

УДК 004.023

UDC 004.023

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

**СИНТЕЗ СИСТЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПОТРЕБЛЕНИЯ НЕВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ<sup>1</sup>****SYNTHESIS OF A SYSTEM OF OPTIMIZATION OF CONSUMPTION OF NON-RENEWABLE RESOURCES**

Марков Виталий Николаевич  
д.т.н.  
SPIN-код = 9201-7705

Markov Vitaly Nikolaevich  
Dr.Sci.Tech.  
SPIN-code = 9201-7705

Мурлин Алексей Георгиевич  
к.т.н., доцент  
SPIN-code = 4991-8507  
*Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия*

Murlin Aleksey Georgievich  
Cand. Tech. Sci, associate professor  
SPIN-code = 4991-8507  
*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia*

Рассматривается *NP*-задача дискретной оптимизации потребления невозобновляемых ресурсов. Веса рёбер графа ресурсов задают стоимость потребляемых ресурсов. Для решения задачи предлагается использовать дискретную систему, совершающую переходы состояний на полном графе с числом вершин, равным количеству дискретных ресурсов. Целью такой системы является построение цепи заданной длины и минимального веса на полном графе. Проблемным фактором является факториальный рост числа вариантов цепей на графе при линейном росте количества ресурсов. Главная идея состоит в использовании найденных статистических закономерностей рангов переходов дискретной системы при построении цепей минимального веса на графах произвольного размера. Использование рангов позволяет абстрагироваться от конкретных весов переходов и найти свойство, присущее оптимальным решениям. Описана структура дискретной системы и её функционирование в режиме анализа ранжированных решений. Отличительной особенностью представленной системы является использование генератора рангов, генератора ранжированных цепей и блока статистики. Они используются для определения распределения субоптимальных решений. Также статья содержит описание структуры и функционирования дискретной системы в режиме синтеза субоптимальных решений на основе найденного распределения вероятностей локальных решений. Новизну предлагаемого подхода к построению решателей *NP*-задач определяет использование эмпирических функций от рангов локальных решений для управления поиском

The *NP*-problem of discrete optimization of consumption of non-renewed resources is considered. The weights of edges of the graph of resources set cost of consumed resources. It is offered to use the transitions of discrete system conditions on the complete graph with number of vertexes, equal to quantity of discrete resources, for the problem decision. The purpose of such system is construction of a chain of the predetermined length and the minimum weight on the complete graph. The problem factor is factorial growth of number of variants of chains on graph at linear growth of quantity of resources. The main idea consists in a use of found statistical regularities of transition ranks of discrete system at construction of chains with the minimum weight on graphs of the any size. Use of ranks allows to abstract from concrete weights of transitions and to find the property inherent optimum. In this article, the structure of discrete system is presented and its functioning in a mode of analysis of ranged decisions is described. Distinctive feature of the presented system is use of the generator of ranks, the generator ranged chains and the statistics block. They are used for definition of distribution of suboptimum decisions. In addition, the article contains the description of structure and functioning of discrete system in a mode of synthesis of suboptimum decisions on the basis of the found distribution of probabilities of local decisions. Novelty of the offered approach to construction of solvers of *NP*-problems is in using empirical functions from ranks of local decisions to control the search

Ключевые слова: ДИСКРЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ, NP-ПРОБЛЕМА, РАНЖИРОВАННЫЙ ГРАФ ПЕРЕХОДОВ,

Keywords: DISCRETE OPTIMIZATION, NP-PROBLEM, RANKED TRANSITION GRAPH, NEIGHBOURHOOD OF STATISTICAL OPTIMUM

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РГНФ, проект № 14-02-00334а.

ОКРЕСТНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКОГО  
ОПТИМУМА  
Doi: 10.21515/1990-4665-122-063

Суть предлагаемого подхода к оптимизации невозобновляемых ресурсов заключается в синтезе дискретной системы упорядочивания субоптимальных ранжированных решений, полученных перебором цепей на полном графе ресурсов, по критерию уменьшения целевой функции [1]. Для управления переходами дискретной системы используются ранги локальных переходов и стек состояний дискретной системы для возврата по дереву решений. Ранги локальных переходов определяются эвристической функцией, построенной в соответствии с закономерностями распределения субоптимальных решений.

Обоснованием использования именно рангов является тот факт, что для  $NP$ -задачи оптимального потребления ресурсов существует только один параметр, который не зависит от исходных данных – наличие рангов переходов дискретной системы. Поэтому субоптимальные решения представлены ранжированными цепями.

Введём ранжированный переход дискретной системы  $\mathbf{s}^{(i)} \xrightarrow{r_{i+1}} \mathbf{s}^{(i+1)}$ . Здесь  $r^{i+1}$  – ранг перехода системы, находящейся в  $i$ -м состоянии  $\mathbf{s}^{(i)}$ . Данное обстоятельство позволяет включить в состав дискретной системы генератор рангов и генератор ранжированных цепей, что делает функционирование дискретной системы детерминированным при известной функции, осуществляющей отображение  $\mathbf{s}^{(i)} \rightarrow r_{i+1}$ .

Дальнейшее описание режимов анализа и синтеза дискретной системы для получения субоптимальных цепей на полном графе большой размерности основано на минимизации целевой функции

$$h(\pi) = \sum_{i=1}^{k-1} w(e_{i,i+1}),$$

где  $w(e_{i,i+1})$  – вес ребра, инцидентного вершинам  $i$  и  $i + 1$ ,  $k$  – длина цепи

$\pi$ .

### 1 Функционирование системы в режиме анализа решений

На рисунке 1 изображена структурная схема дискретной системы, функционирующей в режиме анализа последовательности цепей. Отличительной особенностью предлагаемой системы является наличие генератора рангов и генератора ранжированных цепей. Новизну предлагаемого подхода составляет поиск зависимости оптимального решения только от рангов цепей, вне зависимости от конкретных исходных данных.

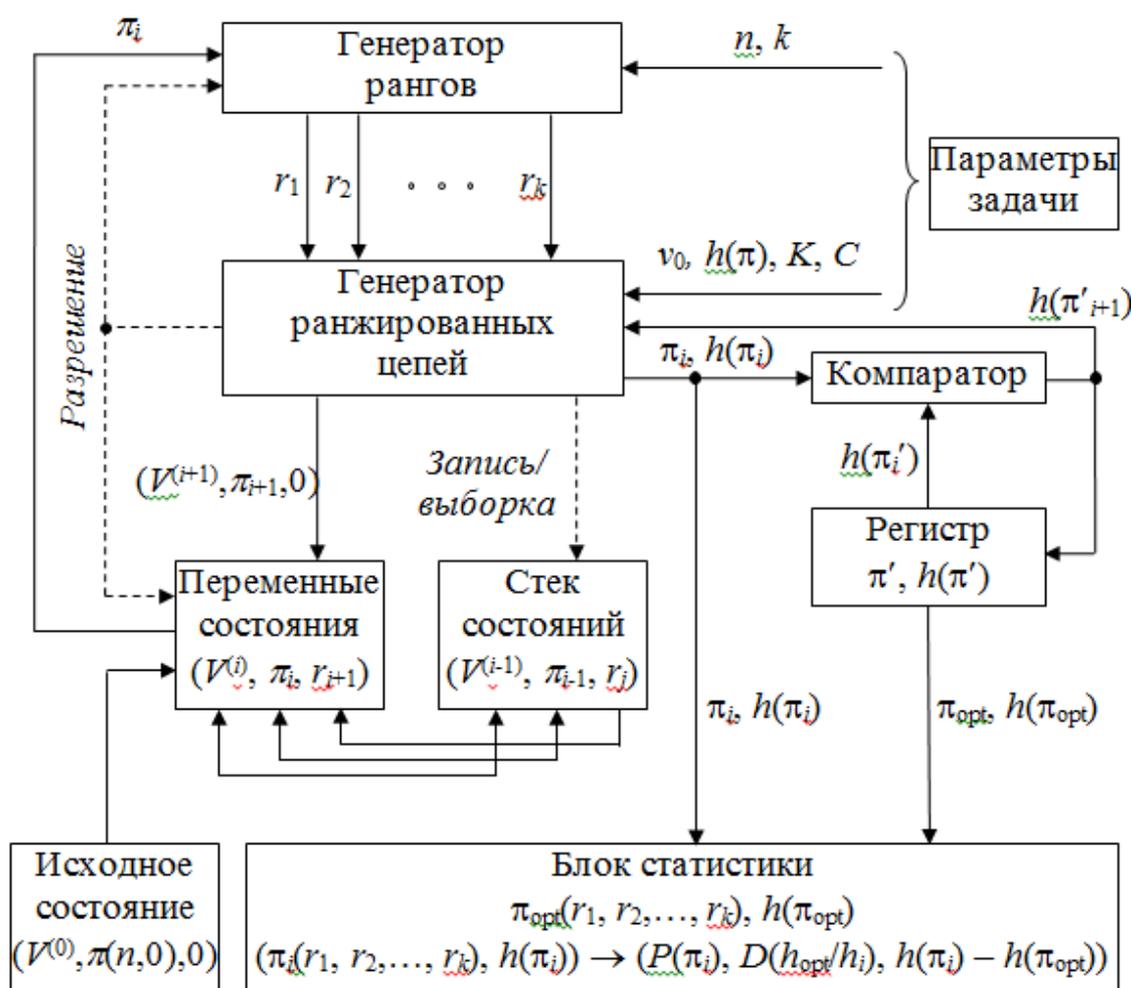


Рисунок 1 – Структурная схема дискретной системы в режиме анализа

### Генератор рангов

Генератор рангов в режиме анализа решений осуществляет построение рангов  $r_1 r_2 \dots r_n$  цепи  $\pi_i(n, n)$  в порядке увеличения индекса цепи  $i = \overline{0, \dots, n! - 1}$ . На вход генератора рангов подаются исходные данные задачи  $n, k$  и переменная состояния дискретной системы  $\pi_i$ . На  $k$  выходах генератора рангов по сигналу “разрешение” от генератора ранжированных цепей поочередно выставляются ранги очередной цепи  $\pi_{i+1}$  от  $r_1$  до  $r_n$ .

### Генератор ранжированных цепей

Генератор ранжированных цепей, содержит  $k$  последовательно соединённых комбинационных устройств, выполняющих операцию выбора  $sel: (v_i, V^{(i)}, r_{i+1}, C) \rightarrow (v_{i+1}, V^{(i+1)})$ , которая по рангу  $r_{i+1}$  определяет удовлетворяющую условиям  $C$  смежную к  $v_i$  вершину  $v_{i+1}$  и усечённое множество  $V^{(i+1)} = V^{(i)} \setminus \{v_i\}$ , а также  $k$  последовательно соединённых комбинационных устройств, выполняющих операцию  $\&: (\pi(n, i), v_{i+1}) \rightarrow (\pi(n, i + 1))$  поэлементного построения цепи  $\pi(n, k)$ .

На входы генератора ранжированных цепей поступают:

- ранги  $(r_1, r_2, \dots, r_k)$  цепи  $\pi_{i+1}(n, k)$ ,
- начальная вершина  $v_0$ , служащая корнем дерева переходов системы,
- целевая функция  $h(\pi)$ ,
- конструктор  $K$  структуры решения  $z$ ,
- условия  $C$ , налагаемые на структуру  $z$ ,
- вес текущей оптимальной цепи  $h(\pi(n, k))$ , хранимый в регистре.

На выходах генератора ранжированных цепей выставляются:

- цепь  $\pi_i(r_1, r_2, \dots, r_k)$ ,
- вес цепи  $h(\pi_i)$ ,
- сигнал “Запись/выборка” для управления стеком состояний дискретной системы,

– сигнал “Разрешение” для обновления переменных состояния дискретной системы и разрешения генерации рангов очередной цепи.

### Функционирование дискретной системы в режиме анализа решений

Дискретная система в режиме анализа решений функционирует по известным правилам обхода дерева “сначала вглубь”. Однако особенностью этого режима является сортировка вершин окрестности по весу инцидентных рёбер и использование рангов вершин и рёбер вместо их весов.

1) В исходном состоянии  $s_0$  переменные состояния заданы тройкой  $(V^{(0)}, \pi(n, 0), 0)$ , где  $V^{(0)} = \{v_i/E_i \mid i = \overline{1, \dots, n}\}$  – сортированное фактор-множество вершин исходного графа,  $\pi(n, 0) = ()$  – пустая цепь. Множество  $V^{(0)}$  генерируется сторонними средствами, как правило, датчиками псевдослучайных чисел с известным законом распределения. Выбор исходной вершины  $v_0$ , с которой начинается генерация решений, зависит от постановки задачи. Поэтому начальная вершина  $v_0$  может быть либо фиктивной, либо принадлежать графу исходных данных.

2) Переход  $s^{(i)} \xrightarrow{r_{i+1}} s^{(i+1)}$  из состояния  $s^{(i)} = (V^{(i)}, \pi_i, r_{i+1})$  осуществляется путём записи в стек состояний дискретной системы переменных текущего состояния  $s_i$  и обновления блока переменных состояния переменными  $(V^{(i+1)}, \pi_{i+1}, 0)$  состояния  $s_{i+1}$ .

3) При достижении состояния  $s^{(k)}$ , то есть листа дерева поиска, осуществляется переход  $s^{(k)} \rightarrow s^{(k-1)}$ . Для этого из стека состояний выталкивается предыдущее состояние  $s^{(i-1)}$  в котором третья переменная модифицируется рангом  $r_i$  последней вершины цепи  $\pi_i$ , после чего переменные  $(V^{(i-1)}, \pi_{i-1}, r_i)$  состояния  $s^{(i-1)}$  обновляют блок переменных состояния дискретной системы.

4) При достижении состояния  $s^{(i)} = (V^{(i)}, \pi_i, r_{i+1})$  со значением ранга  $r_{i+1} = n - i$ , то есть когда все состояния  $s^{(i+1)}$  проверены, дискретная система осуществляет переход  $s^{(i)} \rightarrow s^{(i-1)}$ .

5) При достижении состояния  $s^{(0)} = (V^{(0)}, \pi(n, 0), r_1)$  со значением ранга  $r_1 = n$  дискретная система завершает обход дерева

поиска.

В результате этого в регистре дискретной системы хранится оптимальная цепь и её вес, в блоке статистики содержатся все цепи, их веса и статистические характеристики. С целью накопления статистических данных дискретная система запускается в режиме анализа решений многократно, при этом каждый раз на вход системы подаётся граф исходных данных, сгенерированный на основе датчиков псевдослучайных чисел, имеющих соответствующий распределению ресурсов закон распределения.

## 2 Функционирование системы в режиме синтеза решений

На рисунке 2 изображена структурная схема детерминированной дискретной системы, функционирующей в режиме синтеза решений.

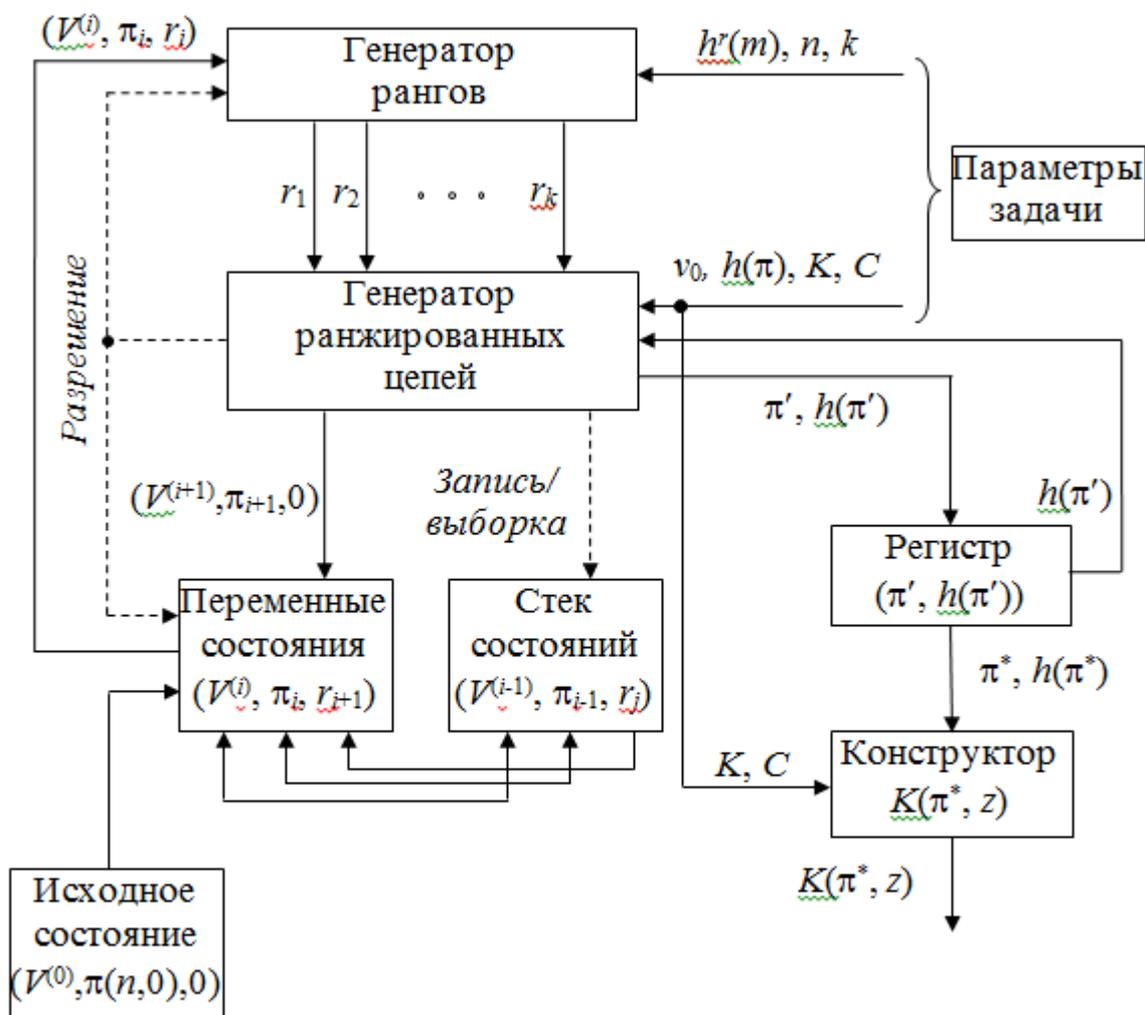


Рисунок 2 – Структурная схема дискретной системы в режиме синтеза

Отличием работы дискретной системы от известных методов

решения  $NP$ -задач [2,3] является наличие эвристической функции  $h^r(m)$ , управляющей генератором рангов таким образом, что генерируются только такие ранги цепей, при которых полученные цепи имеют высокую вероятность того, что данная цепь оптимальна, что характерно для работы недетерминированной машины Тьюринга.

Новизну предлагаемого подхода к построению решателей  $NP$ -задач определяет использование для управления поиском решения эмпирических функций от рангов локальных решений. Указанные функции отражают в той или иной мере распределение оптимальных решений на всём множестве решений, которое получено на основе статистического анализа всех ранжированных решений на данных малой размерности.

Основным отличием решений, получаемых в режиме синтеза, от решений, получаемых в режиме анализа, является то, что в режиме синтеза находятся только субоптимальные решения  $(\pi^*, h(\pi^*))$ , а в режиме анализа находятся все возможные решения. Нахождение оптимального решения задачи поиска цепи минимального веса на полном графе с произвольным порядком теоретически невозможно.

### Генератор рангов

Генератор рангов в режиме синтеза решений осуществляет построение рангов  $r_1 r_2 \dots r_k$  цепи  $\pi_k(n, 0)$  в порядке увеличения индекса цепи  $i$ . Строгое увеличение индекса цепи является достаточным условием минимизации вычислительных затрат при проверке заданного подмножества  $\Pi_{n,k}^*$  вариантов решений. При этом подмножество  $\Pi_{n,k}^*$  может определяться как формулой рекуррентного перечисления своих элементов, так и условием  $h^r(\pi(n, k)) \leq h_0^r(\pi(n, k))$ , накладываемым на эмпирическую функцию  $h^r(\pi(n, k))$  веса рангов цепи  $\pi_i(n, k)$ , определённую на множестве  $M_f$ , где  $h_0^r(\pi(n, k))$  – априорно заданный порог, величина которого зависит от размера исходных данных и

требуемой точности решения.

На вход генератора рангов подаются исходные данные задачи  $n, k$  и переменная состояния дискретной системы  $\pi_i$ . На  $k$  выходах генератора рангов по сигналу “разрешение” от генератора ранжированных цепей поочередно выставляются ранги очередной цепи  $\pi_{i+1}$  от  $r_1$  до  $r_k$ .

### Функционирование детерминированной дискретной системы в режиме синтеза решений

1) В исходном состоянии  $s_0$  переменные состояния заданы тройкой  $(V^{(0)}, \pi(n, 0), 0)$ , где  $V^{(0)} = \{v_i/E_i \mid i = \overline{1, \dots, n}\}$  – фактор-множество вершин исходного графа,  $\pi(n, 0) = ()$  – пустая цепь. Множество  $V^{(0)}$  является фактор-множеством графа  $G$  исходных данных задачи. Выбор исходной вершины  $v_0$ , с которой начинается генерация решений, зависит от постановки задачи. Поэтому начальная вершина  $v_0$  может быть либо фиктивной, либо принадлежать графу исходных данных.

2) Генератор рангов вычисляет ранги цепей, удовлетворяющие условию  $h^r(\pi(n, k)) \leq h_0^r(\pi(n, k))$ , сужая тем самым пространство поиска до множества субоптимальных цепей  $\Pi_{n,k}^*$ .

3) Переход  $s^{(i)} \xrightarrow{r_{i+1}} s^{(i+1)}$  из состояния  $s^{(i)} = (V^{(i)}, \pi_i, 0)$  по рангу  $r_{i+1}$ , полученному от генератора рангов, осуществляется только при выполнении условия  $h(\pi_{i+1}) < h(\pi')$ , путём записи в стек состояний дискретной системы переменных текущего состояния  $s^{(i)}$  и обновления блока переменных состояния переменными  $(V^{(i+1)}, \pi_{i+1}, 0)$  состояния  $s^{(i+1)}$ .

4) Переход  $s^{(i)} \rightarrow s^{(i-1)}$  из состояния  $s^{(i)} = (V^{(i)}, \pi_i, 0)$  осуществляется в двух случаях:

– при  $h(\pi_i) \geq h(\pi')$ , то есть когда вес цепи  $\pi_i$  превысил вес наилучшего на данном шаге решения  $\pi'$ . При этом остальные ранги

проверяемой цепи игнорируются и дискретная система переходит к проверке очередной ранжированной цепи посредством вычисления результата операции поразрядного сравнения факториальной формы текущей  $\pi_i$  и факториальной формы очередной цепи  $\pi_i$ ,

– при значении индекса  $j$  ранга  $r_j$  перехода, удовлетворяющего условию  $j < i$ , то есть при переходе к проверке очередной цепи.

5) При достижении состояния  $\xi^{(k)}$ , то есть листа дерева поиска, переменные состояния  $V^{(k)}$  и  $\pi_i$  обновляют регистр субоптимальных решений.

6) При проверке всех цепей, удовлетворяющих условиям  $h^r(\pi(n, k)) \leq h_0^r(\pi(n, k))$  и  $h(\pi_{i+1}) < h(\pi^*)$  дискретная система завершает обход дерева поиска.

После останова дискретной системы в регистре решений находится одно или несколько субоптимальных решений и их вес.

Разработанный подход к построению решателя допускает параллельное решение задачи оптимального потребления невозобновляемых ресурсов благодаря тому, что множество поиска  $\Pi_{n,k}^*$  может быть разделено на классы эквивалентности по диапазонам значений эмпирической функции веса от рангов цепей. При этом каждая детерминированная дискретная системы без изменения своей внутренней структуры определяет субоптимальное решение на своём диапазоне значений эмпирической функции  $h^r(\pi(n, k))$ .

Разработанный подход позволяет осуществлять повторный запуск дискретной системы, что уменьшает ошибку полученного субоптимального решения.

### **Выводы**

В статье рассмотрена система оптимизации потребления невозобновляемых ресурсов в режимах анализа и синтеза последовательности субоптимальных решений в виде ранжированных цепей переходов дискретной системы на основе использования генераторов псевдослучайных рангов.

Исследование выполняется в рамках гранта Российского гуманитарного научного фонда «Управление эффективностью пространственно распределённых промышленных предприятий с учётом фактора надёжности на примере нефтегазодобывающего комплекса» проект № 14-02-00334а.

### **Список литературы**

1. Касьянов В.Н., Евстигнеев В.А. Графы в программировании: обработка, визуализация и применение. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 1104 с.
2. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта: Пер. с франц. – М.: Мир, 1991. – 568 с.
3. Макконелл Дж. Основы современных алгоритмов. 2-е дополненное издание: Пер. с англ. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с.

### **References**

1. Kas'janov V.N., Evstigneev V.A. Grafy v programmirovanii: obrabotka, vizualizacija i primenenie. – SPb.: BHV-Peterburg, 2003. – 1104 s.
2. Lor'er Zh.-L. Sistemy iskusstvennogo intellekta: Per. s franc. – M.: Mir, 1991. – 568 s.
3. Makkonell Dzh. Osnovy sovremennyh algoritmov. 2 e dopolnennoe izdanie: Per. s angl. – M.: Tehnosfera, 2004. – 368 s.