

УДК 681.5+004.8

## ОРГАНИЗАЦИЯ МАРШРУТА АНИМАТА НА ОСНОВЕ ВИЗУАЛЬНЫХ ОРИЕНТИРОВ\*

*Карпова И.П., к.т.н, доцент  
НИУ ВШЭ  
karpova\_ip@mail.ru*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В работах [1-2] для задачи фуражировки был предложен механизм запоминания маршрута, которым проходит мобильный робот в поисках целевого объекта. Данная задача разбивается на три этапа: найти искомый объект, вернуться «домой» (в точку отправления) и при необходимости повторить этот путь. В качестве основы было взято поведение муравьев рода *Формика*, у которых фуражировкой занимаются муравьи-разведчики и пассивные фуражиры [3]. В процессе поиска пищи муравей-разведчик запоминает свое положение относительно солнца, визуальные ориентиры, мимо которых он проходит, и примерное расстояние до них. Это позволяет ему вернуться обратно в муравейник и совершать повторные рейсы за пищей по знакомому маршруту [4]. Также он может водить за собой муравьев-фуражиров или передавать им информацию о маршруте, чтобы они могли дойти до этой пищи сами, без сопровождения.

Описанные в работе [2] алгоритмы формирования описания маршрута и правила его интерпретации позволяли роботу решать поставленную задачу, используя для этого визуальные ориентиры. К достоинствам предложенного механизма можно отнести вычислительную простоту, к недостаткам – наличие некоторых ограничений. К таким ограничениям, в первую очередь, относилось использование цвета ориентира как его идентификатора. Это было обусловлено необходимостью однозначно отличать один ориентир от другого. Вследствие этого полигон должен быть оснащен ориентирами разных цветов, а робот должен уметь их все различать, что само по себе является технически достаточно сложной задачей и требует использования высокоточных сенсоров.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-29-04412 офи-м.

Другим ограничением было требование к начальному положению робота: перед повторным прохождением маршрута робот не только должен находиться вблизи начальной точки, но и быть повернут в ту же сторону. В принципе, первое требование достаточно очевидно, но в реальных условиях представляется излишне строгим. Находясь вблизи начальной точки маршрута, робот должен уметь сориентироваться и начать движение в нужную сторону.

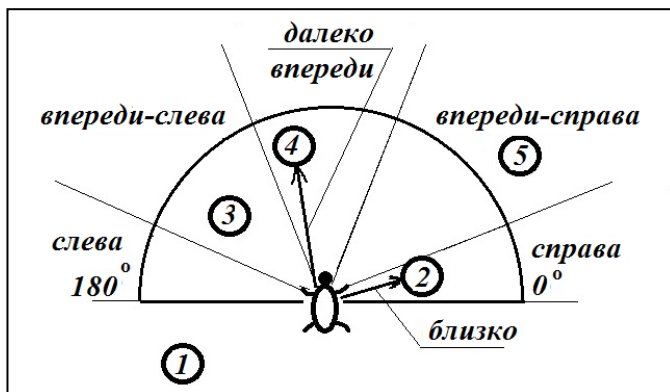
Данное исследование является продолжением работ [1-2] и направлено на смягчение указанных ограничений. Цель – создать такой механизм, который позволит роботу ориентироваться на реальном полигоне в рамках решения задач фуражировки, рекогносцировки и т.д.

Здесь надо дать некоторые пояснения о терминологии. В дальнейшем речь пойдет не о роботах, а об аниматах, т.к. объектом исследования является искусственный автономный агент, действующий в виртуальной или реальной среде и имитирующий поведение живого организма.

## **2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ**

На полигоне, по которому перемещаются аниматы, расположен «дом», неподвижные объекты – ориентиры – и некоторые целевые объекты (например, «пища», которую необходимо перенести в «дом»). Изначально аниматы находятся около «дома», который они умеют отличать от всех других объектов, например, по цвету и размеру или форме. Путь – это последовательность перемещений, приводящая анимата от одного целевого объекта к другому, при этом в качестве целевых объектов могут выступать «дом» или «пища». Находясь около «дома», анимат может отправиться на поиски «пищи», а найдя «пищу», вернется «домой».

Действия, которые может совершать анимат: двигаться вперед и назад, поворачивать направо и налево, останавливаться. Спереди он оснащен датчиками препятствий, при срабатывании которых запускается «условный рефлекс» (процедура обхода препятствий). Также у него есть локатор, с помощью которого он «видит» окружающие объекты (внутри области видимости в 180°), распознает их цвет и умеет определять расстояние до них (приблизительно) и направление (относительно себя) (рис. 1). В связи с этим естественно напрашивается подход, основанный на нечетком управлении.



**Рис. 1. Область видимости анимата, направление и расстояние**

Для работы с нечетким понятием «расстояние» были введены соответствующие лингвистические переменные, шкала пересчета расстояний для радиуса видимости 20 клеток приведена в Табл. 1.

**Таблица 1. Шкала расстояний**

<i>Расстояние (в клетках)</i>	<i>Лингвистическая переменная</i>	<i>Обозначение</i>
0-2	Очень близко	NEAR
3-5	Близко	CLOSE
6-10	Недалеко	NOTCLOSE
10-15	Далеко	FAR
15-20	Очень далеко	VERYFAR

Для работы с нечетким понятием «направление» использовались соответствующие лингвистические переменные, шкала пересчета направлений для области видимости в 180° приведена в Табл. 2.

**Таблица 2. Шкала направлений**

<i>Значение в градусах</i>	<i>Лингвистическая переменная</i>	<i>Обозначение</i>
0 – 22	Справа	D_R
23 – 67	Впереди справа	D_FR
68 – 122	Впереди	D_F
123 – 167	Впереди слева	D_FL
168 – 180	Слева	D_L

Под *ориентиром* будем понимать один или несколько объектов, образующих компактную группу, т.е. расположенных близко друг к другу. Ориентир  $Q$  образуется объектами  $\{x_n\}$ , для которых:

$$Q = \{x_n\}: \exists i, j: |p_{x_i} - p_{x_j}| \leq \Delta, i, j \in [1, n], i \neq j, \quad (1)$$

где  $p_{x_i}$  и  $p_{x_j}$  – ближайшие друг к другу точки объектов  $x_i$  и  $x_j$ , а  $\Delta$  – верхняя граница значения лингвистической переменной «близко».

### 3. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Ранее предложенный механизм формирования описания пути (запоминания пройденного маршрута) основывался на том, что муравей-разведчик запоминает путь приблизительно, и муравей-фуражир повторяет этот путь в общих чертах [3]. Поэтому при формировании описания маршрута запоминался не каждый шаг анимата, а моменты изменения обстановки: появление новых ориентиров, изменение направления на ориентиры и т.д. Таким образом, в модель вводится понятие времени, привязанное не столько к тактам (шагам анимата), сколько к изменению его состояния относительно окружающей среды.

При сохранении общего принципа, работа с ориентирами, состоящими из произвольного количества объектов, потребовала существенного изменения алгоритмов формирования описания пути и упаковки этого описания. Также были разработаны структура описания ориентира, механизм сравнения (распознавания) ориентиров и сцен, алгоритм прохождения по маршруту.

В работе [2] описание объекта как точки маршрута выглядело как  $p(n_k, Dir_k, C)$ , где  $n_k$  – номер шага, на котором объект цвета  $C$  ушел из поля зрения, находясь по направлению  $Dir_k$ . Весь маршрут описывался множеством

$$P = \{p_j(n_{kj}, Dir_{kj}, C_j), j = 1, \dots, L\}$$

где  $L$  – длина маршрута.

Для описания ориентира, состоящего из нескольких объектов, недостаточно пары (направление, цвет), он имеет более сложную структуру. В общем случае, распознавание объектов обычно подразумевает учет многих параметров, например: форма, цвет и узор (текстура), а также ряд пространственных атрибутов, таких как отношение линейных размеров и положение в пространстве [5]. В данном случае будут учитываться следующие пространственные атрибуты:

- линейные размеры объектов;
- близость объектов в соответствии с (1);
- положение объектов относительно друг друга (слева / справа).

Отношения «слева» и «справа» зависят от выбранного ракурса и могут меняться во время движения. В связи с этим предлагается использовать подход на основе одной из разновидностей псевдофизической логики (ПФЛ) – пространственной логики. Она включает, в частности, нечеткие бинарные пространственные отношения для направлений и отношения для взаимного расположения объектов [6]. Примером применения ПФЛ для построения динамической модели окружающего мира служит работа [7], в которой начало системы координат связано с роботом и введен набор правил определения отношений между объектами окружающей среды и роботом.

Аналогичным образом введем правила, прогнозирующие на основе логического вывода изменение положения объектов при выполнении аниматором элементарных действий (поворотов направо / налево и шагов вперед / назад). В Табл. 3 приведена матрица переходов, которая определяет возможные изменения направления на ориентир в зависимости от действий аниматора. Например, если ориентир был впереди, а аниматор поворачивает налево, то ориентир переместится в положение справа-впереди или останется впереди. Обозначение D\_NOT означает уход ориентира из поля зрения.

**Таблица 3. Матрица переходов**

	Налево	Вперед	Назад	Направо	Стоп
Слева	D_FL	D_NOT	D_FL	D_NOT	D_L
Слева-впереди	D_F	D_L	D_F	D_L	D_FL
Впереди	D_FR	D_FL	D_F	D_FL	D_F
Справа-впереди	D_R	D_R	D_F	D_F	D_FR
Справа	D_NOT	D_NOT	D_FR	D_FR	D_R

Пусть объект X описывается следующим набором:

$$X = \{C, accur, (ldir, ldist), (rdir, rdist)\},$$

где C – цвет объекта, accur – точность распознавания цвета, и пары (направление, расстояние), указывающие, соответственно, на левую и правую границу объекта. Ориентир  $Q = \{X_i\}$  является компактной группой объектов (1), цвета входящих в ориентир объектов могут повторяться, а расстояние и направление на объекты позволит учитывать их размер и взаимное положение для более точного сопоставления.

Для использования визуальных ориентиров в качестве своеобразных «маяков» при прохождении маршрута аниматору необходимо уметь их идентифицировать (однозначно отличать друг от друга). Наличие ориентиров с одинаковым набором цветов делает

невозможным использование цвета для их идентификации и вообще существенно усложняет задачу идентификации ориентиров [8]. Поэтому необходимо решать более общую задачу по распознаванию сцены. Сцена образуется набором видимых объектов и отношений между ними. Идентификацию будем рассматривать не как задачу присвоения имен объектам (ориентирам), а как соотнесение наблюдаемых ориентиров с ориентирами, определенными на предыдущем ракурсе наблюдения [9]. При этом возникает ряд проблем с распознаванием как сцен, так и ориентиров. Например, могут быть видны не все объекты, входящие в ориентир, при изменении ракурса одни объекты могут перекрывать другие и т.д.

Сопоставление сцен происходит как во время случайного блуждания при поиске «пищи», так и при повторном прохождении по маршруту. В первом случае анимат запоминает маршрут и должен сопоставлять предыдущую запомненную сцену с тем, что он «видит» в данный момент. Если новая сцена отличается от предыдущей, то она добавляется в описание маршрута. Во втором случае анимат должен сопоставить видимую сцену со сценами из описания маршрута.

При прохождении маршрута для сопоставления видимой сцены ( $S^v$ ) и сцены  $S_i$ , взятой из описания маршрута, ( $i$  – номер сцены в описании) была реализована следующая последовательность действий:

1.  $S^v$  и  $S_i$  сравниваются как сцены, т.е. наборы ориентиров с учетом отношений между ними (Табл. 3). Если сцены  $S^v$  и  $S_i$  совпадают, то запускается алгоритм выбора опорного ориентира из  $S_i$ , относительно которого анимат будет производить следующее действие (выполнять автомат).
  2. Если сцены  $S^v$  и  $S_i$  не удалось сопоставить, то переходим на уровень ориентиров. Если есть единственный однозначно сопоставленный ориентир, то он выбирается в качестве опорного. Если таких ориентиров несколько, то выбирается тот, который был опорным на предыдущем шаге, или тот, точность сопоставления которого выше.
  3. Если нет однозначно сопоставленных ориентиров, то переходим на уровень объектов. Если есть сопоставленный объект, и другого объекта данного цвета в  $S^v$  ( $S_i$ ) не существует, то выбираем в качестве опорного тот ориентир, в который входит этот объект.
  4. Если такого объекта нет, то выбираем в качестве опорного ориентир, точность сопоставления которого выше.
  5. Если сопоставления ориентиров/объектов не произошло, анимат в свободном поиске ищет ориентир, входящий в текущую сцену.
- Теперь определим методы сопоставления сцен, ориентиров и объектов.

Пусть даны объекты  $X=\{c^x, a^x, d^x, s^x\}$  и  $Y=\{c^y, a^y, d^y, s^y\}$ , где  $c$  – цвет,  $a$  – точность распознавания цвета,  $d$  – направление (ЛП),  $s$  – размер объекта. Тогда объект  $X$  сопоставлен объекту  $Y$ , если выполняется правило:

$$X = Y: c^x = c^y \wedge \frac{\min(s^x, s^y)}{\max(s^x, s^y)} \leq \varepsilon_{size}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{size}$  – допустимая разница в размерах объектов; является настраиваемым параметром, в экспериментах принималась равной 0.8.

Формирование ориентира происходит в соответствии с данными локатора, который сканирует область видимости анимата слева направо, поэтому все объекты ориентира также упорядочены слева направо. Аналогичным образом, сцена образуется множеством ориентиров, также упорядоченных слева направо. Опираясь на это, данные, описывающие ориентиры и сцены, можно представить как списки, и использовать для сравнения метод, изложенный в [10].

Сравнение списков  $A$  и  $B$  базируется на сравнении множеств и процедуре сортировки, которая заключается в приведении одного списка к другому путем попарных перестановок его элементов [11]. Один из списков (например,  $A$ ) выбирается в качестве эталонного; предполагается, что нумерация его элементов такова, что он образует полностью упорядоченную подстановку. Степень сходства списков  $\delta^L$  можно рассчитать как

$$\delta^L = 1 - \frac{K_i}{K_n}, \quad (3)$$

где  $K_i$  – количество инверсий списка  $B$ ,  $K_n$  – максимальное количество инверсий списка длиной  $n$ :  $K_n = n(n-1)/2$ .

Если списки включают разные элементы, то для них невозможно определить отношение порядка. Тогда списки сначала сравниваются, как множества, определяется степень сходства  $\delta^S$ :

$$\delta^S = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

Затем элементы  $b_i$ , которые не входят в  $A$ , заменяются элементом  $\lambda$ , равным любому другому элементу. Для полученного списка  $B'$  рассчитывается  $\delta^L$  (3). Окончательно степень сходства списков определяется как

$$\delta = \min(\delta^S, \delta^L). \quad (4)$$

Пусть даны ориентиры  $Q=\{X_n\}$  и  $P=\{Y_m\}$ .  $Clr(c^x_n)$  и  $Clr(c^y_m)$  – списки цветов объектов, входящих в соответствующие ориентиры.  $Dist(c^x_n)$  и  $Dist(c^y_m)$  – списки направлений на объекты. Для этих ориентиров рассчитываются два значения  $\delta_1 + \delta_2$ :

$$\delta_1 = \sigma \left( Clr(c^x_n), Clr(c^y_m) \right), \delta_2 = \varphi \left( Dist(c^x_n), Dist(c^y_m), A \right), \quad (5)$$

где  $\sigma(\text{Clr}(c_n^x), \text{Clr}(c_m^y))$  – степень сходства списков цветов (4),  $\varphi(\text{Dist}(c_n^x), \text{Dist}(c_m^y), A)$  – степень сходства списков направлений (4) с учетом действия  $A$  и правил ПФЛ (табл. 3). Тогда ориентир считается однозначно сопоставленным, если выполняется правило:

$$Q = P: \delta_1 = 1 \wedge \delta_2 = 1. \quad (6)$$

Если  $0 < \delta_1 < 1$  и  $0 < \delta_2 < 1$ , то точность сопоставления ориентира:

$$\varepsilon = \delta_1 + \delta_2 - \delta_1 \delta_2. \quad (7)$$

Будем считать, что сцены  $S_j = \{Q^l_k\}$  и  $S_2 = \{P^2_j\}$  совпадают, если выполняется правило:

$$S_1 = S_2: k = j \wedge \forall i: Q^1_i = P^2_i, i = \overline{1, k}. \quad (8)$$

При сопоставлении сцен на основе точности сопоставления ориентиров  $\varepsilon$  также рассчитывается точность сопоставления сцены в целом (7). В начале пути анимат, естественно, считает первую сцену маршрута текущей. На каждом шаге он сравнивает видимую сцену  $S^v$  с текущей сценой из описания маршрута ( $S_i$ ) и следующей за ней ( $S_{i+1}$ ). Следующая сцена становится текущей при соблюдении двух условий: точность сопоставления  $S_{i+1}$  выше, чем точность сопоставления  $S_i$ , и точность сопоставления опорного ориентира с ориентиром в  $S_{i+1}$  выше, чем точность сопоставления опорного ориентира с ориентиром в  $S_i$ .

Остается определить правила интерпретации описания маршрута, которые обеспечат переход от описания маршрута к действиям по его повторению. Считается, что любое достаточно сложное поведение слагается из совокупности простых поведенческих актов [12]. Поэтому сложное поведение «пройти заданным маршрутом» было разбито на ряд более простых поведенческих процедур: «обойти ориентир X слева», «обойти ориентир X справа», «двигаться к объекту X» и «обойти вокруг, поворачивая налево / направо», «условный рефлекс» (обход препятствия). В качестве универсального средства для реализации этих процедур были использованы конечные автоматы Мили.

Правила выбора действия относительно видимых ориентиров определяются тем направлением, на котором ориентир находился перед тем, как пропал из поля зрения анимата (Табл. 4). По сравнению с предыдущей работой [2] они были существенно изменены в соответствии с новым определением ориентира. Ориентир представляет собой группу объектов, поэтому разные объекты, входящие в один ориентир, могут быть на разных направлениях от анимата. Таким образом, например, направление «ориентир X справа» означает, что из всех объектов этого ориентира последний видимый объект находился справа, и именно этот объект анимат должен обходить слева.



**Таблица 4. Правила выбора действий в зависимости от направления на ориентир или цель**

<i>Направление на ориентир X</i>	<i>Действие</i>
Справа, впереди-справа	Обойти крайний левый объект ориентира X слева
Слева, впереди-слева	Обойти крайний правый объект ориентира X справа
Отсутствие ориентира	Обойти вокруг, поворачивая налево или направо (случайный выбор)

В качестве ориентира, для которого в маршруте может быть определено направление впереди, могут выступать только целевые объекты («дом» и «пища»), и тогда анимат должен двигаться к цели (автомат «Двигаться к объекту X»).

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Были проведены серии экспериментов по имитационному моделированию на упрощенной задаче фуражировки: не рассматривался этап возвращения разведчика в «дом» и процесс передачи фуражиру сведений о маршруте. Эксперимент заключался в том, что сначала анимат-разведчик перемещался по полигону случайным образом с целью найти объект заданного цвета («пищу»), не имея заранее данных о его местоположении. После нахождения объекта сформированный маршрут передавался фуражиру, который повторял его маршрут. Моделирование проводилось с использованием системы многоагентного моделирования Kvoqum, созданной в НИЦ «Курчатовский институт» [13].

Аниматы перемещались по полигону – области 100×100 клеток, время моделирования составляло 1500 тактов для каждого эксперимента. Любой маршрут начинался от «дома» (заштрихованный круг на рис. 2), начальная ориентация аниматов – произвольная. Из любой точки полигона был «виден» хотя бы один ориентир. На рис. 2 путь разведчика отмечен сплошной линией, путь фуражира – пунктирной.

Статистика по экспериментам приведена в табл. 5. В зависимости от количества тактов моделирования, которые потребовались для прохождения маршрута, данные были разделены на три примерно равные части: короткие (до 160 тактов), средние (от 160 до 210 тактов) и длинные (более 210 тактов). Параметр  $E$  – количество более коротких путей, которые удалось выполнить фуражиру.

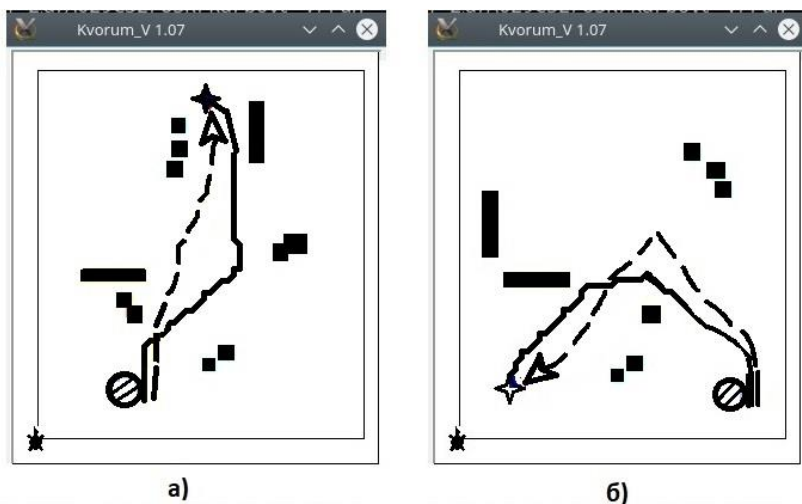


Рис. 2. Примеры маршрутов

Таблица 5. Результаты моделирования

Маршруты	Среднее количество тактов для разведчика	Среднее количество тактов для фуражира	Среднее увеличение количества тактов	Кол-во неудач, %	Е, %
Короткие	157	178	1,1	3,3	41
Средние	183	414	1,4	5,7	40
Длинные	260	471	1,8	8,6	5

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты экспериментов показали, что примерно в 40% случаев фуражир тратит на дорогу меньше тактов, чем разведчик (за исключением длинных маршрутов). Но в среднем наблюдалось серьезное увеличение количества тактов, которые понадобились фуражиру для повторения пути на средних и длинных маршрутах. Это объясняется необходимостью усиления условия перехода к следующей сцене, которое обеспечило устойчивое прохождение маршрута. Тем не менее, результаты экспериментов показали применимость и достаточную эффективность данного метода.

В дальнейшем планируется перенести этот механизм на группу реальных роботов в рамках решения задач фуражировки, патрулирования территории и рекогносцировки.

## Литература

1. Карпова И.П. К вопросу о представлении маршрута для робота в задаче фуражирования. // XV-я национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2016), 3-7 октября 2016, Смоленск. В 3-х тт. – Т.1. – Смоленск: Универсум. – 2016. – с.169-178.
2. Карпова И.П. К вопросу о представлении маршрута мобильного робота на основе визуальных ориентиров. // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2017. – Вып. 18, № 2. – с. 81-89.
3. Длусский Г.М. Муравьи рода *Formica*. М.: Наука, 1967. – 233 с.
4. Захаров А.А. и др. Мониторинг муравьев *Formica*. М.: КМК, 2013. – 99 с.
5. Московский А.Д. Об одном методе распознавания объектов с не полностью определенными признаками. // Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2016), 22-23 сентября 2016, г.Иннополис, Республика Татарстан. – Москва: Издательство «Перо». – 2016. – с. 137-146.
6. Калущая А.П., Тарасов В.Б. Моделирование взаимодействия робота с внешней средой на основе пространственных логик и распространения ограничений // Программные продукты и системы.– 2010, №2.– с.111–115.
7. Карпов В.Э. Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике. // XIII-я национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012 (16-20 октября 2012 г., Белгород): Труды конференции в 3-х тт. – 2012. – Т.3. – с.275-283.
8. Московский А.Д. Система навигации автономного мобильного робота на основе метода реконструкции сцен. // II-й Всероссийский научно-практический семинар “Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта” (БТС-ИИ-2015), 2015.– с.66-73.
9. Карпов В.Э. Об одном механизме реконструкции схем. // VI-я Международная научно-практическая конференция “Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте”. Сб. науч. трудов в 2-х тт.– Т.1. – М.: Физматлит, 2011. – с.407-415.
10. Карпов В.Э., Карпова И.П. Язык описания системы контроля знаний. // Компьютеры в учебном процессе. – 2000.– № 4. – с. 147–155.
11. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. В 3-х тт. – Т.3: “Сортировка и поиск.” – М.: Мир, 1978. – 848 с.
12. Цетлин М.Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Наука, 1969. – 316 с.
13. Карпов В.Э., Ровбо М.А., Овсянникова Е.Е. Система моделирования поведения групп робототехнических агентов с элементами социальной организации Кворум. // Программные продукты и системы. – 2018. – Вып. 31, №3. – с.581-590.