135.

**Гнатенко Юлия Ахнафовна** — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры, кафедра математического моделирования, Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий. Область научных интересов: математическое моделирование, численные методы, разработка программных комплексов. Число научных публикаций — 40. [u.a.gnatenko@struust.ru](mailto:u.a.gnatenko@struust.ru); проспект Ленина, 49, 453100, Стерлитамак, Республика Башкортостан, Россия; р.т.: +7(3473)339-865,322.

**Болбаков Роман Геннадьевич** — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой, кафедра инструментального и прикладного программного обеспечения, Институт информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет». Область научных интересов: системный анализ, программное обеспечение, оптимальные задачи, прикладные методы обработки информации. Число научных публикаций — 207. [bolbakov@mirea.ru](mailto:bolbakov@mirea.ru); проспект Вернадского, 78, 119454, Москва, Россия; р.т.: +7(499)600-8080,20135.

A. AKIMOV, Y. GNATENKO, R. BOLBAKOV

**A MULTI-LAYER STRATEGY FOR SAFE NAVIGATION AND SWARM DISTRIBUTION OF UAVS IN WILDFIRE MONITORING**

---

*Akimov A., Gnatenko Y., Bolbakov R. A Multi-Layer Strategy for Safe Navigation and Swarm Distribution of UAVs in Wildfire Monitoring.*

**Abstract.** Wildfires are among the most dangerous and least predictable natural hazards, necessitating continuous real-time monitoring of the advancing fire front. Traditional assets – such as satellite imagery or ground observation posts – often lack the responsiveness and completeness required for timely decision-making. A promising alternative is the use of a swarm of unmanned aerial vehicles (UAVs); however, effective coordination under dynamic conditions and constrained communication and computational resources calls for dedicated control algorithms. This work presents a multi-layer control strategy for a UAV swarm that integrates three components. Horizontal navigation is governed by the Artificial Potential Field (APF) method, which attracts agents to the fire-front line while repelling them from obstacles and neighboring vehicles. A distributed consensus protocol stabilizes flight at a common reference altitude, ensuring comparable viewing geometry. To achieve an even distribution along the front, a modified Particle Swarm Optimization (PSO) layer is employed, reducing competition between drones and unnecessary maneuvering. We report a series of computational experiments comparing classical APF with the hybrid APF+PSO scheme for minimizing a swarm motion performance functional. The hybrid approach lowers the objective by nearly an order of magnitude relative to APF alone, reduces behavioral variability, maintains a coordinated altitude without pronounced overshoot, and ensures reliable obstacle avoidance in the presence of a moving front. Minimum inter-drone separations did not fall below the 5-m safety threshold, confirming compliance with safety requirements. The algorithm sustains stable tracking of the moving front over the entire simulation horizon while preserving correct obstacle clearance. Overall, the proposed strategy combines computational simplicity with high reliability. Future work will incorporate onboard sensing (video and thermal cameras), modeling of wind and terrain effects, analysis of communication delays and losses, and extension of the approach to larger UAV teams.

**Keywords:** artificial potential fields, particle swarm optimization, distributed control, multi-layer strategy, swarm navigation, route optimization, altitude consensus, hybrid algorithms.

---

**References**

1. Akhloufi M.A., Couturier A., Castro N.A. Unmanned Aerial Vehicles for Wildland Fires: Sensing, Perception, Cooperation and Assistance. *Drones*. 2021. vol. 5. no. 1.
2. Merino L., Caballero F., Martínez-de-Dios J.R., Maza I., Ollero A. An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2012. vol. 65. no. 1. pp. 533–548.
3. Martínez-de-Dios J.R., Merino L., Caballero F., Ollero A. Automatic Forest-Fire Measuring Using Ground Stations and Unmanned Aerial Systems. *Sensors*. 2011. vol. 11. no. 6. pp. 6328–6353.
4. Kosinov D.E. [Use of UAVs for forest-fire monitoring]. *Materiály Nats. nauch.-prakt. konf. «Tsirkulyarnaya ekonomika dlya tselei ustoychivogo razvitiya otraslei i territorii»* [Proceedings of the National Scientific and Practical Conference «Circular Economy for Sustainable Development of Industries and Territories»]. Voronezh: VGLTU im. G.F. Morozova, 2024. pp. 193–198. (In Russ.).

5. Zhu P., Song R., Zhang J., Xu Z., Gou Y., Sun Z., Shao Q. Multiple UAV Swarms Collaborative Firefighting Strategy Considering Forest Fire Spread and Resource Constraints. *Drones*. 2025. vol. 9. no. 1.
6. Liu Y., Chen C., Wang Y., Zhang T., Gong Y. A fast formation obstacle avoidance algorithm for clustered UAVs based on artificial potential field. *Aerospace Science and Technology*. 2024. vol. 147.
7. Wu R.-Y., Xie X.-C., Zheng Y.-J. Firefighting Drone Configuration and Scheduling for Wildfire Based on Loss Estimation and Minimization. *Drones*. 2024. vol. 8. no. 1. DOI: 10.3390/drones8010017.
8. Kuznetsov A.V. [Systems for forest-fire monitoring using UAVs]. *Pozharnaya i avarijnaya bezopasnost': materialy XVIII Mezhdunar. konf. [Fire and Emergency Safety: Proceedings of the 18th International Conference]*. 2023. pp. 622–626. (In Russ.).
9. Serebryakov A.E., Gura D.A., Drazhetskii D.A., Panchenko E.A. [UAV types and capabilities for monitoring and preventing forest fires]. *Nauka. Tekhnika. Tekhnologii (Politekhicheskii vestnik) – Science. Engineering. Technologies (Polytechnic Bulletin)*. 2021. no. 4. pp. 175–178. (In Russ.).
10. Debnath D., Vanegas F., Sandino J., Hawary A.F., Gonzalez F.A. A Review of UAV Path-Planning Algorithms and Obstacle Avoidance Methods for Remote Sensing Applications. *Remote Sensing*. 2024. vol. 16. no. 21.
11. Zhu P., Jiang S., Zhang J., Xu Z., Sun Z., Shao Q. Multi-Target Firefighting Task Planning Strategy for Multiple UAVs Under Dynamic Forest Fire Environment. *Fire*. 2025. vol. 8. no. 2.
12. Sun B., Gu Z., Xiong T. Event-Triggered Formation Tracking Control for Unmanned Aerial Vehicles Subjected to Deception Attacks. *Electronics*. 2021. vol. 10. no. 22.
13. Wang T., Zhao S., Xia Y., Pan Z., Tian H. Consensus Control of Large-Scale UAV Swarm Based on Multi-Layer Graph. *Drones*. 2024. vol. 6. no. 12. DOI: 10.3390/drones6120402.
14. Darintsev O., Migranov A. [Analytical Review of Approaches to the Distribution of Tasks for Mobile Robot teams Based on Soft Computing Technologies]. *Informatics and Automation*. 2022. vol. 21. no. 4. pp. 729–757. (In Russ.).
15. Smirnov A.V. [Effect of objective-function ruggedness on minimum localization error]. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal – Russian Technological Journal*. 2023. vol. 11. no. 6. pp. 57–67. (In Russ.).
16. Akimov A.A., Sapozhnikova K.A., Gnatenko Y.A. A Discrete Swarm Optimization Modification for the Multi Agent Traveling Salesman Problem. *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*. IEEE, 2025. pp. 418–424.
17. Cheng Q., Zhang Z., Du Y., Li Y. Research on Particle Swarm Optimization-Based UAV Path Planning Technology in Urban Airspace. *Drones*. 2024. vol. 8. no. 12.
18. Gorshkov I.F., Akimov A.A. [Dynamic drone routing for delivery]. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]*. 2025. no. 6. pp. 202–205. (In Russ.).
19. Rimon E., Koditschek D.E. Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1992. vol. 8. no. 5. pp. 501–518. DOI: 10.1109/70.163777.
20. Hao G., Lv Q., Huang Z., Zhao H., Chen W. UAV Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method. *Aerospace*. 2023. vol. 10. no. 6.
21. Xiong H., Deng G., Liu Y., Wu W. Distributed event-triggered formation control of UGV-UAV heterogeneous multi-agent systems for ground-air cooperation. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2024. vol. 37. no. 12. pp. 458–483.

22. Hartley J., Shum H., Ho S., Wang H., Ramamoorthy S. Formation control for UAVs using a Flux Guided approach. *Expert Systems with Applications*. 2022. vol. 205.
23. Partheepan S., Sanati F., Hassan J. Autonomous Unmanned Aerial Vehicles in Bushfire Management: Challenges and Opportunities. *Drones*. 2023. vol. 7. no. 1. DOI: 10.3390/drones7010047.
24. Shao R., Tao R., Liu Y., Yang Y., Li D., Chen J. UAV cooperative search in dynamic environment based on hybrid-layered APF. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. 2021. vol. 2021.
25. Wang N., Dai J., Ying J. UAV Formation Obstacle Avoidance Control Algorithm Based on Improved Artificial Potential Field and Consensus. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*. 2021. vol. 22. no. 6. pp. 1413–1427.
26. Vicsek T., Czirók A., Ben-Jacob E., Cohen I., Shochet O. Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Physical Review Letters*. 1995. vol. 75. no. 6. pp. 1226–1229. DOI: 10.1103/PhysRevLett.75.1226.
27. Riedel M. A Review of Detect and Avoid Standards for Unmanned Aircraft Systems. *Aerospace*. 2025. vol. 12. no. 4.

**Akimov Andrey** — Ph.D., Associate professor of the department, Department of instrumental and applied software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University. Research interests: differential equations, optimal control methods, applied informatics. The number of publications — 60. akimov\_a@mirea.ru; 78, Vernadsky Ave., 119454, Moscow, Russia; office phone: +7(499)600-8080,20135.

**Gnatenko Yuliya** — Ph.D., Associate professor of the department, Department of mathematical modeling, Sterlitamak Branch of the Ufa University of Science and Technology. Research interests: mathematical modeling, numerical methods, development of software systems. The number of publications — 40. y.a.gnatenko@struust.ru; 49, Lenin Ave., 453100, Sterlitamak, Republic of Bashkortostan, Russia; office phone: +7(3473)339-865,322.

**Bolbakov Roman** — Ph.D., Associate Professor, Head of the department, Department of instrumental and applied software, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University. Research interests: systems analysis, software engineering, optimization problems, applied methods of information processing. The number of publications — 207. bolbakov@mirea.ru; 78, Vernadsky Ave., 119454, Москва, Russia; office phone: +7(499)600-8080,20135.