

И.В. Бычков, М.Ю. Кензин, Н.Н. Максимкин  
**ДВУХУРОВНЕВЫЙ ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПОДХОД К  
МАРШРУТИЗАЦИИ ГРУППЫ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ В  
УСЛОВИЯХ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ РОТАЦИИ СОСТАВА**

---

*Бычков И.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н. Двухуровневый эволюционный подход к маршрутизации группы подводных роботов в условиях периодической ротации состава.*

**Аннотация.** Применение скоординированных групп автономных подводных роботов представляется наиболее перспективной и многообещающей технологией, обеспечивающей решение самого широкого спектра океанографических задач. Групповое выполнение комплексных широкомасштабных миссий, как правило, связано с длительным пребыванием роботов в заданной акватории, что в условиях ограниченной энергоемкости аккумуляторных батарей возможно только при наличии специализированных док-станций для ее пополнения. Для обеспечения высокого уровня работоспособности действующей группировки возникают две параллельные задачи: эффективно распределить задания миссии между членами группы и определить порядок подзарядки роботов на длительном промежутке времени. При этом необходимо учитывать, что реальные робототехнические системы функционируют в динамической подводной среде, а значит, могут подвергаться влиянию непредвиденных событий и различного рода неполадок.

В данной статье предлагается двухуровневый подход к динамическому планированию групповой стратегии, основанный на декомпозиции миссии на последовательность рабочих периодов с обязательным сбором действующей группировки по окончании каждого из них. Задача планировщика на верхнем уровне заключается в составлении такого расписания циклов зарядки для всех аппаратов в группе, которое обеспечивало бы своевременное пополнение батарей при недопущении одновременной зарядки большого количества роботов. На основе выбранного расписания осуществляется декомпозиция миссии таким образом, чтобы каждый сбор группы сопровождался либо выходом робота из группы для осуществления подзарядки, либо возвращением в группу уже заряженного аппарата. Такая схема позволяет отслеживать статус группы и осуществлять оперативное перепланирование при изменении ее состава. Маршрутизация группы на каждом рабочем периоде осуществляется низкоуровневым планировщиком, работающим на графе целей и учитывающим технические возможности всех аппаратов в группе, а также все действующие ограничения и требования к выполнению конкретных задач. В статье предлагается эволюционный подход к децентрализованной реализации обоих планировщиков с применением специализированных эвристик, процедур улучшения решений и оригинальных схем кодирования и оценки решений; приводятся результаты вычислительных экспериментов.

**Ключевые слова:** автономные подводные роботы, групповое управление, задача составления расписания, задача маршрутизации транспорта, эволюционные алгоритмы.

---

**1. Введение.** На протяжении последних десятилетий автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) демонстрируют свою высокую эффективность при выполнении различного рода подводных работ по обследованию морского дна,

включая задачи картографирования, мониторинга, взятия проб, обнаружения и деактивации мин и другие. Эти мобильные роботы способны принимать участие в многоцелевых подводных миссиях большой длительности при значительно меньших ресурсных затратах в сравнении с применением обитаемых подводных транспортных средств [1]. При этом на данный момент подавляющее большинство реальных миссий АНПА осуществляется исключительно единичными аппаратами и на базе заранее спланированных траекторий и последовательностей действий [2]. Очевидно, что в условиях ограниченного времени и конечного энергозапаса батарей единичный аппарат не в состоянии обеспечить выполнение значительного количества работ в рамках комплексной подводной миссии. В связи с этим наиболее перспективным средством выполнения широкомасштабных океанографических операций представляется применение скоординированных робототехнических группировок, способных обеспечивать эффективный мониторинг значительных районов океана, а также производить измерения в заданной акватории с высоким разрешением как по времени, так и в пространстве [3].

Организация совместной работы группы подводных роботов в динамической подводной среде является сложным и нетривиальным процессом: заданный набор задач должен быть выполнен в результате коллективных действий нескольких аппаратов при действующих ограничениях и в условиях изменяющейся внешней обстановки. Разработка и развитие таких автономных многокомпонентных систем напрямую зависит от надежности и эффективности реализации механизмов планирования и маршрутизации [4]. Таким образом, на первый план выходит именно эффективная координация внутри сети АНПА, в том числе блок системы группового управления, который отвечает за распределение заданий между всеми роботами и планирование индивидуальных маршрутов.

В общем случае задача распределения целей и планирования маршрутов для группы АНПА представляет собой вариацию задачи маршрутизации транспорта (*vehicle routing problem*) со специализированными пространственно-временными ограничениями, накладываемыми особенностями подводных операций, неопределенной природой динамической среды, а также неточностью измерительных приборов. Многие виды подводных задач, такие как патрулирование, охрана, проведение замеров и другие, требуют для своего выполнения не разового проведения соответствующих работ в заданных областях акватории, а регулярной серии таких посещений роботами группы [5]. В этом отношении многозадачные подводные

операции могут быть поделены на два класса: обследовательские миссии и миссии по мониторингу.

Так, обследовательские миссии объединяют все виды подводных задач, для выполнения которых требуется разовое прибытие АНПА. В свою очередь, миссии по мониторингу включают все работы, требующие регулярных инспекций в соответствующих областях аппаратами группы с заданной периодичностью. В обоих случаях выполнение заданий может подразумевать наличие и других дополнительных условий, требований и ограничений (технических, временных и т.д.). Поскольку класс миссий по мониторингу совмещает в себе одновременно пространственные и комплексные временные ограничения, то именно он представляет больший научно-исследовательский и практический интерес.

Вместе со всеми установленными ограничениями необходимо учитывать, что реальные многокомпонентные робототехнические комплексы являются частично или полностью автономными системами и вынуждены самостоятельно реагировать на различные изменения во внешней среде, непрогнозируемые события и отказы оборудования. Помимо этого, необходимость периодической подзарядки аккумуляторных батарей АНПА в процессе выполнения продолжительных миссий также значительно затрудняет групповую маршрутизацию: во-первых, уход отдельных аппаратов на зарядку приводит к изменению действующего состава группировки, а значит, и к необходимости корректировки текущей групповой стратегии; во-вторых, в связи с этим возникает потребность в регулярных сборах всех роботов (рандеву) в установленном месте с целью актуализации состояния группы, обмена данными, отправки отдельных АНПА на зарядку либо приема роботов в группу после нее [6]. Хотя частые рандеву и способствуют повышению осведомленности группы и скорости ее реакции на любые существенные изменения, но вместе с тем каждый такой сбор может на значительное время отвлекать членов группы от своевременного выполнения текущих задач.

В данной статье предлагается использование двухуровневого подхода к решению задачи динамической маршрутизации группы АНПА при выполнении многозадачной миссии большой продолжительности. На верхнем уровне классический генетический алгоритм осуществляет составление расписания групповых рандеву в соответствии с ожидаемой ротацией роботов для пополнения заряда аккумуляторных батарей. Учитывая запланированные изменения состава при сборах группы, нижеуровневый гибридный эволюционный алгоритм генерирует маршруты для каждого рабочего периода, которые обеспечивают максимальную эффективность

действующего состава при выполнении поставленных задач и гарантируют прибытие всех АНПА к месту следующего сбора. Данная работа является продолжением предыдущих исследований авторов в области группового управления [7, 8] и посвящена координации группы в условиях топливных ограничений и связанной с ними периодической ротацией состава группы.

**2. Постановка задачи.** В общем случае многозадачные миссии АНПА по мониторингу акватории состоят в посещении и обследовании (проведении ряда работ) группой подводных роботов заданного множества целей с рекомендуемой частотой. Задача маршрутизации группы при выполнении длительного мониторинга заключается в построении такого допустимого группового маршрута, который обеспечивал бы, насколько это возможно, своевременное обследование всех целей в условиях периодической смены состава действующей группировки для осуществления подзарядки аккумуляторных батарей. В дальнейшем мы будем называть задачу, исследуемую в рамках данной статьи, *задачей регулярного мониторинга*. Приведем ее формальную постановку.

Обозначим через  $T$  длительность всей миссии. Предполагается, что это большое (в масштабах задачи планирования) число. Пусть изначально миссия включает  $N = \{1, \dots, n\}$  целей (заданий), расположенных в рамках обозначенной акватории. Кроме своего местоположения, каждая цель  $i \in N$  характеризуется также требуемой периодичностью обследований  $p_i$  и длительностью разового обследования  $s_i$ . Значение периодичности  $p_i$  означает, что длительность временного интервала между каждыми двумя последовательными посещениями  $i$ -ой цели аппаратами группы должна составлять ровно  $p_i$ . Таким образом, в случае прибытия к цели ранее, чем через установленный интервал  $p_i$ , аппарат вынужден будет пребывать в режиме ожидания вплоть до истечения требуемого интервала. В случае прибытия АНПА с опозданием, новый интервал  $p_i$  будет отсчитываться не от ожидаемого, а от фактического времени последнего обследования цели.

Ограничения на периодичность посещений такого вида являются аналогом «жестких» временных окон из соответствующего класса задач маршрутизации и отвечают реальным задачам исследования динамики различных процессов [9], когда результаты обследования каждой цели (пробы, замеры, фото- и видеоизображения) должны быть получены аппаратами предпочтительно через равные промежутки времени. Постановки с подобными ограничениями практически не представлены в литературе, в отличие от ограничений «мягкого» вида,

когда допускается (а зачастую и поощряется) обследование целей чаще максимально допустимой периодичности (миссии по экологическому мониторингу, охране, патрулированию и т.п.). В то же время способность работать с «жесткими» временными окнами в задачах регулярного мониторинга позволит в дальнейшем рассматривать более сложные постановки, в которых будут одновременно представлены цели обоих типов.

Пусть группа подводных роботов, выполняющая миссию, изначально состоит из  $m$  аппаратов. Все аппараты в группе являются функционально идентичными, то есть каждый из них обладает всем необходимым оборудованием для обследования любой цели  $i$  за время  $s_i$ . При этом аппараты могут различаться между собой по своей крейсерской скорости  $v^k$  движения в водной среде и по емкости своих аккумуляторных батарей  $b^k, k = 1, \dots, m$ . Здесь мы допускаем, что все АНПА в течение миссии перемещаются между целями со своей равномерной крейсерской скоростью, а емкость аккумуляторов определяется не в единицах энергии, а в средней длительности функционирования АНПА.

Ограниченная емкость аккумуляторных батарей вынуждает роботов группы периодически прерывать работу для осуществления подзарядки путем стыковки со специальным зарядным доком или, в случае использования солнечных батарей, простого всплытия на поверхность. Конкретное расположение зарядных баз не является существенным, поскольку нам требуется лишь оценка сверху времени, которое требуется каждому АНПА для перемещения до ближайшего дока (всплытия) из рабочей области акватории. Также в данной работе мы допускаем, что количество зарядных баз и доков согласовано с количеством аппаратов в группе, а значит, в процессе выполнения миссии любой АНПА группы сможет быть обслужен на зарядной базе в любой момент времени. Обозначим среднюю скорость зарядки любой батареи через постоянную величину  $c > 1$ . Тогда для полной зарядки аккумуляторной батареи емкостью  $b$  потребуется  $b/c$  времени.

Поскольку все заданные цели расположены в ограниченной водной акватории и привязаны к конкретным ее участкам, они могут быть представлены в виде сети, где каждому узлу сети соответствует одна из целей миссии, что позволяет напрямую перейти к решению задачи маршрутизации транспорта на местности, представленной в виде графа [4]. Определим множество всех узлов сети как  $V = N \cup V_0$ , где  $V_0$  соответствует установленной заранее точке группового сбора. Обозначим множество всех ребер графа как  $\varepsilon = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ .

Каждое ребро здесь соответствует кратчайшему пути между соответствующей парой целей. Предполагается, что траектории всех путей для исходного множества целей вычисляются заранее, а пути для новых заданий, возникающих в процессе выполнения миссии, рассчитываются онлайн на борту АНПА группы с использованием специализированного планировщика. Каждому ребру ставится в соответствие значение его веса — длина соответствующей траектории, которая при необходимости может быть легко пересчитана во временные затраты на перемещение АНПА по этому пути. Таким образом, ненаправленный (в отсутствие течений) полносвязный граф  $G = (V, \varepsilon)$  представляет собой «дорожную карту» текущей многозадачной миссии.

На рисунке 1 схематически представлен процесс выполнения миссии по мониторингу группой из четырех АНПА в предложенной выше постановке. В изображенный момент времени действующая группировка состоит из двух роботов, выполняющих обследование текущих целей; еще один аппарат временно вышел из группы и движется к док-станции для восполнения заряда своих аккумуляторных батарей; четвертый аппарат недавно закончил подзарядку и находится на пути к точке группового сбора. После прибытия четвертого АНПА в точку сбора, действующая группировка уже в обновленном составе продолжит обход целей в соответствии с их состоянием (временем с последнего посещения).



Рис. 1. Схематическое представление выполнения миссии по длительному мониторингу акватории группой АНПА с непостоянным составом

Описанная задача содержит в себе особенности сразу нескольких известных NP-трудных транспортных задач: систематического покрытия и патрулирования (*persistent coverage and tasks patrolling problem*), мультикоммивояжера и нескольких вариаций задачи маршрутизации транспорта (*vehicle routing problem*). Постановка задачи маршрутизации транспорта (ЗМТ) и методы ее решения впервые были предложены в [10]. В рамках ЗМТ целью транспортных средств является вывоз и доставка грузов со склада до заданного набора клиентов, а сама задача маршрутизации заключается в поиске маршрута, оптимального по заданной характеристике (время, расстояние, стоимость и др.). Наиболее значимыми вариациями задачи маршрутизации являются периодическая ЗМТ (*periodic vehicle routing problem*), добавляющая в постановку многодневный горизонт планирования и требования клиентов по количеству посещений, и ЗМТ с временными окнами (*vehicle routing problem with time windows*), когда каждый клиент должен быть посещен строго в определенный период времени. В отсутствие необходимости непосредственной доставки грузов такие задачи сводятся к задаче мультикоммивояжера (*multiple traveling salesman problem*), когда необходимо найти кратчайшую групповую траекторию, обеспечивающую обход всех клиентов при действующих пространственно-временных ограничениях с последующим возвращением в стартовую точку.

Задача патрулирования (*coverage and patrol*) заключается в непрерывном посещении одним или несколькими агентами набора целей в рамках заданной области с целью минимизации периода между последовательными посещениями каждой точки [11]. В идеальном случае такой обход всего множества целей должен обеспечивать полное покрытие области патрулирования. В [12] исследуется расширенная постановка задачи патрулирования с предотвращением вторжения: задается граф потенциальных целей, где в соответствие каждой вершине ставится время, требующееся злоумышленнику для вторжения. Таким образом, маршрут для патрулирующих агентов строится с целью обеспечить посещение каждой цели с частотой, гарантирующей обнаружение злоумышленника.

Задача систематического мониторинга (*persistent visitation problem*), представленная в [13], лежит на пересечении патрульных постановок и задачи маршрутизации. Так, в [13] отсутствует понятие горизонта планирования в его классическом понимании. Вместо этого каждая цель характеризуется минимально допустимой частотой посещения. Также на транспортные средства накладывается ограничение по емкости топливного бака, при этом на карте имеется ряд заправок с установленной ценой топлива. Ставится задача обеспечить непрерывный обход всех целей с требуемой

частотой и своевременную дозаправку транспортных средств при минимальных затратах на топливо.

Задача систематического мониторинга частично пересекается с задачей регулярной маршрутизации, исследуемой в данной статье. В то же время между постановками существует ряд значительных различий, которые не позволяют отнести исследуемую задачу к вариации задачи систематического мониторинга и использовать для ее решения аналогичные методы и идеи. Так, требование ко времени посещения целей в [13] является аналогом «мягких» временных окон из соответствующей ЗМТ, то есть допускает преждевременное обследование цели чаще значения ее периодичности. В рассматриваемой нами задаче транспортное средство вынуждено ожидать строгого истечения такого отрезка времени, что соответствует принципу «жестких» временных окон. При этом именно «мягкие» временные требования позволяют авторам разбить обход всего множества целей на несколько последовательных циклических траекторий, непрерывное движение по которым обеспечивало бы постоянное приведение задачи в состояние, идентичное начальному. Кроме того, авторы [13] пренебрегают временными затратами на посещение целей и дозаправку, считая их ничтожно малыми относительно временных затрат на движение, и предлагают решение только для постановки с единичным транспортным средством. Даже при таких существенных допущениях доказывалось, что задача систематического мониторинга, будучи новой оригинальной вариацией ЗМТ, является NP-полной.

В литературе представлено большое количество работ, развивающих модель систематического мониторинга, однако подавляющее их большинство посвящено поиску именно циклических траекторий ограниченной длины. Ограничения же в виде «жестких» временных окон делают такое разбиение невозможным, что приводит к необходимости оперирования ациклическими маршрутами с плавающим горизонтом планирования [14]. Кроме того, стоит отметить, что в подавляющем большинстве прикладных исследований по перечисленным задачам рассматривается их применимость к управлению беспилотными аппаратами, действующими в свободной воздушной среде [15-17], поэтому вопрос обеспечения межаппаратной коммуникации в них не поднимается. Авторам данной статьи не известны модели группового мониторинга, в которых ограничения в виде «жестких» временных окон сочетались бы с необходимостью периодической подзарядки, а аппараты группы и цели различались бы между собой по своим характеристикам. Такие задачи маршрутизации, объединяющие в себе целый спектр различных ограничений и требований, в современной литературе принято



относить к широкому классу комплексных задач маршрутизации (*rich vehicle routing problem*) [18].

Прежде чем перейти к решению рассматриваемой задачи как комплексной ЗМТ, необходимо отметить, что процесс выполнения подводной миссии является полностью автономным, то есть все вычисления производятся исключительно на бортовых системах АНПА. Очевидно, что для достижения максимальной суммарной вычислительной мощности при реализации децентрализованной архитектуры системы группового управления, все распараллеливаемые вычисления должны быть распределены между аппаратами. В то же время эффективная децентрализация возможна только в том случае, когда все узлы системы обладают актуальными данными. Так как коммуникационный обмен внутри группы осуществляется путем передачи данных между аппаратами по гидроакустическому каналу связи, полная синхронизация актуальных данных внутри группы может быть достигнута, только когда каждый робот будет в состоянии установить канал связи (напрямую или опосредованно) с любым другим роботом в группе. Ввиду низкой скорости и ограниченной дальности действия гидроакустического канала связи, предполагается, что полная синхронизация данных может быть осуществлена только во время проведения так называемых рандеву, когда вся действующая группировка АНПА одновременно прибывает в некоторую заранее оговоренную область. В дальнейшем мы будем называть групповые маршруты *коммуникационно устойчивыми*, если они гарантируют возможность регулярной синхронизации данных [7].

Требование *коммуникационной устойчивости* диктуется, в первую очередь, динамической природой реальных подводных миссий: во-первых, по результатам проводимых АНПА обследований может потребоваться изменение самого множества целей либо параметров отдельных целей; во-вторых, неопределенность внешней среды, ограниченные коммуникационные возможности, вероятность возникновения задержек и неисправностей оборудования могут приводить к непредвиденным изменениям в статусе действующей группировки. Все эти изменения могут происходить в реальном времени и приводить к потере эффективности выбранной ранее групповой стратегии. Таким образом, любые значимые изменения должны инициировать корректировку текущего группового маршрута с целью максимизации эффективности работы группы в новых условиях. В число возможных событий входят:

- добавление в миссию новых целей или отказ от текущих целей;
- изменение параметров цели или свойств аппаратов;
- потеря группой аппарата или выход АНПА из строя;

- расширение группы новыми роботами или обнаружение ранее потерянного АНПА;
- уход АНПА из группы для подзарядки батарей;
- присоединение АНПА после подзарядки к группе.

Отдельно стоит отметить, что изначально два последних события не должны быть указаны в приведенном списке, так как они могут быть спрогнозированы на основе рабочих циклов АНПА с высокой степенью точности. Однако, поскольку предполагаемое время наступления этих событий также может смещаться вследствие возникновения других изменений, мы предлагаем рассматривать их в качестве ключевых точек для процедуры планирования миссии наравне с другими случаями.

Эффективность групповой работы в целом определяется регулярностью обследований всех целей миссии при своевременной подзарядке АНПА. Ситуации, когда роботы прибывают с опозданием, задерживая обследование цели, являются нежелательными и должны по возможности быть исключены. Таким образом, ставится задача разработки алгоритмического обеспечения для системы управления, реализующей эффективное планирование групповых маршрутов. Разрабатываемый подход должен обеспечивать генерацию группового маршрута с минимальным опозданием при выполнении продолжительного регулярного обследования целей миссии вплоть до момента ее окончания в условиях высокой динамики внешней среды и постоянной ротации состава действующей группы.

**3. Двухуровневая система управления.** Эффективное планирование реальных подводных миссий для групп АНПА является комплексной и нетривиальной задачей, особенно в жестких временных рамках, когда необходима оперативная реакция группы на изменения внешней среды и непредвиденные возмущения. Групповая маршрутизация большой размерности сама по себе является задачей высокой вычислительной сложности даже в идеальной (полностью известной и неизменной) среде, поэтому в условиях динамической внешней среды поиск оптимального решения на периоде выполнения миссии  $T$  теряет свою целесообразность. В связи с этим на первый план выходит быстрое и точное локальное планирование с учетом ближайших ожидаемых изменений.

Мы предлагаем использование двухуровневой системы управления для обеспечения групповых миссий по регулярному мониторингу большой продолжительности. На двух уровнях предлагаемого подхода реализуется динамическое планирование групповой стратегии и локальное распределение целей (маршрутизация)

соответственно. Так, цель динамического планировщика миссии на верхнем уровне — производить декомпозицию миссии, обеспечивающую регулярность групповых сборов и общее снижение вычислительной нагрузки для расчета маршрутов аппаратов. В свою очередь, задача планировщика нижнего уровня — распределить цели между аппаратами группы и выбрать эффективный порядок их обхода с учетом действующих требований и ограничений.

В идеальном случае, когда точки разбиения при декомпозиции миссии соответствуют моментам возникновения любых значимых изменений, задача маршрутизации на каждом рабочем периоде группы (временном отрезке между двумя последовательными точками разбиения) будет являться статичной. Однако, поскольку среди приведенных выше событий достоверно предсказаны могут быть только те, которые связаны с процессом подзарядки аккумуляторных батарей АНПА, предлагается следующая схема декомпозиции миссии, основанная на ожидаемом цикле ротации роботов (см. рисунок 2). Чтобы в дальнейшем избежать путаницы терминов, уточним, что под *рабочим периодом группы* мы понимаем временной отрезок между двумя последовательными групповыми сборами, а под *рабочим циклом АНПА* — период работы аппарата между двумя его последовательными подзарядками.

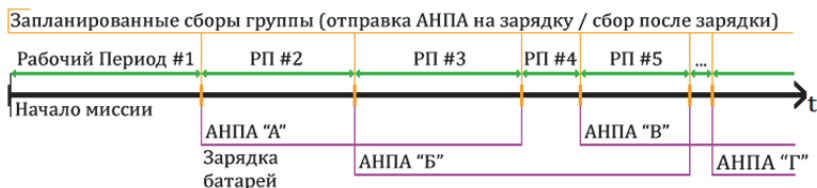


Рис. 2. Декомпозиция миссии на основе циклов зарядки АНПА

Возвращаясь к предложенной схеме, каждая точка разбиения миссии соответствует моменту сбора (рандеву) текущей группировки АНПА в заранее оговоренной области. Размер области сбора определяется в зависимости от предустановленной коммуникационной аппаратуры АНПА и глубины выполнения работ [19]. Рандеву включает в себя отправку нуждающихся в подзарядке аппаратов к док-станциям, сбор роботов, вернувшихся с зарядной базы, а также полную синхронизацию данных внутри группы и при необходимости обновление условий миссии. По завершении рандеву действующая группировка в обновленном составе возвращается к выполнению работ и осуществлению обследования целей миссии. При этом в процессе выполнения работ каждый робот группы в фоновом режиме

осуществляет поиск наилучшего группового маршрута уже на следующий рабочий период группы с учетом перегруппировки состава, предстоящей на ближайшем рандеву. Такое предварительное планирование позволяет одновременно сократить длительность каждого рандеву и распределить вычисления между аппаратами, обеспечив децентрализацию управления [20]. В этом случае полная синхронизация данных при каждом сборе должна дополнительно включать в себя обмен наилучшими найденными внутри группы решениями.

На рисунке 3 представлена схема функционирования группы АНПА на основе предложенного двухуровневого подхода. В соответствии с приведенной схемой, в процессе выполнения заданий на текущем рабочем периоде аппараты действующей группировки осуществляют планирование группового маршрута на следующий рабочий период группы согласно актуальному расписанию ротации. По прибытию в точку сбора в конце рабочего периода производится коммуникационный обмен между роботами группы, а также осуществляется отправка нуждающихся АНПА на зарядку и прием в группу уже зарядившихся аппаратов. В отсутствие незапланированных событий аппараты обмениваются наилучшими найденными решениями, выбирают среди них наиболее эффективный в качестве нового группового маршрута и начинают выполнение работ на новом рабочем периоде. В случае, когда были обнаружены существенные изменения в условиях миссии, инициируется сначала корректировка текущего расписания рабочих периодов, а затем генерация нового группового маршрута на ближайший рабочий период в соответствии с полученным от верхнего уровня расписанием ротации.

Таким образом, задача верхнеуровневого планировщика — регулировать действующий состав группы во времени, управляя рабочими циклами каждого аппарата. Поскольку от АНПА не требуется всегда работать в группе до полного разряда батарей и они могут покидать группу, имея некоторый энергозапас, а полная зарядка батарей также не обязательна (хоть и предпочтительна), то мы получаем возможность составлять расписание рабочих циклов АНПА, подстраивая циклы зарядки каждого робота с целью генерации единого группового расписания требуемого качества. Так, от расписания требуется, во-первых, удовлетворять критерию допустимости, то есть обеспечивать своевременную зарядку всех нуждающихся АНПА в отсутствие прецедентов выхода роботов из строя по причине нехватки энергии. Во-вторых, по возможности должна быть исключена одновременная зарядка большого количества аппаратов, так как это ведет к значительной потере производительности группировки, оставшейся для выполнения целей.

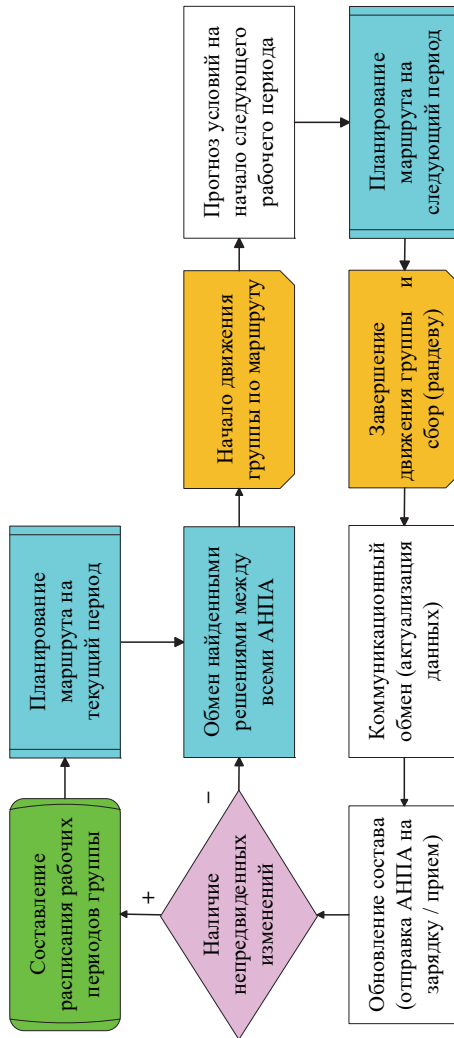


Рис. 3. Схема работы двухуровневой системы группового управления

В случае, если полностью избежать одновременной зарядки нескольких АНПА не представляется возможным, мы хотим добиться максимально равномерного распределения количества одновременно заряжающихся транспортных средств по времени. Для случая разнородной по скоростям группы роботов, этот критерий может быть обобщен как «равномерное распределение по времени суммарных крейсерских скоростей одновременно заряжающихся роботов». Так, для группы из трех роботов с крейсерскими скоростями 3 км/ч, 4 км/ч и 7 км/ч соответственно, при невозможности составить расписание с последовательными периодами подзарядки роботов пересечение периодов зарядки должно осуществляться предпочтительно для двух более медленных АНПА. В-третьих, в связи с тем, что каждый сбор группы ведет к временному прекращению проведения обследований, необходимо избегать избыточной частоты групповых рандеву. Уменьшение количества рандеву может быть осуществлено за счет объединения соседних близкорасположенных событий там, где это возможно, путем их сдвига к единой временной точке. Для примера, на рисунке 2 короткие рабочие периоды #4 и #6 (следующий за #5) могут быть исключены, если аппараты «С» и «D» будут отправлены на зарядку периодом раньше.

Алгоритмы, реализующие декомпозицию миссии на верхнем уровне должны быть простыми, быстрыми и надежными, чтобы обеспечивать оперативную корректировку с минимальным простоем группы после каждого непредвиденного события. В отличие от верхнего уровня, планировщик маршрутов на низком уровне не предназначен для «противодействия» динамическим изменениям среды, а преследует цель эффективного локального планирования групповых маршрутов и траекторий при действующих пространственно-временных ограничениях. Главная задача фазы маршрутизации — не только достичь своевременного обследования целей разнородной группой транспортных средств, но и обеспечить одновременное прибытие действующих АНПА к месту рандеву в конце рабочего периода. Кроме того, нельзя забывать, что задача маршрутизации на одном рабочем периоде не должна рассматриваться обособленно от глобальной задачи всей миссии, поскольку внутренние таймеры (время до следующего запланированного обследования) целей миссии не «останавливаются» на время проведения групповых сборов, что может привести к возникновению опозданий уже после того, как обследование целей будет продолжено на следующем рабочем периоде.

В силу того, что оба уровня предложенной системы планирования являются в равной степени значимыми для эффективного осуществления регулярного и своевременного

мониторинга в течение миссии, обеспечение должного уровня кооперации и синхронизации между планировщиками позволит конечной системе управления справляться с комплексными требованиями и ограничениями, присущими масштабным детализированным моделям реальных прикладных задач [4].

**4. Планировщик миссий.** Обобщая вышеизложенное, цель планировщика на верхнем уровне — сконструировать эффективное допустимое расписание рабочих периодов группы на основе циклов подзарядки АНПА с целью обеспечить максимальную производительность постоянно действующей группировки наряду с возможностью оперативного реагирования на любые непредвиденные изменения условий задачи.

Предполагается, что миссия должна выполняться в течение времени  $T$  значительной продолжительности, поэтому, в условиях высокой динамики среды и необходимости регулярных корректировок, разумным представляется построение расписания не на всю миссию, а на некоторый менее длительный интервал времени. Обозначим за  $T_p$  длительность такого интервала, который будем называть *периодом планирования*. Для получения долгосрочного группового расписания высокого качества, такой период должен включать по крайней мере несколько рабочих циклов каждого АНПА. В задачах составления расписаний большой размерности, как правило, применяется дискретизация пространства поиска, позволяющая ценой незначительных погрешностей одновременно облегчить кодирование решения и ускорить процесс его поиска. Таким образом, мы будем рассматривать период планирования как последовательность равных отрезков времени  $T_p = \langle T^1, \dots, T^e \rangle$ ,  $e = T_p / T_0$ , где  $T_0$  — длительность каждого такого отрезка.

В этом случае рабочее расписание единичного АНПА может быть представлено в виде  $e$ -мерного двоичного вектора, в котором  $i$ -ый элемент принимает значение нуля, когда аппарат работает вместе с группой на соответствующем отрезке времени  $T^i$ , а значение единицы во всех остальных случаях (аппарат находится на пути к зарядной базе, заряжается либо возвращается после зарядки). Расписание единичного робота считается допустимым, если временная длительность каждого из его рабочих циклов (последовательностей нулевых элементов) не превышает запас энергии аккумуляторов на момент завершения последней подзарядки. Таким образом, расписание группы будет представлять собой двоичную матрицу  $H = \{h_{ij}\}$  размерности  $e \times m$  (см. рисунок 4).

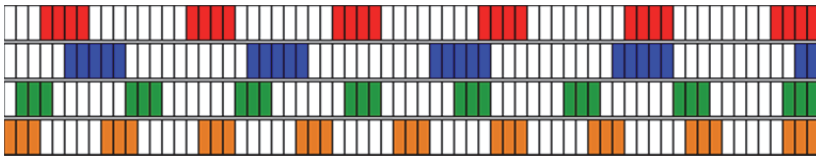


Рис. 4. Расписание ротации для группы из четырех аппаратов с различной емкостью аккумуляторов. Цветные клетки соответствуют периодам подзарядки

По сути, задача минимизации количества одновременно заряжающихся аппаратов на протяжении миссии является вариацией задачи составления циклов зарядки группы с ограничением на ресурсы пополнения аккумуляторов. При ограниченных возможностях подзарядки наилучшим образом показывает себя стратегия разрешения конфликтов (*conflict resolution*), когда действия агентов определяются одновременно двумя противоречащими поведенческими паттернами: уступать нуждающимся и быть жадными [21]. Жадность отвечает за самосохранение агента, стимулируя преждевременную подзарядку при наличии такой возможности (свободной док-станции), а способность уступать обеспечивает выживание группы, поощряя преждевременное прекращение пользования топливным ресурсом в пользу более нуждающихся агентов. При составлении критерия оценки групповых действий на верхнем уровне мы будем основываться на аналогичных принципах.

В нашем случае за самосохранение будет отвечать желание АНПА покинуть группу и пополнять запас энергии батареей независимо от их текущего уровня, уже не возвращаясь обратно для выполнения работ. Так как возврат любого АНПА к работе всегда инициирует проведение группового сбора с целью обновления состава, то этот критерий может быть сформулирован как требование минимизации количества групповых рандеву (пар  $\langle T^i, T^{i+1} \rangle$ , на которых хотя бы один из роботов меняет свой статус):

$$f_G(H) = \sum_{i=2}^e \left( 1 - \prod_{j=1}^m (1 - |h_{ij} - h_{i-1j}|) \right) \rightarrow \min. \quad (1)$$

Действуя по оптимальному расписанию согласно (1), все аппараты группы должны будут сохранять свой начальный статус (работа или зарядка) на протяжении всего периода планирования, чтобы не инициировать сборов действующей группировки. Однако, так как критерием допустимости расписания является поддержание всех АНПА в рабочем состоянии, то



оптимальным допустимым расписанием будет матрица единиц, то есть незамедлительная отправка всех АНПА на зарядку.

В свою очередь, альтруистический шаблон поведения [21], направленный на улучшение командной работы, будет заключаться в поощрении присутствия роботов в группировке, выполняющей цели миссии. Чтобы стимулировать такое поведение, мы будем штрафовать АНПА за время отсутствия в действующей группировке. В этом случае, функция оценки эффективности группового расписания  $H$  будет иметь следующий вид ( $v^j$  — крейсерские скорости движения аппаратов):

$$f_A(H) = \sum_{i=1}^e \left( \left( \sum_{j=1}^m h_{ij} \right) \left( \sum_{j=1}^m h_{ij} \cdot v^j \right) \right) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Штрафная функция (2) оценивает рабочие характеристики (в данном случае *скорость*) всех АНПА, отсутствующих в группе на каждом отрезке  $T^i$  текущего периода планирования вследствие ухода на подзарядку. Используя два множителя под знаком основной суммы, мы пытаемся одновременно исключить зарядку большого числа АНПА, а также подгрупп из самых быстрых аппаратов. В результате, при реализации командного поведения, планировщик будет минимизировать потерю производительности (2) всей группы на каждом отрезке времени  $T^i$ . На рисунке 5 слева представлен пример допустимого расписания рабочих циклов для группы из четырех АНПА, рассчитанный по критерию (2) с учетом требования по недопущению полной разрядки какого-либо аппарата. Очевидно, что многие рандеву здесь являются избыточными. Их можно исключить, если в процессе принятия решений дополнительно использовать описанный выше критерий жадного поведения.

Таким образом, ставится задача составления таких расписаний, которые в равной степени удовлетворяли бы сразу двум противоречащим критериям. При этом необходимо найти точный баланс между влиянием каждого из них на конечный результат. Как правило, это осуществляется нормированием двух величин относительно друг друга. Экспериментальным путем нами был определен следующий вид конечного критерия эффективности:

$$f(H) = f_G^2(H) \cdot f_A(H) \rightarrow \min. \quad (3)$$

Используя те же входные данные для генерации расписания, что и в примере выше, оптимизация по критерию (3) позволила получить более качественное решение, обеспечивающее почти

двукратное уменьшение частоты групповых сборов при сохранении средней производительности работающей в ходе миссии группировки (см. рисунок 5 справа).

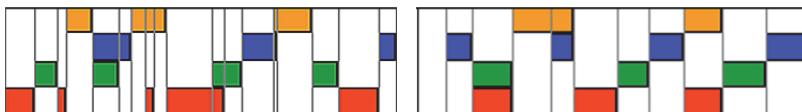


Рис. 5. Примеры рассчитанных расписаний по критериям (2) и (3) (вертикальными линиями отмечены моменты групповых сборов)

В общем случае задача составления расписания является NP-полной, а значит, применение эвристических методов для ее решения представляется наиболее разумным. Несмотря на большое разнообразие представленных в литературе алгоритмов составления расписаний и их модификаций, нацеленных на улучшение тех или иных аспектов задачи, наиболее часто применимыми на протяжении уже многих лет остаются генетические алгоритмы (ГА) ввиду их крайне высокой эффективности, в особенности на задачах большой размерности [22, 23]. Естественный параллелизм ГА позволяет легко реализовывать распределенное решение задачи на нескольких вычислительных узлах, в то время как «any-time» — природа алгоритма гарантирует получение некоторого допустимого решения в любой момент остановки вычислений.

Принимая во внимание вышесказанное, в качестве планировщика миссий на верхнем уровне мы предлагаем использование модификации классического генетического алгоритма (ГА), адаптированной под специфику задачи. При реализации ГА мы используем сжатое векторное представление матрицы-расписания  $H$  в качестве хромосомы (см. рисунок 6). Согласно такому представлению, на  $e$ -мерном векторе отмечаются только моменты смены статуса аппаратами группы, что позволяет значительно понизить размерность задачи и, следовательно, вычислительно-временные затраты на поиск ее решения. При расчете приспособленности хромосом сначала специализированная процедура восстанавливает решение в матричном виде, а уже затем определяет по нему значение целевой функции (3). Используемая процедура восстановления осуществляет не только декодирование решения, но и его локальную оптимизацию, объединяя или переупорядочивая смежные события. Допустимость всех хромосом проверяется в ходе работы алгоритма дополнительной алгоритмической процедурой, определяющей энергетическую потребность каждого аппарата на всех его рабочих циклах.

Мы используем классическую схему ГА, в которой на каждой итерации последовательно выполняются процедуры оценки всех хромосом популяции, отбора хромосом для создания потомства, скрещивания и мутации. При создании новых хромосом используются генетические операторы, которые, согласно [24], демонстрируют наилучшие результаты именно на задачах составления расписаний: двухточечное скрещивание, PPOX-скрещивание, случайная мутация и swar-мутация. Также применяется турнирная процедура отбора, реализованы принципы элитизма и параллельных популяций (островов).



Рис. 6. Одномерное представление группового расписания с рисунка 4

**5. Планировщик маршрутов.** Декомпозиция миссии, осуществляемая на верхнем уровне системы управления, позволяет значительно понизить размерность пространства поиска в задаче маршрутизации, а, следовательно, и необходимый объем вычислительных ресурсов, что является дополнительным преимуществом предлагаемого подхода. Ограниченная длительность каждого рабочего периода группы между двумя последовательными рандеву позволяет нам сформулировать задачу групповой маршрутизации. Входными параметрами задачи маршрутизации на каждом рабочем периоде служат характеристики всех целей миссии и аппаратов группы, обозначенные в постановке задачи (раздел 2), а также актуальная дорожная карта (граф  $G$ ). Начальное состояние каждого объекта миссии наследуется с окончания предыдущего рабочего периода группы, длительность нового рабочего периода составляет  $T_p$ .

Определим маршрут единичного АНПА как вектор-строку вида  $r = \langle V_0, V_1^r, V_2^r, \dots, V_h^r, V_0 \rangle$ , представляющую собой индексированный список целей, предписанных текущему аппарату и расположенных в порядке их запланированного обхода. На каждом рабочем периоде все АНПА начинают движение из точки сбора группы ( $V_0$ ) и возвращаются туда же по завершению выполнения своего маршрута. Необходимо отметить, что каждая цель может входить в маршрут одного робота более чем один раз, а также в маршруты нескольких роботов группы. Итоговый маршрут группы  $R = \{r_1, \dots, r_k\}$ ,  $k \leq m$  представляет собой совокупность маршрутов всех АНПА, действующих на текущем рабочем периоде. Таким образом, задача маршрутизации заключается в поиске такого группового маршрута, который обеспечивал бы:

- минимальный объем опозданий при посещении всех целей миссии, требующих обследования;
- прибытие всех действующих аппаратов в точку сбора в конце рабочего периода;
- благоприятные условия миссии (отсутствие целей с истекшим/истекающим внутренним таймером, что может привести к опозданиям) на момент завершения рабочего периода, которые будут «переданы» на следующий период работы группы.

Для оценки эффективности различных групповых маршрутов с учетом перечисленных требований и ограничений, предлагается использовать схему на основе списка сценариев желательного и нежелательного поведения группы. Список всех возможных сценариев должен быть составлен человеком-оператором предварительно и загружен на бортовые системы АНПА перед началом миссии. Каждый такой сценарий содержит свое значение приоритета относительно других сценариев, описание инициирующих его событий, тип сценария и условия начисления. Согласно предлагаемой схеме, оценка качества решения производится по результатам виртуального «прогона» группы по оцениваемому маршруту с начислением штрафных баллов и баллов поощрения, взвешенных согласно приоритетам соответствующих сценариев. Для рассматриваемой задачи регулярной маршрутизации мы предлагаем список из четырех сценариев, представленный в таблице 1.

Таблица 1. Список сценариев для групповой миссии по мониторингу

Приоритет	Иницирующие события (триггеры)	Тип сценария	Условия начисления
#1	АНПА прибывает к цели для обследования	Штраф	Наличие опозданий
#2	Сбор группы в конце рабочего периода	Штраф	Наличие целей с задержанным обследованием
#3	Сбор группы в конце рабочего периода	Штраф	Долгое прибытие всех АНПА
#4	АНПА прибывает к цели для обследования	Поощрение	Минимальное ожидание обследования

Для нормирования баллов, начисляемых по целям с различной периодичностью, мы применяем подход, предложенный нами в более ранних работах [5, 7] и использующий дополнительную функцию  $a_i(t)$ , определяющую актуальность (степень необходимости) обследования

цели в заданный момент времени. Такая функция актуальности ставится в соответствие каждой цели  $i \in N$  и ведет себя согласно следующим трем правилам: обследование цели любым АНПА обнуляет значение ее актуальности; актуальность цели растет экспоненциально, достигая заданного порогового значения  $\bar{a}$  (единого для всех целей) от нулевого значения за временной период  $p_i$ ; в случае непосещения цели вовремя ее актуальность продолжает экспоненциально расти (см. рисунок 7).

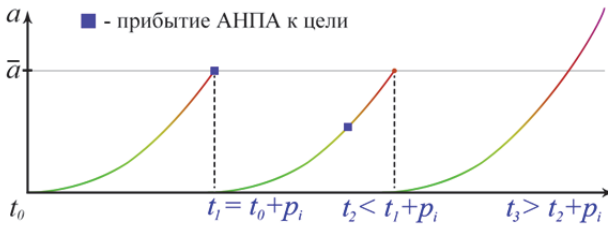


Рис. 7. Графическое представление изменения актуальности цели во времени

Определим функцию штрафа по первому сценарию из представленного выше списка (запоздалое обследование цели):

$$\varphi(i, t) = \begin{cases} a_i(t) - \bar{a}, & a_i(t) > \bar{a} \\ 0, & a_i(t) \leq \bar{a} \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично определим штрафную функцию по второму сценарию (наличие целей с задержанным обследованием на момент завершения группового движения):

$$\phi(i, t_0 + T_p) = a_i(t_0 + T_p), \quad (5)$$

где момент  $t_0$  соответствует началу текущего рабочего периода. Фактически, использование функции (5) позволяет обеспечить генерируемые маршруты сразу несколькими полезными свойствами: во-первых, таким образом группе запрещается пропускать и игнорировать требующие обследования цели; во-вторых, значение функции (5) соответствует уровню благоприятности начальных условий для группы на следующем рабочем периоде; наконец, в-третьих, использование (5) косвенным образом нормирует длительности маршрутов всех роботов группы. Таким образом, нам не требуется вводить отдельную штрафную функцию для третьего сценария, поскольку он уже учитывается в (5).

Функция поощрения по четвертому сценарию определяется следующим образом (параметр  $\varepsilon$  задает ту максимальную длительность простоя, которую мы можем классифицировать как незначительную):

$$\psi(i, t) = \begin{cases} a_i(t) + \varepsilon - \bar{a}, & 0 \leq \bar{a} - a_i(t) \leq \varepsilon \\ 0 & , \bar{a} - a_i(t) \leq 0 \\ 0 & , \bar{a} - a_i(t) \geq \varepsilon \end{cases} . \quad (6)$$

Стоит отметить, что функция актуальности (рисунок 7) построена таким образом, чтобы ее значение для целей с меньшей периодичностью росло быстрее. В этом случае при невозможности своевременного посещения всех целей миссии обследования с опозданием будут приходиться преимущественно на задания с большой периодичностью, представляющие, предположительно, меньший интерес.

Возвращаясь к процедуре планирования, необходимо напомнить, что групповой маршрут на текущем рабочем периоде группы всегда рассчитывается во время предыдущего рабочего периода с учетом ожидаемых изменений в составе действующей группы на ближайшем рандеву. Возникновение каких-либо непредвиденных событий в течение рабочего периода, как правило, ведет к потере актуальности всех заранее рассчитанных решений, однако, они все еще могут выступать в качестве своего рода базы знаний для более интеллектуального перепланирования. Тем не менее при наличии свободных вычислительных ресурсов мы можем частично устранить влияние отдельных непрогнозируемых событий за счет заблаговременной генерации дополнительных резервных планов. Например, параллельно может обсчитываться резервный маршрут для группы меньшего размера на случай потери или выхода из строя одного из роботов. В этом случае целесообразно строить маршрут с прогнозом на отсутствие наиболее быстрого АНПА в группе, так как он сможет заменить любой другой отсутствующий аппарат без потери эффективности. При необходимости для выявления наиболее вероятных изменений, по которым может потребоваться расчет резервных маршрутов, могут быть использованы более продвинутые техники диагностики и ситуационной осведомленности [25].

Планирование на нижнем уровне является гораздо более сложной и трудоемкой задачей, поскольку уже изначально NP-трудный поиск оптимального маршрута для фиксированного флота (*fixed fleet*) транспортных средств здесь осложняется комплексным набором действующих ограничений и, следовательно,

плохой окрестностной структурой задачи, что затрудняет поиск и прогнозирование качественных допустимых решений, поскольку они могут не находиться в окрестности других эффективных или допустимых решений в пространстве поиска. Таким образом, не существует алгоритмов, которые бы решали такую задачу за полиномиальное время, что приводит нас к классу приближенных эвристических алгоритмов, которые позволяют получать близкие к оптимальным решения за приемлемое вычислительное время.

За последние 10 лет эвристические и метаэвристические подходы к решению ЗМТ получили стремительное развитие во многом благодаря появлению гибридных алгоритмов, сочетающих в себе несколько изначально независимых вычислительных процедур. Лучшие метаэвристики применяют сложные стратегии поиска по окрестностям, принципы работы точных методов оптимизации и декомпозиционные схемы. Эвристики также становятся более гибкими и могут применяться к широкому диапазону вариаций ЗМТ без каких-либо структурных изменений. Современные методы реализуют высокоуровневые стратегии управления, базируясь на различных структурах памяти (хромосомы, феромоны, нейроны) и опираясь на блок локального поиска, направляющего работу алгоритма в перспективные области пространства поиска [26].

Эволюционные методы неоднократно доказывали свою эффективность при решении различных вариаций ЗМТ, включая маршрутизацию с временными окнами, комплексную маршрутизацию и ряд других постановок, пересекающихся с рассматриваемой в статье задачей. Основным преимуществом эволюционных алгоритмов (ЭА) является их способность строить решения для постановок со сложным набором ограничений, так как они требуют относительно небольшое количество информации о природе самой задачи. Согласно представленным в литературе аналитическим исследованиям [27, 28], гибридные эволюционные алгоритмы позволяют находить близкие к оптимальным решения с лучшей масштабируемостью и за лучшее время, чем в среднем любые другие эвристические и метаэвристические подходы. Кроме того, эволюционные алгоритмы, хорошо зарекомендовавшие себя при решении различных задач многомерной оптимизации, в последнее время приобрели актуальность в решении задач группового управления мобильными роботами [29]. Эффективность гибридных ЭА обеспечивается сочетанием генетических операторов, учитывающих специфику задачи, с правильно подобранными процедурами локального поиска и аккуратной балансировкой между исследованием пространства поиска (*exploration*) и его разработкой (*exploitation*), что позволяет

избежать преждевременной сходимости алгоритма. Еще одной общей чертой, объединяющей успешные реализации ЭА, является отказ от работы с исключительно допустимыми решениями в пользу процедуры наложения штрафов.

На основании вышеизложенного, для решения задачи групповой маршрутизации предлагается использовать оригинальный гибридный эволюционный подход, включающий в себя специализированные генетические операторы, эвристики локального поиска и набор дополнительных процедур для повышения эффективности работы алгоритма при комплексных пространственно-временных ограничениях и в условиях большой размерности задачи. Блок-схема разработанного алгоритма представлена на рисунке 8, цветом отмечены модифицированные блоки ЭА.

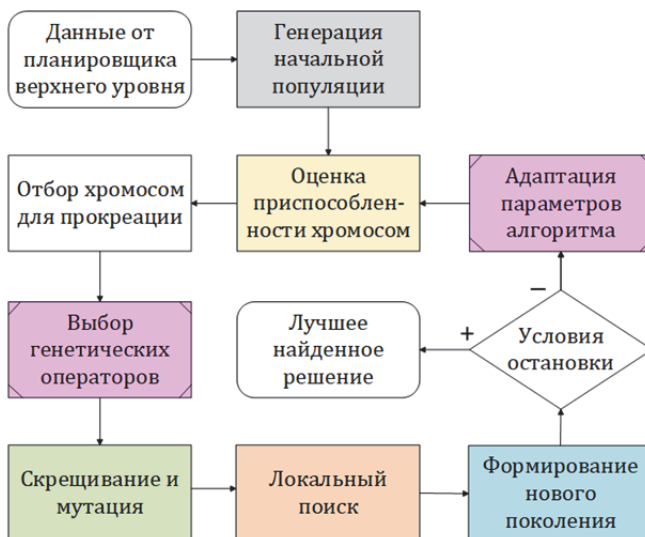


Рис. 8. Блок-схема гибридного эволюционного алгоритма

Групповой маршрут  $R$  выступает здесь в качестве хромосомы, а формулы (4)-(6) обеспечивают оценку приспособленности с учетом приоритетов соответствующих им сценариев. Генерация начальной популяции хромосом является первым и определяющим шагом к быстрому получению допустимых решений приемлемого качества. Цель этого шага — сконструировать качественный начальный набор решений-хромосом, равномерно покрывающий пространство поиска. Это требование достигается одновременным использованием трех различных конструктивных эвристик: простой случайной



вставки (*insertion heuristic*) и двух вариаций жадной эвристики «*time-oriented nearest-neighbor*».

Все полученные решения проходят процедуру оценки, после чего, по результатам ранжирования, производится турнирная селекция решений для воспроизводства потомства. Мы предлагаем использование сразу нескольких специализированных генетических операторов: два скрещивания и многорежимную мутацию. В качестве операторов скрещивания используются модификации двухточечного кроссовера и оператора адаптивной памяти (*adaptive memory*) [30]. В свою очередь, многорежимная мутация состоит из четырех операторов: добавление новой цели в маршрут, удаление цели из маршрута, изменение цели и смена двух целей местами. Полученные решения-потомки подвергаются локальному поиску, где с помощью процедуры спуска с чередующимися окрестностями (*variable neighborhood descent*) [31] производится их направленное улучшение. Механизмы параллельных популяций с миграцией и элитизма применяются на этапе формирования новой популяции, обеспечивая выход из локальных оптимумов, а процедура удаления клонов обеспечивает разнообразие новых популяций.

Для повышения эффективности механизма создания новых популяций в целом, параметры, задающие вероятность применения генетических операторов, корректируются на каждой итерации алгоритма. Эти изменения основываются на оценке текущей способности каждого из операторов привести к улучшению решений, что позволяет осуществлять непрерывную адаптацию алгоритма на всех этапах вычислений. Использование такого механизма самоадаптации позволяет значительно увеличить скорость работы алгоритма в тех случаях, когда одни операторы начинают работать заметно лучше других.

Подробное описание структуры и схемы работы всех описанных эвристик, генетических операторов и других вычислительных процедур может быть найдено в наших предыдущих работах [7, 8], посвященных исключительно задачам групповой маршрутизации на низком уровне, поэтому в рамках данной статьи мы не будем вдаваться в детали.

На рисунке 9 приведен пример группового маршрута, построенного разработанным гибридным эволюционным алгоритмом. На изображенном примере группа из трех АНПА осуществляет регулярный мониторинг семи целей, представленных на рисунке горизонтальными осями, различной периодичности (от 10 до 17 минут). Линиями отмечены перемещения аппаратов между целями, а прямоугольники на осях соответствуют периодам обследования целей аппаратами группы: полностью прозрачные отвечают

своевременному посещению цели, а частично закрашенные — обследованию с опозданием.

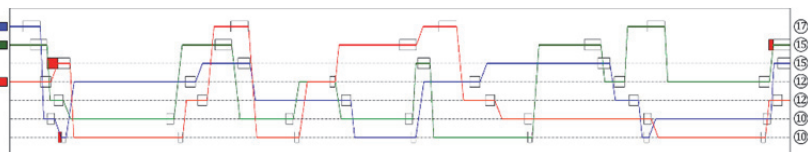


Рис. 9. Построенный групповой маршрут для трех АНПА на семи целях различной периодичности

**6. Реализация.** Описанные планировщики для верхнего и нижнего уровня были программно реализованы на языке C++ в виде системы группового управления предложенной структуры и включены в состав разрабатываемого нами моделирующего комплекса «AUV Multiobjective Mission Planner» (см. рисунок 10) для проведения вычислительных экспериментов. Для построения дорожной карты на основе заданного рельефа был использован алгоритм поиска и оценки длин путей на графе НРА\* (*hierarchical pathfinding A-star*), позволяющий при малых вычислительных затратах получать близкие к оптимальным оценки как для фиксированного множества целей, так и при появлении новых объектов.

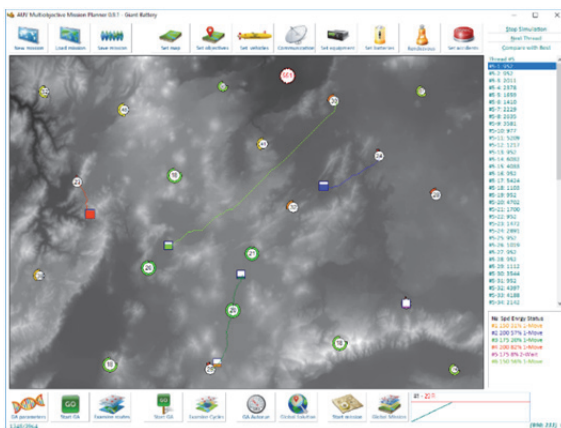


Рис. 10. Снимок главного окна моделирующего комплекса

Поскольку исследуемые задачи планирования являются оригинальными и не имеют прямых аналогов в литературе, судить об эффективности работы разработанных методов мы можем либо в сравнении с найденными для тестовых задач оптимальными

решениями, либо на основании собственных статистических данных, полученных при многократном запуске алгоритмов. Для задачи планирования на верхнем уровне была реализована процедура, основанная на методе ветвей и границ, которая позволяет путем сокращения перебора отсекал подмножества всех возможных решений задачи, которые являются хуже, чем построенное генетическим алгоритмом групповое расписание. Таким образом, для каждого полученного в результате вычислительных экспериментов решения может быть найдена оценка снизу на процент заведомо менее эффективных решений. Результаты тестирования приведены в таблице 2 (для задачи со звездочкой найдено оптимальное решение).

Таблица 2. Эффективность работы верхнеуровневого планировщика

Длина расписания ( $e$ )	Размер группы АНПА ( $k$ )	Оценка снизу на качество решения	
		3 секунды вычислений	30 секунд вычислений
20	3*	100%	100%
	5	99,1%	99,9%
	10	98,8%	99,9%
100	3	98%	99,5%
	5	97,5%	98,35%
	10	97,3%	98,25%
1000	3	96,7%	98,1%
	5	96,2%	97,9%
	10	95,9%	97,5%

Результаты, приведенные в таблице 2, получены при расчетах на одном ядре процессора Intel Core 2 Duo E6750 2,66 ГГц. Отсечка в 30 секунд выбрана экспериментальным путем как время, за которое может быть получено приемлемое допустимое решение, дальнейшее улучшение которого требует уже заметно больших временных затрат.

На рисунке 11 приведен пример рассчитанного расписания ротации для группы из четырех АНПА со следующими параметрами: период планирования  $T_p = 50000$  секунд ( $T_0 = 500$ ), длина расписания  $e = 100$ ; скорости аппаратов  $v^1 = 1.5$  м/с,  $v^2 = 2$  м/с,  $v^3 = 1.75$  м/с и  $v^4 = 1$  м/с; емкости батарей АНПА рассчитаны на 8000 секунд работы; расстояние до единственной зарядной базы 900м; скорость зарядки  $c = 2$ . Выделенные на рисунке цветом отрезки соответствуют периодам выхода аппаратов из группы с целью пополнения заряда батарей, а вертикальными линиями отмечены точки сбора

действующей группировки АНПА с целью обновления состава. На рисунке 12 представлен график изменения заряда батарей всех роботов в группе при работе по расписанию, изображенному на рисунке 11. Черным цветом отмечены те отрезки времени, которые тратятся аппаратами на перемещение до зарядной док-станции и на возвращение обратно в группу.



Рис. 11. Расписание рабочих циклов для группы из четырех АНПА

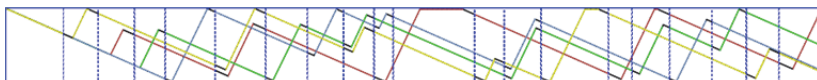


Рис. 12. График уровня заряда батарей АНПА в ходе выполнения миссии

Критерием эффективности предложенного подхода в целом является оценка его влияния на качество конечных групповых маршрутов и скорость их планирования. Для этого мы сравним результаты работы группы на длительном отрезке времени согласно маршрутам, полученным двумя различными способами (см. рисунок 13): первый целиком построен низкоуровневым планировщиком без учета групповых сборов (верхний график); второй состоит из трех последовательных маршрутов меньшей длины с промежуточными сборами группы (нижний график). Графики на рисунке 13 отслеживают изменение максимального значения актуальности среди целей миссии во времени. Горизонтальная линия на каждом графике — пороговое значение  $\bar{a}$ , а вертикальными линиями отмечены точки групповых рандеву. Так как планировщик на нижнем уровне не приспособлен для построения маршрутов, включающих подзарядку, то в данном примере мы не учитываем ограничение на емкость батарей, а ротация группы отсутствует. Рассматриваемый пример содержит 30 целей, которые обследуются группой из пяти АНПА. Период планирования составляет 13000 секунд, что включает 150 запланированных обследований. Рассматривается наихудший случай, когда область сбора задана в виде точки. Выбранный пример относится к категории задач высокой сложности, для которых нами не было найдено решений, обеспечивающих полное выполнение всех целей без опозданий.

Применение только низкоуровневого планировщика позволило за 342 секунды расчетов получить маршрут, обеспечивающий 357 секунд суммарной задержки обследований, в то время как предложенная схема

на основе групповых рандеву обеспечила инспекцию целей с опозданием в 392 секунды при общей длительности расчетов всего в 48 секунд. Как можно видеть на рисунке 13, главной причиной увеличения объема опозданий во втором маршруте является необходимость групповых сборов в области малого размера и в условиях плотного расписания инспекций целей. При этом в масштабах длительности миссии разница в эффективности двух маршрутов (0,26% в данном примере; 0,37% в среднем на всех тестовых примерах) может считаться несущественной, а предложенный подход при значительно меньших вычислительных затратах обеспечивает еще и коммуникационную устойчивость движения.

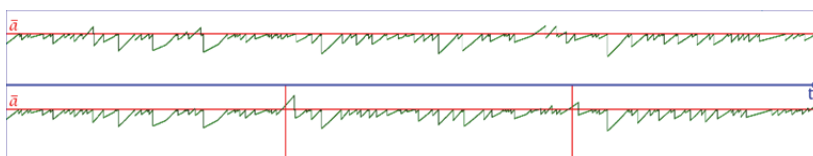


Рис. 13. Сравнение эффективности обследования целей при долгосрочном (наверху) и краткосрочном (внизу) планировании

**7. Заключение.** В статье представлен двухуровневый подход к динамической задаче регулярной маршрутизации АНПА, в рамках которого реализованы алгоритм планирования расписания групповых рандеву, обеспечивающий эффективную декомпозицию миссии, и процедура распределения целей и генерации маршрутов движения действующей группы на каждом рабочем периоде.

Была проведена серия вычислительных экспериментов, в рамках которых моделировалось выполнение заданной многозадачной миссии группой АНПА с непостоянным составом в условиях комплексных требований и пространственно-временных ограничений, вытекающих из регулярного характера задач миссии. Результаты моделирования продемонстрировали высокую эффективность предлагаемого подхода: долгосрочный планировщик на верхнем уровне обеспечивает быструю и надежную динамическую генерацию качественных расписаний группы, в то время как низкоуровневая система маршрутизации осуществляет интеллектуальную процедуру рационального распределения целей и построения детальных маршрутов при строгих ограничениях и большой размерности задачи. Предложенная схема взаимодействия между двумя планировщиками позволяет группе сохранять свою эффективность в постоянно меняющейся среде и при непрерывной ротации группировки.

Дальнейшее развитие исследуемых в статье моделей связано с добавлением в постановку функциональной разнородности

транспортных средств по типам предустановленного бортового исследовательского оборудования. В этом случае каждый аппарат группы будет в состоянии выполнять лишь те задания, техническим требованиям которых он удовлетворяет. При управлении подобной гетерогенной группировкой АНПА верхний уровень системы управления должен будет помимо рассмотренных в данной работе критериев дополнительно обеспечивать доступность любого типа оборудования на каждом рабочем периоде группы.

### Литература

1. *Blidberg D.R.* The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV); A Brief Summary // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2001. vol. 4. pp. 1.
2. *Deng Y., Beaujean P.P.J., An E., Carlson E.* Task allocation and path planning for collaborative AUVs operating through an underwater acoustic network // OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. 2010. pp. 1–9.
3. *Агеев М.Д. и др.* Автономные подводные роботы. Системы и технологии // М.: Наука. 2005. 398 с.
4. *Zadeh S.M., Powers D.M.W., Yazdani A.M.* Development of an Autonomous Reactive Mission Scheduling and Path Planning (ARMSP) Architecture Using Evolutionary Algorithms for AUV Operation in a Sever Ocean Environment // Computing Research Repository. 2016. 22 p.
5. *Kenzin M.Yu., Bychkov I.V., Maksimkin N.N.* A hybrid approach to solve the dynamic patrol routing problem for group of underwater robots // 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2016. pp. 1114–1119.
6. *Zeng Z. et al.* Path planning for rendezvous of multiple AUVs operating in a variable ocean // 2014 IEEE 4th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. 2014. pp. 451–456.
7. *Kenzin M.Yu., Bychkov I.V., Maksimkin N.N.* Hybrid evolutionary approach to multi-objective mission planning for group of underwater robots // International Conference on Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education. 2015. pp. 73–84.
8. *Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N.* Task allocation and path planning for network of autonomous underwater vehicles // International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC). 2018. vol. 10. no. 2. pp. 33–42.
9. *Ozaslan T. et al.* Inspection of penstocks and featureless tunnel-like environments using micro UAVs // Field and Service Robotics. 2015. pp. 123–136.
10. *Christofides N.* The Vehicle Routing Problem // Revue Française d'Automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle: Recherche Opérationnelle. 1976. vol. 10(V1). pp. 55–70.
11. *Chevaleyre Y.* Theoretical Analysis of the multi-agent patrolling problem // Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. 2004. pp. 302–308.
12. *Basilico N., Gatti N., Villa F.* Asynchronous multi-robot patrolling against intrusions in arbitrary topologies // Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2010. pp. 1224–1229.
13. *Fargeas J.L., Hyun B., Kabamba P., Girard A.* Persistent visitation under revisit constraints // 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2013. pp. 952–957.

14. *Stump E., Michael N.* Multi-robot persistent surveillance planning as a Vehicle Routing Problem // 2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, 2011. vol. 1. pp. 569–575.
15. *Maniyam S.G. et al.* Multi-UAV routing for persistent intelligence surveillance & reconnaissance missions // 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2017. pp. 573–580.
16. *Leahy K. et al.* Persistent surveillance for unmanned aerial vehicles subject to charging and temporal logic constraints // *Autonomous Robots*. 2016. vol. 40. no. 8. pp. 1363–1378.
17. *Drucker N., Penn M., Strichman O.* Cyclic Routing of Unmanned Aerial Vehicles // 13th International Conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming (CPAIOR 2016). 2016. vol. 9676. pp. 125–141.
18. *Hartl R.F., Hasle G., Janssens G.K.* Special Issue on Rich Vehicle Routing Problems // *Central European Journal of Operations Research*. 2006. vol. 14. no. 2. pp. 103–104.
19. *Вершинин А.С.* Экспериментальная оценка скорости передачи данных макета гидроакустического модема // *Труды СПИИРАН*. 2016. Вып. 3(46). С. 40–48.
20. *Каляев А.И., Каляев И.А.* Метод децентрализованного управления группой роботов при выполнении потока заданий // *Робототехника и техническая кибернетика*. 2015. Вып. 1(6). С. 26–35.
21. *Sempe F., Munoz A., Drogoul A.* Autonomous Robots Sharing a Charging Station with no Communication: a Case Study // *Distributed Autonomous Robotic Systems*. 2002. vol. 5. pp. 91–100.
22. *Calis B., Bulkan S.* A research survey: review of AI solution strategies of job shop scheduling problem // *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2015. vol. 26. no. 5. pp. 961–973.
23. *Vincent L., Durai C.* A survey on various optimization techniques with respect to flexible job shop scheduling // *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2014. vol. 4. no. 3. pp. 1–7.
24. *Amjad M.K. et al.* Recent Research Trends in Genetic Algorithm Based Flexible Job Shop Scheduling Problems // *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. vol. 2018. pp. 1–32.
25. *Liu C., Coombes M., Li B., Chen W-H.* Enhanced situation awareness for unmanned aerial vehicle operating in terminal areas with circuit flight rules // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2016. vol. 230. no. 9. pp. 1683–1693.
26. *Laporte G., Ropke S., Vidal T.* Chapter 4: Heuristics for the Vehicle Routing Problem // *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. 2014. pp. 87–116.
27. *Braysy O., Gendreau M.* Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms // *Transportation science*. 2005. vol. 39. no. 1. pp. 104–118.
28. *Koc C., Bektas T., Jabali O., Laporte G.* Thirty years of heterogeneous vehicle routing // *European Journal of Operational Research*. 2016. vol. 249. no. 1. pp. 1–21.
29. *Пишхонов В.Х., Медведев М.Ю.* Групповое управление движением мобильных роботов в неопределенной среде с использованием неустойчивых режимов // *Труды СПИИРАН*. 2018. Вып. 5(60). С. 39–63.
30. *Yong M.* Solving vehicle routing problem with time windows with hybrid evolutionary algorithm // 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems (GCIS). 2010. vol. 1. pp. 335–339.
31. *Affi M., Derbel H., Jarboui B.* Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem // *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2018. vol. 9. no. 2. pp. 195–204.

**Бычков Игорь Вячеславович** — д-р техн. наук, профессор, академик РАН, директор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова (ИДСТУ СО РАН). Область научных интересов: искусственный интеллект, геоинформационные системы, системы интеллектуального анализа данных, математическое моделирование. Число научных публикаций — 295. [dstu@icc.ru](mailto:dstu@icc.ru), [www.idstu.irk.ru](http://www.idstu.irk.ru); ул. Лермонтова, 134, а/я 292, Иркутск, 664033, РФ; р.т. +7(3952)42-71-00, факс +7(3952)51-16-16.

**Кензин Максим Юрьевич** — младший научный сотрудник лаборатории информационно-управляющих систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова (ИДСТУ СО РАН). Область научных интересов: методы оптимального управления роботами, групповое управление, задачи маршрутизации транспорта, поиск пути, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 41. [gorthauers@gmail.com](mailto:gorthauers@gmail.com), [www.idstu.irk.ru](http://www.idstu.irk.ru); ул. Лермонтова, 134, а/я 292, Иркутск, 664033, РФ; р.т. +7(3952)45-30-85, факс +7(3952)51-16-16.

**Максимкин Николай Николаевич** — канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории информационно-управляющих систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова (ИДСТУ СО РАН). Область научных интересов: методы исследования сложных систем, групповое управление, искусственный интеллект. Число научных публикаций — 81. [mnn@icc.ru](mailto:mnn@icc.ru), [www.idstu.irk.ru](http://www.idstu.irk.ru); ул. Лермонтова, 134, а/я 292, Иркутск, 664033, РФ; р.т. +7(3952)45-30-05, факс +7(3952)51-16-16.

**Поддержка исследований.** Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 16-11-00053).



I.V. BYCHKOV, M.Yu. KENZIN, N.N. MAKSIMKIN  
**TWO-LEVEL EVOLUTIONARY APPROACH TO PERSISTENT  
SURVEILLANCE FOR MULTIPLE UNDERWATER VEHICLES  
WITH ENERGY CONSTRAINTS**

*Bychkov I.V., Kenzin M.Yu., Maksimkin N.N. Two-Level Evolutionary Approach to Persistent Surveillance for Multiple Underwater Vehicles with Energy Constraints.*

**Abstract.** Currently, the coordinated use of autonomous underwater vehicles groups seems to be the most promising and ambitious technology to provide a solution to the whole range of oceanographic problems. Complex and large-scale underwater operations usually involve long stay activities of robotic groups under the limited vehicle's battery capacity. In this context, available charging station within the operational area is required for long-term mission implementation. In order to ensure a high level of group performance capability, two following problems have to be handled simultaneously and accurately – to allocate all tasks between vehicles in the group and to determine the recharging order over the extended period of time. While doing this, it should be taken into account, that the real world underwater vehicle systems are partially self-contained and could be subjected to any malfunctions and unforeseen events.

The article is devoted to the suggested two-level dynamic mission planner based on the rendezvous point selection scheme. The idea is to divide a mission on a series of time-limited operating periods with the whole group rendezvous at the end of each period. The high-level planner's objective here is to construct the recharging schedule for all vehicles in the group ensuring well-timed energy replenishment while preventing the simultaneous charging of a plentitude of robots. Based on this schedule, mission is decomposed to assign group rendezvous to each regrouping event (robot leaving the group for recharging or joining the group after recharging). This scheme of periodic rendezvous allows group to keep up its status regularly and to re-plan current strategy, if needed, almost on-the-fly. Low-level planner, in return, performs detailed group routing on the graph-like terrain for each operating period under vehicle's technical restrictions and task's spatiotemporal requirements. In this paper, we propose the evolutionary approach to decentralized implementation of both path planners using specialized heuristics, solution improvement techniques, and original chromosome-coding scheme. Both algorithm options for group mission planner are analyzed in the paper; the results of computational experiments are given.

**Keywords:** Autonomous Underwater Vehicles, Group Control, Scheduling Problem, Vehicle Routing Problem, Evolutionary Algorithms.

**Bychkov Igor Vyacheslavovich** — Ph.D., Dr. Sci., Associate Professor, Academician of RAS, Head of Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IDSTU SB RAS). Research interests: artificial intelligence, geographic information systems, intellectual data analysis, mathematical modeling. The number of publications — 295. IDSTU@icc.ru , www.idstu.irk.ru; 134, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia; office phone: +7(3952)42-71-00, fax +7(3952)51-16-16.

**Kenzin Maksim Yurievich** — Junior Researcher of Information and Control Systems Laboratory, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IDSTU SB RAS). Research interests: optimal robot motion planning, group control, vehicle routing problem, pathfinding, artificial intelligence. The number of publications — 41. GORTHAUERS@gmail.com, www.idstu.irk.ru; 134, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia; office phone +7(3952)45-30-85, fax +7(3952)51-16-16.

**Maksimkin Nikolai Nikolayevich** — Ph.D., Leading Researcher of Information and Control Systems Laboratory, Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (IDSTU SB RAS). Research interests: dynamics of complex systems, group control, artificial intelligence. The number of publications — 81. MNN@icc.ru, www.idstu.irk.ru; 134, Lermontov str., Irkutsk, 664033, Russia; office phone +7(3952)45-30-05, fax +7(3952)51-16-16.

**Acknowledgements.** This research is supported by RSF (grant 16-11-00053).

## References

1. Blidberg D.R. The Development of Autonomous Underwater Vehicles (AUV); A Brief Summary. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2001. vol. 4. pp. 1.
2. Deng Y., Beaujean P.P.J., An E., Carlson E. Task allocation and path planning for collaborative AUVs operating through an underwater acoustic network. OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE. 2010. pp. 1–9.
3. Ageev M.D. et al. *Avtonomnie podvodnie roboty. Sistemy i tekhnologii* [Autonomous Underwater Robots: Systems and Technologies]. M.: Nauka. 2005. 398 p. (In Russ.).
4. Zadeh S.M., Powers D.M.W., Yazdani A.M. Development of an Autonomous Reactive Mission Scheduling and Path Planning (ARMSP) Architecture Using Evolutionary Algorithms for AUV Operation in a Sever Ocean Environment. Computing Research Repository. 2016. 22 p.
5. Kenzin M.Yu., Bychkov I.V., Maksimkin N.N. A hybrid approach to solve the dynamic patrol routing problem for group of underwater robots. 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). 2016. pp. 1114–1119.
6. Zeng Z. et al. Path planning for rendezvous of multiple AUVs operating in a variable ocean. 2014 IEEE 4th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. 2014. pp. 451–456.
7. Kenzin M.Yu., Bychkov I.V., Maksimkin N.N. Hybrid evolutionary approach to multi-objective mission planning for group of underwater robots. International Conference on Computational and Information Technologies in Science, Engineering and Education. 2015. pp. 73–84.
8. Kenzin M., Bychkov I., Maksimkin N. Task allocation and path planning for network of autonomous underwater vehicles. *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*. 2018. vol. 10. no. 2. pp. 33–42.
9. Ozaslan T. et al. Inspection of penstocks and featureless tunnel-like environments using micro UAVs. *Field and Service Robotics*. 2015. pp. 123–136.
10. Christofides N. The Vehicle Routing Problem. *Revue Française d'Automatique, Informatique, Recherche Opérationnelle: Recherche Opérationnelle*. 1976. vol. 10(V1). pp. 55–70.
11. Chevalere Y. Theoretical Analysis of the multi-agent patrolling problem. Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology. 2004. pp. 302–308.
12. Basilico N., Gatti N., Villa F. Asynchronous multi-robot patrolling against intrusions in arbitrary topologies. Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2010. pp. 1224–1229.
13. Fargeas J.L., Hyun B., Kabamba P., Girard A. Persistent visitation under revisit constraints. 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2013. pp. 952–957.
14. Stump E., Michael N. Multi-robot persistent surveillance planning as a Vehicle Routing Problem. 2011 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. 2011. vol. 1. pp. 569–575.

15. Manyam S.G. et al. Multi-UAV routing for persistent intelligence surveillance & reconnaissance missions. 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). 2017. pp. 573–580.
16. Leahy K. et al. Persistent surveillance for unmanned aerial vehicles subject to charging and temporal logic constraints. *Autonomous Robots*. 2016. vol. 40. no. 8. pp. 1363–1378.
17. Drucker N., Penn M., Strichman O. Cyclic Routing of Unmanned Aerial Vehicles. 13th International Conference on Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming (CPAIOR 2016). 2016. vol. 9676. pp. 125–141.
18. Hartl R.F., Hasle G., Janssens G.K. Special Issue on Rich Vehicle Routing Problems. *Central European Journal of Operations Research*. 2006. vol. 14. no. 2. pp. 103–104.
19. Vershinin A.S. [Experimental Estimation of the Data Transfer Rate of a Hydroacoustic Modem Model]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2016. vol. 3(46). pp. 40–48. (In Russ.).
20. Kalyaev A.I., Kalyaev I.A. [Method of decentralized control of robot group during execution of task flow]. *Robototekhnika i tehničeskaya kibernetika – Robotics and Technical Cybernetics*. 2015. vol. 1. no. 6. pp. 26–35. (In Russ.).
21. Sempe F., Munoz A., Drogoul A. Autonomous Robots Sharing a Charging Station with no Communication: a Case Study. *Distributed Autonomous Robotic Systems*. 2002. vol. 5. pp. 91–100.
22. Calis B., Bulkan S. A research survey: review of AI solution strategies of job shop scheduling problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2015. vol. 26. no. 5. pp. 961–973.
23. Vincent L., Durai C. A survey on various optimization techniques with respect to flexible job shop scheduling. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2014. vol. 4. no. 3. pp. 1–7.
24. Amjad M.K. et al. Recent Research Trends in Genetic Algorithm Based Flexible Job Shop Scheduling Problems. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. vol. 2018. pp. 1–32.
25. Liu C., Coombes M., Li B., Chen W-H. Enhanced situation awareness for unmanned aerial vehicle operating in terminal areas with circuit flight rules. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2016. vol. 230. no. 9. pp. 1683–1693.
26. Laporte G., Ropke S., Vidal T. Chapter 4: Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. 2014. pp. 87–116.
27. Braysy O., Gendreau M. Vehicle routing problem with time windows, part I: route construction and local search algorithms. *Transportation science*. 2005. vol. 39. no. 1. pp. 104–118.
28. Koc C., Bektas T., Jabali O., Laporte G. Thirty years of heterogeneous vehicle routing. *European Journal of Operational Research*. 2016. vol. 249. no. 1. pp. 1–21.
29. Pshikhopov V.K., Medvedev M.Y. [Group control of autonomous robots motion in uncertain environment via unstable modes]. *Trudy SPIIRAN – SPIIRAS Proceedings*. 2018. vol. 5. no. 60. pp. 39–63. (In Russ.).
30. Yong M. Solving vehicle routing problem with time windows with hybrid evolutionary algorithm. 2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems (GCIS). 2010. vol. 1. pp. 335–339.
31. Affi M., Derbel H., Jarboui B. Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*. 2018. vol. 9. no. 2. pp. 195–204.