

5. Курейчик В.В., Курейчик В.М., Родзин С.И. Теория эволюционных вычислений. – М.: Физматлит, 2013.
6. Берёза А.Н., Стороженко А.С. Комбинированный многопопуляционный муравьиный генетический алгоритм // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 9 (86). – С. 24-31.
7. Гладков Л.А., Болоцкова И.А. Эволюционный подход к решению графовых задач // Известия ТРТУ. – 2002. – № 1 (24). – С. 84.
8. Нужнов Е.В., Барлит А.В. Трехмерная упаковка несвязных элементов на основе эвристических процедур. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2002. – 23 с.
9. Курейчик В.В., Потарусов Р.В., Гонкалвес Ж. Бионические методы упаковки блоков. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Гладков Леонид Анатольевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: leo@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371625; кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Гладкова Надежда Викторовна** – тел.: 88634393260; кафедра ДМ и МО; старший преподаватель.

**Скубриева Елена Сергеевна** – e-mail: skubrieva\_elena@inbox.ru; тел.: 88634371625; кафедра систем автоматизированного проектирования; аспирант.

**Gladkov Leonid Anatol'evich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: leo@tsure.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371625; the department of computer aided design; associate professor.

**Gladkova Nadezhda Viktorovna** – phone: +78634393260; DM&MO department; senior teacher.

**Skubrieva Elena Sergeevna** – phone: +78634371625; the department of computer aided design; postgraduate student.

УДК 681.325

**В.Б. Лебедев, О.Б. Лебедев**

### **РОЕВОЙ ИНТЕЛЛЕКТ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРАЦИИ МОДЕЛЕЙ АДАПТИВНОГО ПОВЕДЕНИЯ МУРАВЬИНОЙ И ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИЙ\***

*Предлагается парадигма роевого алгоритма на основе интеграции моделей адаптивного поведения муравьиной и пчелиной колоний, заключающейся в создании гибридного агента-пчеломурья поочередно выполняющего функции муравьев и пчел. При этом решение попеременно отражается либо на графе поиска решений, либо в виде позиции в пространстве поиска решений. Предложенный в работе класс гибридных алгоритмов может быть использован для решения широкого круга комбинаторных задач. Заложенные в каждой модели метаэвристики при их интеграции усиливают возможности и эффективность алгоритмов. Экспериментальные исследования показали, что алгоритмы на основе предлагаемого подхода могут давать лучшие результаты, чем при использовании методов пчелиной и муравьиной колоний по отдельности. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность предложенной парадигмы.*

*Роевой интеллект; муравьиная колония; пчелиная колония; адаптивное поведение; самоорганизация; интеграция; оптимизация.*

---

\* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты: № 12-01-00100, № 13-01-00596).

V.B. Lebedev, O.B. Lebedev

## SWARM INTELLIGENCE ON THE BASIS OF THE ADAPTIVE BEHAVIOUR MODELS INTEGRATION OF THE ANT AND BEER COLONIES

*The paradigm of swarm intelligence on the basis of integration of models of adaptive behaviour of the ant and beer colonies, consisting in creation of the hybrid agent – “antbee”, which serially carrying out functions of is offered. Thus the decision is alternately reflected or in the graph of decisions search, or in the position of decisions search spacem The class of hybrid algorithms offered in work can be used for the decision of a wide range of combinatory problems. Put in pawn in each model of metaheuristics at their integration strengthen possibilities and efficiency of algorithms. Experimental researches have shown, that algorithms on the basis of the offered approach can yield the best results, than at use of methods of beer and ant colonies separately. Experimental researches pre spent confirmed efficiency of the offered*

*Swarm intelligence; an ant colony; a beer colony; adaptive behavior; self-organizing; integration; optimization.*

**Введение.** Архитектуры и принципы функционирования биологических систем управления, обеспечивающие способность животных приспосабливаться, адаптироваться к постоянно меняющимся условиям внешней среды являются предметом активных исследований в ведущих научных центрах. Среди них особенно активно развиваются методы роевого интеллекта (Swarm Intelligence) [1–4], в которых совокупность сравнительно простых агентов конструирует стратегию своего поведения без наличия глобального управления. Идея муравьиного алгоритма – моделирование поведения муравьёв, связанного с их способностью быстро находить кратчайший путь от муравейника к источнику пищи [1]. При своём движении муравей метит путь феромоном, и эта информация используется другими муравьями для выбора пути. В основе муравьиного алгоритма лежит моделирование передвижения муравьёв по графу решений [2]. Пройденный муравьем путь отображается, когда муравей посетит все узлы графа. Процесс поиска решений муравьиным алгоритмом итерационный.

Основные механизмы поведения пчел заключаются в следующем [3]. Сначала из улья вылетают в случайном направлении какое-то количество пчел-разведчиков, которые отыскивают источники, где есть нектар. После этого на найденные источники отправляются другие пчелы, причем, чем больше на некотором источнике предполагается найти нектара, тем больше пчел летит в этом направлении, а разведчики опять улетают искать другие источники, после чего процесс повторяется. В работе, в соответствии математическими моделями поведения пчёл и муравьёв [1–3], предложены модификации и методология представления комбинаторных задач в виде роевых алгоритмов.

Для усиления достоинств и ослабления недостатков рассмотренных методов предлагается парадигма роевого алгоритма на основе интеграции моделей адаптивного поведения муравьиной и пчелиной колоний, заключающаяся в создании гибридного агента – пчеломуравья поочередно выполняющего функции муравьёв и пчел. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие эффективность предложенного подхода

**Представление задач в алгоритмах на основе муравьиной колонии.** Метод муравьиных колоний может быть применен к любой комбинаторной задаче, которая может быть согласована со следующими требованиями [2, 5–8].

Соответствующее представление задачи: пространство решений должно быть представлено в виде графа с набором вершин и ребер между вершинами; должно быть установлено соответствие между решением комбинаторной задачи и маршрутом в графе. Необходима разработка правил (методов):

- ◆ начального размещения муравьев в вершинах графа;
- ◆ построения допустимых альтернативных решений (маршрута в графе);
- ◆ правило, которое определяет вероятность передвижения муравья из одной вершины графа к другой;
- ◆ правило обновления феромонов на ребрах (вершинах) графа;
- ◆ правило испарения феромонов.

Поиск решения задачи осуществляется коллективом муравьев  $Z=\{z_k/k=1,2,\dots,l\}$ . На каждой итерации муравьиного алгоритма каждый муравей  $z_k$  строит свое конкретное решение задачи [5–8].

Решением является маршрут в графе  $G=(X,U)$ , построенный в соответствии с условиями и ограничениями. На начальном этапе на всех ребрах графа  $G$  откладывается одинаковое (небольшое) количество феромона  $Q/v$ , где  $v=|U|$ . Параметр  $Q$  задается априори.

Процесс поиска решений итерационный. Каждая итерация  $l$  включает три этапа. На первом этапе каждый муравей находит решение – собственный маршрут  $D_k$ . На втором этапе откладывает феромон. На третьем этапе осуществляется испарения феромона. В работе используется циклический (ant-cycle) метод муравьиных систем. В этом случае феромон откладывается агентами на ребрах после того, как все они сформируют решения.

Процесс построения маршрута  $D_k$  пошаговый. На каждом шаге  $t$  агент применяет вероятностное правило выбора следующей вершины для включения ее формируемый маршрут  $D_k(t)$ . Для этого формируется множество  $X_k(t) \in X$  вершин графа  $G$ , таких, что каждая из вершин  $x_i \in X_k(t)$  может быть добавлена в формируемый маршрут  $D_k(t)$  с соблюдением условий и ограничений. Пусть  $e_k(t)$  - последняя вершина маршрута  $D_k(t)$ . Агент просматривает все вершины  $x_i \in X_k(t)$ . Для каждой вершины  $x_i \in X_k(t)$  рассчитывается параметр  $f_{ik}$  – суммарный уровень феромона на ребре графа  $G$ , связывающего  $x_i$  с вершиной  $e_k(t)$ .

Вероятность  $P_{ik}$  включения вершины  $x_i \in X_k(t)$  в формируемый маршрут  $D_k(t)$  определяется следующим соотношением:

$$P_{ik}=f_{ik}/\sum_i f_{ik} \cdot \quad (1)$$

На втором этапе итерации, каждый муравей откладывает феромон на ребрах построенного маршрута. Количество феромона  $\Delta\tau_k(l)$ , откладываемое муравьем  $z_k$  на каждом ребре построенного маршрута  $D_k$ , определяется следующим образом:

$$\Delta\tau_k(l)=Q/F_k(l), \quad (2)$$

где  $l$  – номер итерации,  $Q_i$  – общее количество феромона, откладываемое муравьем на ребрах маршрута  $D_k$ ,  $F_k(l)$  – целевая функция для решения, полученного муравьем  $z_k$  на  $l$ -й итерации. На третьем этапе происходит общее испарение феромона на ребрах графа  $G$  в соответствии с формулой:

$$f_{ik}=f_{ik}(1-\rho), \quad (3)$$

где  $\rho$  – коэффициент обновления. После выполнения всех действий на итерации находится агент с лучшим решением, которое запоминается. Далее осуществляется переход на следующую итерацию.

**Представление задач в алгоритмах на основе пчелиной колонии.** Основная идея парадигмы пчелиной колонии заключается в использовании двухуровневой стратегии поиска. На первом уровне с помощью пчел разведчиков формируется множество перспективных позиций (источников), на втором уровне с помощью пчел фуражиров осуществляется исследования окрестностей данных источников. Цель пчелиной колонии найти источник, содержащий максимальное количество нектара.

В алгоритмах рассматриваемых задач [9, 10] каждое решение представляется в виде точки (позиции) в пространстве поиска. Найденное количество нектара представляет собой значение целевой функции в этой точке.

Разработка поведенческой модели самоорганизации колонии пчёл, заключается в разработке методов и механизмов:

- ◆ формирования пространства поиска;
- ◆ формирования количественного состава роя агентов разведчиков и роя агентов фуражиров;
- ◆ поиска агентами разведчиками перспективных позиций;
- ◆ выбора базовых позиций среди перспективных для исследования их окрестностей;
- ◆ выбора агентами фуражирами базовых позиций;
- ◆ формирования окрестностей базовых позиций;
- ◆ выбора агентами фуражирами позиций в окрестностях базовых позиций;
- ◆ общей структуры оптимизационного процесса.

Первая задача при разработке алгоритма на основе парадигмы пчелиной колонии заключается в формировании пространства поиска.

Ключевой операцией пчелиного алгоритма является исследование перспективных позиций и их окрестностей в пространстве поиска. Смысл, изначально вкладываемый в понятие окрестности, заключается в том, что решения, лежащие в окрестности некоторой позиции, обладают высокой степенью подобия и, как правило, незначительно отличаются друг от друга. В начале процесса поиска все агенты расположены вне пространства поиска.

На первой итерации ( $l=1$ ) агенты-разведчики в количестве  $n_r$  случайным образом размещаются в пространстве поиска. Эта операция заключается в генерации случайным образом множества отличающихся друг от друга позиций  $R=\{r_s | s=1, 2, \dots, n_r\}$ . Для каждой позиции вычисляется значение целевой функции  $F_s(l)$ . Выбирается  $n_b$  лучших решений  $X^0=\{X_s\}$ . Формируется множество базовых позиций  $R^0(l)=\{r_s^0(l) | s=1, 2, \dots, n_b\}$ , соответствующих множеству  $X^0$ .

После выбора агентом фуражиром  $b_z$  базовой позиции  $r_s^0(l) \in R^0(l)$ , реализуется вероятностный выбор позиции  $r_z(l)$ , расположенной в окрестности базовой позиции  $r_s^0(l)$ . Обозначим множество позиций, выбранных агентами фуражирами в окрестности позиции  $r_s^0(l)$  как  $O_s(l)$ . Назовем множество позиций  $O_s(l) \cup r_s^0(l)$  областью  $O_s^*(l)=O_s(l) \cup r_s^0(l)$ . В каждой области  $O_s^*(l)$  выбирается лучшая позиция  $r_s^*(l)$  с лучшей оценкой  $F_s^*(l)$ . Назовем  $F_s^*(l)$  оценкой области  $O_s^*(l)$ . Среди  $F_s^*$  выбирается лучшее решение с оценкой  $F^*(l)$ . Лучшее решение с оценкой  $F^*(l)$  сохраняется, а затем происходит переход к следующей итерации.

На второй и последующих итерациях множество базовых позиций  $R^0(l)$  ( $l=2, 3, \dots, L$ ), формируется из двух частей  $R^{\delta 1}(l)$  и  $R^{\delta 2}(l)$ ,  $R^{\delta 1}(l) \cup R^{\delta 2}(l) = R^0(l)$ . В первую часть  $R^{\delta 1}(l)$  включаются  $n_{b1}$  лучших позиций  $r_s^*$  найденных агентами в каждой из областей, сформированных на предыдущей итерации. Вторая часть  $R^{\delta 2}(l)$  формируется пчелами-разведчиками также как и на первой итерации. Отличие заключается в числе  $n_{r1}$  агентов-разведчиков, выбирающих случайным способом новые позиции.  $n_{r1} < n_r$ . В множество  $R^{\delta 2}(l)$  включается  $n_{b2}$  лучших позиций из  $n_{r1}$  новых позиций, найденных агентами-разведчиками на  $l$ -ой итерации.  $n_{b1} + n_{b2} = n_b$ . Далее выполняются действия, аналогичные действиям, рассмотренным на первой итерации. Если  $F^*(l)$  лучше  $F^*(l-1)$ , то сохраняется решение с этой оценкой, а затем происходит переход к следующей итерации.

**Интеграция моделей адаптивного поведения муравьиной и пчелиной колоний.** Основная цель при разработке новой парадигмы роевого алгоритма за-

ключается в интеграции метаэвристик, заложенных в пчелином и муравьином алгоритмах. Суть интеграции заключается в том, что в процессе выполнения поисковой процедуры производится чередование процедур пчелиного и муравьиного алгоритмов, а пчелы и муравьи обмениваются своими функциями, то есть на отдельных этапах муравьи выполняют функции пчел, а пчелы – функции муравьев. При этом решение попеременно отражается либо на графе поиска решений, либо в виде позиции в пространстве поиска решений. Другими словами интеграция моделей адаптивного поведения муравьиной и пчелиной колоний сводится в создании гибридного агента – “пчеломуравья” поочередно выполняющего функции муравьев и пчел.

Работа поисковой процедуры начинается с построения в соответствии со спецификой решаемой задачи графа поиска решений (рис. 1). На рис. 1 для удобства блок относящийся к муравьиному алгоритму помечен буквой *A*, а блок, относящийся к пчелиному алгоритму, помечен буквой *B*.

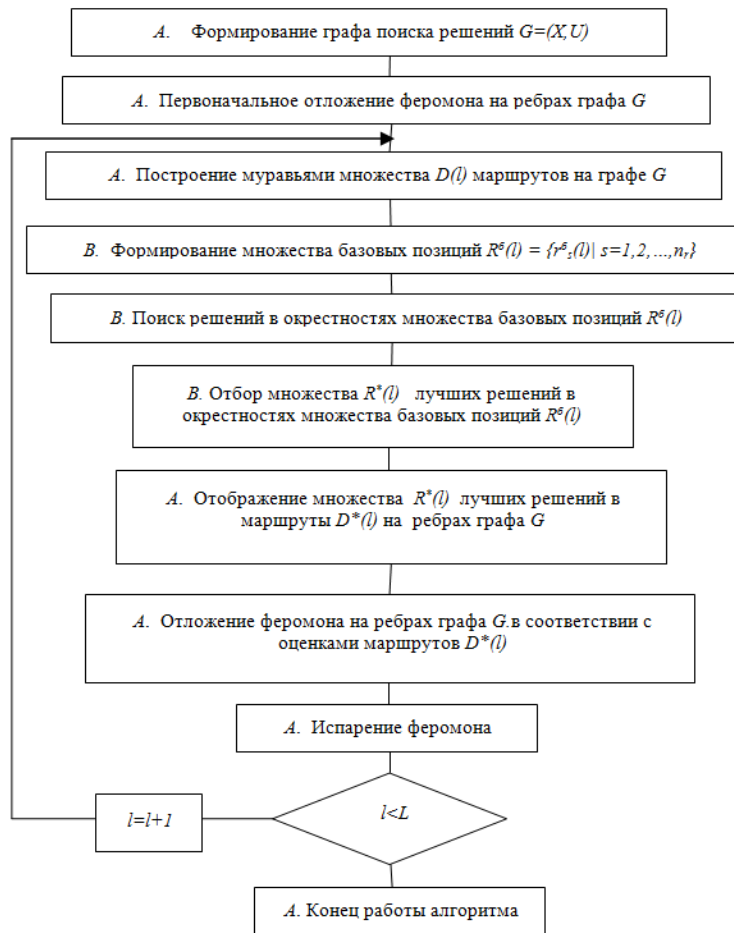


Рис. 1. Структурная схема роевого алгоритма на основе интеграции пчелиного и муравьиного алгоритмов

На начальном этапе на всех ребрах графа *G* откладывается одинаковое (небольшое) количество феромона  $Q/v$ , где  $v=|U|$ . Параметр  $Q$  задается априори. Процесс поиска решений итерационный. Каждая итерация  $l$  включает 3 этапа. На пер-

вом этапе каждой итерации выполняются процедуры муравьиного алгоритма. Каждый  $s$ -й агент формирует на ребрах графа  $G$  свой собственный маршрут  $D_s(l)$ , определяется решение, соответствующее маршруту  $D_s(l)$ , и оценка решения  $F_s(l)$ .

На втором этапе каждой итерации выполняются процедуры пчелиного алгоритма. Множество решений, соответствующих маршрутам, построенным агентами муравьями, рассматривается как множество базовых позиций  $R^{\delta}(l)$ , найденных агентами разведчиками на  $l$ -ой итерации. Каждый из  $n_f$  агентов фуражиров  $b_z$  последовательно выбирает сначала с вероятностью  $P(r_s^{\delta}) = F_s^{\delta} / \sum_s (F_s^{\delta})$  базовую позицию  $r_s^{\delta}(l) \in R^{\delta}(l)$ . Затем осуществляет вероятностный выбор позиции  $r_z(l)$ , расположенной в окрестности базовой позиции  $r_s^{\delta}(l)$ , с соответствующим решением  $X_z(l)$ . Отметим, что окрестность базовой позиции формируется с учетом специфики решаемой задачи.

Далее рассчитывается оценка  $F_z(l)$  решения  $X_z(l)$ , а позиция  $r_z(l)$  включается в множество  $O_s(l)$ . После выбора агентами фуражирами позиций в окрестностях базовых позиций для каждой базовой позиции  $r_s^{\delta}(l)$  формируется область  $O_s^*(l) = O_s(l) \cup \mathcal{N}_s^{\delta}(l)$ . В каждой области  $O_s^*(l)$  выбирается лучшая позиция  $r_s^*(l)$  с лучшим решением  $X_s^*(l)$ , которая помещается в множество лучших позиций  $R^*(l)$ .

На третьем этапе каждой итерации выполняются процедуры муравьиного алгоритма. Множество  $R^*(l)$  лучших решений отображается в множество  $D^*(l)$  маршрутов на графе  $G$ . На ребрах каждого маршрута  $D_s^*(l) \in D^*(l)$  в соответствии с оценками маршрутов производится отложение феромона. Заключительной операцией третьего этапа является испарение феромона на ребрах графа  $G$ .

Фиксируется лучшее решение, найденное после выполнения  $l$  итераций.

Таким образом, в процессе поиска на каждой итерации агенты поочередно выполняют функции муравьев, пчел разведчиков и пчел фуражиров.

Экспериментальные исследования проводились на IBM PC. Исследованию подвергались алгоритмы для решения задач разбиения, размещения, планирования и трассировки [5–10]. В целом гибридным алгоритмом были получены решения на 2 % лучше решений, полученных муравьиным либо пчелиным алгоритмом. Общая оценка временной сложности лежит в пределах  $O(n^2)$ – $O(n^3)$ .

**Заключение.** Разработана новая парадигма роевого алгоритма. Рассмотрены ключевые моменты интеграции моделей адаптивного поведения пчелиной и муравьиной колоний. Предложенный в работе класс гибридных алгоритмов может быть использован для решения широкого круга комбинаторных задач. Заложенные в каждой модели метаэвристики при их интеграции усиливают возможности и эффективность алгоритмов. Интеграция моделей расширяет области применения роевого интеллекта.

Разработанный гибридный алгоритм был успешно применен для решения сложных комплексных задач оптимизации. Типичный пример решения подобной задачи – задача планирования кристалла СБИС, задача размещения, задача построения кратчайших связывающих сетей, задача синтеза математических выражений, обучения и распознавания образов. Экспериментальные исследования показали, что алгоритмы на основе предлагаемого подхода могут давать лучшие результаты, чем при использовании методов пчелиной и муравьиной колоний по отдельности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Engelbrecht A.P. Fundamentals of Computational Swarm Intelligence. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2005.
2. M. Dorigo and T. Stützle. Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge, MA, 2004.

3. *Lučić P., Teodorović D. Computing with Bees: Attacking Complex Transportation Engineering Problems // International Journal on Artificial Intelligence Tools. – 2003. – № 12. – P. 375-394.*
4. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Поисковая адаптация: Теория и практика. – М.: Физматлит, 2006.*
5. *Лебедев О.Б. Трассировка в канале методом муравьиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2009. – № 4 (93). – С. 46-52.*
6. *Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Моделирование адаптивного поведения муравьиной колонии при поиске решений, интерпретируемых деревьями // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 7 (132). – С. 27-34.*
7. *Лебедев О.Б. Покрытие методом муравьиной колонии // Двенадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2010. Труды конференции. Т. 2. – М.: Физматлит, 2010. – С. 423-431.*
8. *Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.Б. Гибридный алгоритм разбиения на основе природных механизмов принятия решений // Искусственный интеллект и принятие решений. – М.: Изд-во Институт системного анализа РАН, 2012. – С. 3-15.*
9. *Лебедев В.Б. Метод пчелиной колонии в комбинаторных задачах на графах // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-212. Труды конференции. Т. 2. – М.: Физматлит, 2012. – С. 414-422.*
10. *Лебедев Б.К., Лебедев В.Б. Размещение на основе метода пчелиной колонии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12 (113). – С. 12-19.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Я.Е. Ромм.

**Лебедев Владимир Борисович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: lbk@tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371743; кафедра системного анализа и телекоммуникаций; доцент.

**Лебедев Олег Борисович** – кафедра систем автоматизированного проектирования; доцент.

**Lebedev Vladimir Borisovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: lbk@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371743; the department of system analysis and telecommunications; associate professor.

**Lebedev Oleg Borisovich** – the department of computer aided design; associate professor.

УДК 519.712.2

**С.Н. Щеглов**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ МОДЕЛЕЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЕКТИРОВАНИИ\***

*В работе показано использование различных видов моделей эволюции для построения информационных технологий поддержки принятия решений в проектировании. Рассмотрены основные модели эволюций, которые эффективно используются при построении алгоритмов принятия решений в САПР. Основным этапом в каждой модели эволюции является анализ популяции, ее преобразование тем или иным способом и эволюционная смена форм. Показана условная упрощенная интегрированная схема эволюции. Рассмотрен вариант адаптации популяции к внешней среде на примере модифицированной эволюции Шмальгаузена. Приведена условная архитектура поиска для принятия решений в САПР.*

---

\* Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 12-07-00058).