

# ПРОСТРАНСТВЕННО-СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ЭКОЛОГИЧЕСКОМ ОБОСНОВАНИИ ИНВЕСТИЦИЙ

В. М. Умывакин, Я. А. Федорова, Н. А. Минаева

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 1.03.2009 г.

**Аннотация.** В статье рассматривается процедура пространственно - структурно - параметрического синтеза сложных природно-технических объектов, основанная на комплексировании методов морфологического анализа систем, ЛП-поиска и адаптивной оптимизации алгоритмически заданных целевых функций.

Ключевые слова: экологическое обоснование инвестиций, природно-технический комплекс, структурно-параметрическая оптимизация

**Abstract.** In article procedure spatially - structurally - parametrical synthesis of the difficult natural-technical objects, based on interconnecting methods of the morphological analysis of systems, LP-search and adaptive optimization of algorithmically set criterion functions is considered.

**Key words:** ecological substantiation of investments, natural-technical complex, structurally-parametrical optimization

## ВВЕДЕНИЕ

Методология проектирования экологически безопасных природно-технических комплексов в рамках концепции устойчивого развития территорий основана на системном подходе и активном использовании моделей и методов принятия обоснованных прединвестиционных решений.

Современное природоохранное законодательство России требует многовариантного подхода к анализу последствий реализации намечаемой хозяйственной и иной деятельности при экологическом обосновании инвестиций. Многоальтернативный синтез и оценка качества компромиссных прединвестиционных решений предполагают наличие дискретного множества  $W = w^1, w^2, \dots, w^N$  из  $N$  возможных вариантов проектируемого природно-технического комплекса (ПТК). Каждый  $i$ -й возможный вариант  $w^i = (x^i, y^i)$  ПТК характеризуется двумя наборами показателей: набором  $x^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_L^i)$  управляющих переменных (параметров) и набором управляемых частных критериев  $y^i = (y_1^i, y_2^i, \dots, y_M^i)$ , отражающих экологические, социальные и экономические пос-

ледствия реализации прединвестиционных решений. Параметры и критерии могут быть как качественными (нечисловыми), так и количественными [1].

Для построения множества  $W$  требуется формализовать понятие «возможный вариант» прединвестиционного решения, т.е. задать набор параметров и их возможные значения (параметрические ограничения). Рассмотрим два различных способа формализованного представления и формирования множества альтернативных вариантов ПТК - методы морфологического анализа [2, 3] и ЛП-поиска [4,5], а также предлагаемый метод, основанный на их комплексировании (морфологический ЛП-поиск).

## 1. МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

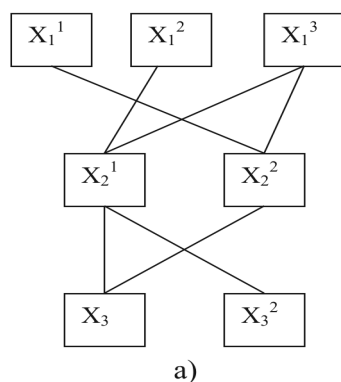
Обоснованность выбора рациональных прединвестиционных решений синтезируемого ПТК для различных состояний внешней среды определяется представительностью (репрезентативностью) множества возможных вариантов и полнотой набора их критериев качества.

При этом поиск наилучших вариантов ПТК необходимо проводить на трех уровнях опти-

мизации. Первому уровню соответствует выбор наилучшего принципа действия (функциональной схемы) ПТК, который практически не поддается формализации. На втором осуществляется поиск наилучшей структуры ПТК в рамках выбранного принципа действия. На третьем оптимизируются количественные параметры для заданной структуры (морфологической схемы) ПТК.

Предположим, что задача поиска наилучших вариантов ПТК заключается в выборе структуры системы, обеспечивающей выполнение противоречивых экологических и технико-экономических требований к качеству результата планируемой хозяйственной деятельности. В дальнейшем будем считать, что структура ПТК задана с точностью до номинальных параметров (структурных переменных). Они характеризуют альтернативные способы пространственной и/или конструктивно-технологической реализации структурных компонентов (в частности, инженерных объектов) ПТК при агрегировании их в систему. В данном случае возможные варианты структуры ПТК полностью характеризуются набором нечисловых, номинальных параметров  $x = (x_1, x_2, \dots, x_L)$ , что позволяет получить многоаспектное описание различных в качественном отношении прединвестиционных решений. Причем, каждый параметр  $x_k$  может иметь лишь конечное число значений ( $k=1, 2, \dots, L$ ).

В такой ситуации множество возможных вариантов структуры проектируемого ПТК целесообразно представлять в виде морфологических схем (рис.1.) и использовать для их построения метод морфологического анализа сложных систем [3].



Метод морфологического анализа основан на генерировании и комбинаторном синтезе возможных вариантов проектируемой системы. Данный метод обеспечивает всестороннее (многоаспектное) исследование вариантов структуры ПТК на основе систематического обзора и представления в наглядно-обозримой форме морфологической схемы (МС).

Для формализованного представления множества возможных вариантов структуры ПТК в виде МС должны быть определены номенклатура и тип ее структурных элементов (в частности, инженерных объектов). Эти объекты взаимосвязаны географически и технологически процессом планируемой хозяйственной деятельности и обеспечивают выполнение основной функции ПТК. Для построения МС необходимо:

1) определить существенные номинальные и количественные параметры структурных элементов ПТК, от которых зависит их технико-экономический уровень и экологическая безопасность;

2) задать возможные значения этих параметров (список возможных значений для структурных и интервалы изменения для количественных переменных). Условное изображение МС проектируемого ПТК дано на рисунке 1.

Каждому  $k$ -му уровню МС (номинальному параметру  $x_k$ ) сопоставляется определенное число  $N_k$  ее элементов (значений этого параметра  $x_k^i, i=1, 2, \dots, N_k; k=1, 2, \dots, L$ ). Сопоставляя различные комбинации (сочетания) элементов всех уровней МС, получают возможные варианты структуры ПТК. Так при структурной оптимизации ПТК анализируются альтернативные конструктивно-технологические способы

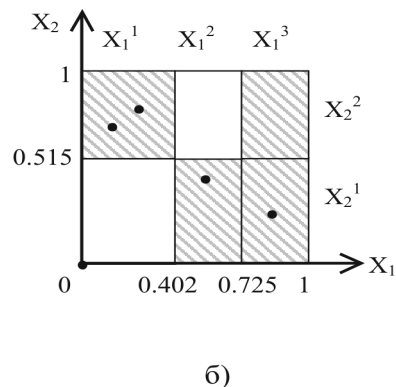


Рис. 1. Условное изображение множества допустимых вариантов проектируемого природно-технического комплекса: а) в виде допустимых комбинаций элементов в морфологической схеме ПТК; б) в виде заштрихованных частей непрерывной области поиска вариантов ПТК. - пробные ЛП-точки.

реализации инженерных объектов при компоновке их в систему.

Обозначим через  $x_k^i$   $i$ -е значение  $k$ -го номинального параметра,  $i=1,2,\dots,N_k$ ;  $k=1,2,\dots,L$ . Тогда описание некоторого возможного варианта структуры ПТК на формальном языке производится фиксированием по каждому номинальному параметру одного значения (см. рисунок 1). Комбинируя альтернативные значения всех номинальных параметров, получим многоаспектную характеристику множества возможных вариантов структуры ПТК. Общее число этих вариантов определяется по формуле:  $N=N_1N_2\dots N_L$ .

Подчеркнем, что уровням МС могут соответствовать не только номинальные, но и количественные параметры (точнее говоря, диапазоны их изменения), что обеспечивает возможность структурно-параметрического синтеза ПТК.

## 2. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ ПРЕДИНВЕСТИЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ЛП-ПОИСКА

Предположим, что все параметры ПТК являются количественными переменными. В этом случае формализованное описание множества возможных вариантов ПТК (параметрических ограничений) задается в виде  $L$ -мерного параллелепипеда:  $X = \{x \mid x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max}, k=1,2,\dots,L$ . Здесь  $x_k^{\min}$  и  $x_k^{\max}$  - соответственно минимальное и максимальное возможные значения параметра  $x_k$ .

Предположим также, что множество допустимых вариантов  $G_X$ , которое является подмножеством  $X$ , является «плохим», в частности, невыпуклым (рисунок 1), а критерии качества – многоэкстремальными «овражными» функциями [6,7]. В такой ситуации для формирования конечного числа возможных вариантов ПТК целесообразно применять метод Монте-Карло (метод статистических испытаний) [4]. Получение вариантов в данном методе основано на моделировании случайных величин с определенным законом распределения (например, нормальным). Однако поиск наилучших вариантов ПТК с помощью метода Монте-Карло имеет очевидные недостатки, связанные с неравномерностью просмотра выделенной области  $X$  пространства оптимизируемых параметров. Таким образом, процедура статистических ис-

пытаний должна удовлетворять двум на первый взгляд противоречивым требованиям: с одной стороны, генерирование пробных точек в области  $X$  должно быть случайным, а с другой - по возможности равномерным.

На практике более удобным и эффективным способом исследования множества возможных вариантов  $X$  является детерминированный аналог метода Монте-Карло - метод ЛП-поиска [4] или его эффективная модификация – планируемый ЛП-поиск [5], удовлетворяющий вышеуказанным требованиям.

Сущность данного метода заключается в систематическом просмотре (зондировании) многомерной непрерывной области поиска  $X$ , задаваемой параметрическими ограничениями. Метод ЛП-поиска позволяет осуществить дискретизацию множества  $X$  в результате генерирования заданного числа возможных вариантов ПТК - пробных точек  $x^i$  в пространстве параметров, наиболее равномерно заполняющих  $L$ -мерный параллелепипед  $X$  (см. рисунок 1).

Обозначим через  $q_k^i$  координаты точек  $q^i = (q_1^i, q_2^i, \dots, q_L^i)$ , принадлежащих  $L$ -мерному единичному кубу  $C^L$ , т.е.  $0 \leq q_k^i \leq 1$ ,  $k=1,2,\dots,L$ ;  $i=1,2,\dots,N$ . Координаты  $q_k^i$  легко вычисляются с помощью «арифметического алгоритма» и таблицы числителей направляющих чисел  $z_t^p$  [6]. При этом значения  $k$ -го параметра возможного варианта  $x^i$  определяются по формуле:  $x_k^i = x_k^{\min} + q_k^i (x_k^{\max} - x_k^{\min})$ . Метод ЛП-поиска, в отличие от метода Монте-Карло, позволяет однозначно восстанавливать значения параметров  $x_k^i$  по номеру  $i$  возможного варианта  $x^i$ . Он предъявляет минимальные требования к гладкости (непрерывности) многомерных областей поиска и оптимизируемых целевых функций – критериев качества.

Отметим, что полученные с помощью метода ЛП-поиска возможные варианты  $x^i$  обладают свойством репрезентативности, т.е. дают наиболее полное представление (в смысле равномерности зондирования) о всей области  $X$ , а значит, и допустимом множестве  $G_X$ . Это способствует минимальной потере разнообразия при вычислении соответствующих значений критериев качества  $y_j$  в тех случаях, когда функции  $y_j = y_j(x)$  существенно зависят от одних и слабо от других параметров, что обеспечивает весьма высокую эффективность данного метода. Такая ситуация является типичной при наличии «оврагов» [6] у оптимизируемых функций, а также при уста-

новлении регрессионной зависимости критериев качества и параметров ПТК на основе обработки статистических данных.

### 3. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МОРФОЛОГИЧЕСКОГО ЛП-ПОИСКА

При большом числе  $N$  возможных вариантов в МС проектируемого ПТК (когда полный перебор или невозможен, или нецелесообразен), предлагается использовать процедуру, позволяющую получить конечное число  $N' < N$  репрезентативных возможных вариантов ее структуры и параметров.

Их репрезентативность означает следующее [1]: среди ограниченного числа вариантов, включаемых в анализ, должны содержаться варианты с наибольшим разнообразием оцениваемых свойств ПТК.

Предположим, что значениям номинальных параметров  $x_k$  поставлены во взаимнооднозначное соответствие непересекающиеся диапазоны изменения некоторых количественных показателей (числовых оценок)  $x'_k$ . Причем, величина этих интервалов выбрана таким образом, чтобы уменьшить включение «некачественных» (в определенном смысле) значений параметра  $x_k$  в репрезентативные возможные варианты.

На рисунке 1 показана область допустимых вариантов на плоскости количественных показателей  $x'_1$  и  $x'_2$ , полученная с учетом конструктивно-технологических ограничений на «увязку» альтернативных значений структурных переменных  $x_1$  и  $x_2$  (они представлены линиями в МС и им соответствуют заштрихованные прямоугольники). Здесь допустимое множество является «плохим», в частности, несвязным. В связи с этим, для получения заданного числа репрезентативных возможных вариантов ПТК в  $L$ -мерном единичном кубе  $X' = \{x' \mid 0 \leq x'_k \leq 1, k=1, 2, \dots, L\}$  применяется метод ЛП-поиска. Попадание координат  $i$ -й равномерно распределенной точки в некоторые интервалы отрезка  $[0, 1]$  для числовых оценок  $x'_k$  позволяет однозначно восстановить соответствующие значения структурных переменных  $x_k$  для  $i$ -го возможного варианта ПТК.

Сложность совместного использования морфологического анализа и метода ЛП-поиска для исследования области допустимых прединвестиционных решений состоит в том, что номи-

нальные параметры ПТК задают качественно различные группы (типы) вариантов, в то время как количественные параметры проектируемой системы должны обладать свойствами непрерывности и линейности.

Построение числовых оценок  $x'_k$  и типизация (разбиение на  $N_k$  непересекающихся интервалов) отрезков  $[0, 1]$  позволяет «объединить» морфологический анализ и ЛП-поиск в процедуре структурно-параметрического синтеза ПТК. Отметим, что количественные параметры могут непосредственно выступать в качестве координат гиперпараллелепипеда при использовании метода ЛП-поиска для генерирования и здесь типизация не всегда обязательна.

Естественно считать при этом, что величина интервалов количественных показателей  $x'_k$  характеризует степень соответствия альтернативных способов реализации структурных компонентов ПТК эколого-хозяйственным условиям объекта проектирования. В результате появляется возможность осуществлять структурно-параметрический синтез ПТК с помощью метода морфологического ЛП-поиска.

Количественные показатели  $x'_k$  могут иметь различный содержательный смысл. Например, в качестве  $x'_k$  может быть принята числовая оценка относительной важности (оценка весовых коэффициентов) значений номинального параметра  $x_k$ , полученная на основе обработки экспертных суждений о предпочтительности альтернативных способов реализации структурных элементов ПТК с учетом степени выполнения экологических и социальных требований к их качеству.

Весовые коэффициенты элементов морфологической схемы ПТК могут определяться с помощью методов экспертных оценок [1].

Отметим, что в этом случае веса можно интерпретировать как вероятности выбора соответствующих значений структурной переменной при формировании возможных вариантов ПТК.

Сделаем одно замечание для случая измерения критериев качества структурных элементов ПТК в нечисловых шкалах, т.е. для случая их измерения в ранговой или балльной шкалах. В этом случае для комплексного оценивания качества вариантов ПТК можно использовать известные процедуры агрегирования – логические матрицы сверток [8].

В работе [9] предлагается использовать другой подход. Пусть множество возможных вариантов проектируемой ПТК представлено в виде МС. Обозначим через  $y_j^{ik}$  - частную оценку в рангах или баллах  $i$ -го элемента  $k$ -го уровня МС по  $j$ -му критерию качества,  $i=1,2,\dots,N_k$ ;  $k=1,2,\dots,L$ ;  $j=1,2,\dots,M$ . Причем, для всех  $j,k$  и  $i$  оценка  $y_j^{ik}$  принимает целые значения из интервала  $[0,K]$ .

В общем случае критерии  $y_j$  являются комплексными (агрегированными) по отношению к одноименной совокупности частных критериев  $y_j^k$ , встречающихся на различных уровнях МС. Если считать, что оценка в « $K$  баллов» присваивалась элементам МС с максимальным проявлением оцениваемых свойств альтернативных способов конструктивно-технической реализации структурных элементов ПТК, то в соответствии с работой [9], можно принять  $y_j = \{\min y_j^{ik}\}$ .

#### **4. МНОГОВАРИАНТНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЛОЖЕНИЯ ТРАССЫ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГИ**

Одной из важнейших задач при экологическом обосновании инвестиций в автодорожное строительство является многоальтернативный анализ трассирования автодороги – проектируемого природно-технического комплекса.

Рациональное проложение трассы во многом определяет последующие инженерные решения и экологическую безопасность проектируемых автомагистралей. Генерирование вариантов трассирования требует анализа эколого-хозяйственных условий объекта проектирования (геолого-геоморфологических, гидрогеологических, почвенных, экономических и др.) и учета природоохранных требований.

Рассмотрим модельный пример использования метода морфологического ЛП-поиска на стадии выбора трассы обхода крупного населенного пункта. Экспертами-проектировщиками были выделены участки автодороги, включающие мостовые переходы и объекты инфраструктуры, и назначены 2-3 альтернативных способа их расположения в плане. Определенные участки автомагистрали должны быть «увязаны» в единый автодорожный природно-технический комплекс для минимизации экологической опасности и предотвращения негативных социальных и экономических последствий при проложении трассы. В данном случае структу-

ра проектируемого ПТК определяется способом взаимного расположения участков автомагистрали, что позволяет получить формализованное представление множества возможных вариантов проложения трассы в виде морфологической схемы. Ее уровням (номинальным параметрам  $x_k$ ) соответствуют участки автомагистрали, а элементам этих уровней (значениям номинальных параметров  $x_k$ ) - альтернативные способы их расположения в плане. Ограничения на «стыковку» соседних участков в единую ПТК задают допустимые комбинации элементов смежных уровней МС проектируемой автомагистрали. При этом общее число вариантов структуры ПТК может быть достаточно большим (для автодорожного комплекса из десяти участков  $N \approx 2^5 \times 3^5 = 8000$  возможных вариантов).

В такой ситуации для получения заданного числа репрезентативных вариантов структуры проектируемой автомагистрали целесообразно использовать предложенный метод морфологического ЛП-поиска. За количественные показатели  $x_k$  приняты экспертные оценки, характеризующие степень соответствия альтернативных способов расположения в плане  $k$ -го участка автомагистрали предъявляемым к ним экологическим требованиям. Для наглядности рассмотрим фрагмент морфологической схемы ПТК, приведенный на рисунке 1. Полученные оценки соответствия вариантов расположения 1-го, 2-го и 3-го участков автомагистрали природно-хозяйственным условиям объекта проектирования приведены в таблице 1.

Далее с помощью метода ЛП-поиска был сгенерировано заданное число репрезентативных возможных вариантов планового расположения природно-технического комплекса. На рисунке 1 показаны первые пять ЛП-точек в двумерном единичном кубе. Они имеют следующие координаты: (0,0); (0.5,0.5); (0.25,0.75); (0.75,0.25); (0.125,0.625). Из пяти возможных вариантов три принадлежат допустимому множеству (допустимые комбинации элементов морфологической схемы проектируемой автомагистрали показаны линиями на рисунке 1.).

Принятие обоснованных прединвестиционных решений может быть обеспечено на основе построения интегральной оценки экологической опасности планируемой хозяйственной деятельности [4].

Числовые оценки вариантов планового расположения участков

Участки автомагистрали	1			2		3	
Варианты размещения	1	2	3	1	2	1	2
Оценки соответствия	0.402	0.323	0.275	0.515	0.485	0.501	0.499

### 5. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНО-ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ С АЛГОРИТМИЧЕСКИ ЗАДАНЫМИ ЦЕЛЕВЫМИ ФУНКЦИЯМИ

Предполагается, что после выбора наилучшей структуры ПТК с учетом трудноформализуемых экологических и социальных требований задача оптимизации ее параметров сведена к поиску минимума некоторой целевой функции многих переменных (как правило, экономического критерия):

$$f_0(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \min.$$

Данная функция может быть многоэкстремальной, негладкой, иметь «овраги» и т.д. Кроме того, по заданной точке (варианту ПТК)  $x^i$  возможно только вычисление значений функции  $f_0(x^i)$ , т.е. целевая функция задана алгоритмически. В такой нестандартной ситуации необходимо использовать процедуры оптимизации параметров ПТК, в которых нет предсказания поведения целевой функции с помощью ее дифференциальных характеристик [6, 9].

При исследовании поведения целевой функции с помощью некоторого алгоритма поиска могут быть измерены лишь переменные  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Предполагается, что значения этих переменных, а, значит, и значения самой функции  $f_0(x)$  в процессе поиска (генерирования статистической информации) определяются действием скрытых существенных факторов.

Для определения скрытых факторов, которые являются случайными величинами, применяются различные методы анализа данных, в частности метод главных компонент и методы экстремальной группировки параметров [10]. В этих методах в качестве исходной информации используются матрицы статистических связей (например, матрицы коэффициентов ковариации) между переменными. Отметим, что влияние фактора - первой главной компоненты, соответствующей направлению наибольшей вытянутости линий уровня целевой функции,

неодинаково сказывается на группах существенных и несущественных переменных.

В настоящее время имеется стандартное программное обеспечение задач безусловной оптимизации. На практике широко применяются алгоритмы, реализующие различные модификации метода покоординатного спуска и устойчивые к ошибкам вычислений [7]. Эти алгоритмы эффективнее градиентных процедур в ситуации, когда линии уровня целевой функции сильно вытянуты, но расположены вдоль координатных осей.

Однако работоспособность процедур покоординатной оптимизации резко снижается в овражных ситуациях (при наличии статистических связей между переменными).

Для повышения эффективности метода покоординатного спуска используется замена переменных (переход к новым переменным  $z_1, z_2, \dots, z_n$ ), исправляющая линии уровня целевой функции [9]. В новых переменных она уже не является овражной.

Предлагаемый статистический (адаптивный) подход к поиску оптимальных параметров ПТК базируется на построении матрицы  $B$  замены переменных  $x = Bz$  в результате обработки текущей информации, снимаемой с траектории спуска типового алгоритма покоординатной оптимизации (возможно, неэффективно работающего).

Таким образом, генерируемая в процессе поиска информация носит статистический характер. Причем, точки, лежащие на траектории спуска, осциллируют вдоль направления наибольшей вытянутости линий уровня целевой функции. Можно показать [9], что в этом случае совпадают собственные векторы (в порядке убывания соответствующих им собственных значений) ковариационной матрицы  $H$  и обратной матрицы вторых частных производных квадратичной аппроксимации целевой функции  $G_i^{-1}$ . Поэтому с точки зрения выявления перспективных направлений поиска можно заменить матрицу  $G_i^{-1}$  статисти-

ческой оценкой ковариационной матрицей  $H$ , а формирование матрицы замены переменных  $B$  осуществлять в рамках метода главных компонент.

Подчеркнем, что анализ данных при исследовании поведения оптимизируемой функции совмещен с собственно процессом поиска, а, значит, со значительными смещениями вдоль траектории спуска. В соответствии с предложенным подходом к слабоформализованным задачам поиска оптимальных параметров ПТК проведены вычислительные эксперименты.

При этом в качестве базового метода оптимизации параметров ПТК использовался стандартный метод покоординатного спуска [7]. В адаптивном варианте метода покоординатной оптимизации использовалась замена переменных  $x=Bz$ . Здесь в качестве столбцов матрицы  $B$  выступали собственные векторы выборочной корреляционной матрицы  $R'$ , которые определялись с помощью стандартной программы, реализующей метод главных компонент [10]. Таким образом, первому собственному вектору соответствует максимальное собственное число  $\lambda_1$  матрицы  $R'$ , второму – второе по величине собственное число  $\lambda_2$  и т.д.

Сравнительный анализ результатов вычислительного эксперимента приведен в таблице 2.

Сравнение эффективности базового и адаптивного вариантов метода покоординатного спуска для тестовой овражной функции Розенброка показывает преимущество последнего по ряду важных критериев (числу итераций, числу вычислений значений целевой функции, точности достижения ее минимума и др.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод выработки предпроектных решений сложных техно-природных объектов при экологическом обосновании инвестиций, которая отличается от известных процедур структурно - параметрического синтеза ПТК совместным использованием методов морфологического анализа систем, ЛП-поиска и экспертных оценок.

Апробация метода морфологического ЛП-поиска показала возможность автоматизации выбора наилучшей структуры проектируемой системы и уточнения формулировки задачи ее параметрической оптимизации ПТК.

Рассмотрен статистический (адаптивный) подход к слабоформализованным задачам поиска оптимальных параметров в рамках выбранной структуры ПТК, оперирующий лишь значениями целевой функции. Предлагаемая вычислительная схема модернизированных алгоритмов покоординатной оптимизации может рассматриваться как адаптивное расширение процедур параметрического синтеза ПТК.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов подтверждают возможность повышения эффективности стандартного программного обеспечения задач безусловной минимизации нулевого порядка на основе матриц замены переменных, которые формируются путем обработки статистической информации, снимаемой с траектории поиска, методом главных компонент.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение «Об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в Российской Федерации» РФ

Таблица 2

Результаты вычислительных экспериментов для тестовой функции Розенброка

$$f(x) = (1 - x_1)^2 + 100(x_2 - x_1^2)^2$$

Метод безусловной оптимизации	Число итераций	Число вычислений целевой функции	Начальная точка	Значение функции в начальной точке	Рекордная точка	Значение функции в рекордной точке
1. Типовой метод покоординатного спуска	100	889	-1.2, 1.0	24.19	0.42, 0.18	0.329
2. Адаптивный метод покоординатного спуска	80	719	-1.2, 1.0	24.19	0.86, 0.74	0.018

Примечание. Координаты оптимальной точки  $x^*=(1,1)$ , оптимальное значение целевой функции  $f(x^*)=0$

(Утв. Приказом Госкомэкологии от 16 мая 2000 года № 372).

2. *Умывакин В.М.* Интегральная эколого-хозяйственная оценка и управление земельными ресурсами в регионе - В.М. Умывакин, Воронеж: ВГПУ, 2002. - 178 с.

3. *Zwicky F.* Morphological astronomy. - Berlin: Springer, 1957. - 299 p.

4. Одрин В.М. Морфологический анализ систем: Построение морфологических таблиц - В.М. Одрин, С.С. Катавов, Киев: Наукова думка, 1977. - 148 с.

5. *Соболь И.М.* Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями - И.М. Соболь, Р.Б. Статников, М.: Наука, 1981. - 110 с.

6. *Статников И.Н.* ППП-поиск и его реализация в среде MATLAB - И.Н.Статников, Г.И. Фирсов // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB.- М.: ИПУ РАН, 2004. - С. 398-411.

7. *Ларичев О.И.* Методы поиска локального экстремума овражных функций - О.И. Ларичев, Г.Г. Горвиц. - М.: Наука, 1989. - 95 с.

8. Черноруцкий И.Г. Методы оптимизации в теории управления - И.Г. Черноруцкий. - СПб.: Питер, 2004. - 256 с.

9. *Бурков В.Н.* Как управлять проектами - В.Н. Бурков, Д.А. Новиков. - М.: СИНТЕГ-ГЕО, 1997. - 188 с.

10. *Каплинский А.И.* Алгоритмизация и моделирование слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем - А.И.Каплинский, И.Б. Руссман, В.М. Умывакин. - Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. - 168 с.

11. Методические рекомендации по обеспечению природоохранных требований при проектировании автомобильных дорог в центральной полосе Европейской части России / Пешков А.С., Плетникова И.П., Цирин Э.В. и др. - М.: ВНИИприроды. - 222 с.

12. *Айвазян С.А.* Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности - С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков и др. - М.: Финансы и статистика, 1989. - 607 с.

---

**Умывакин Василий Митрофанович** - доктор географических наук, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Воронежский Государственный Университет. Тел. 8-910-241-96-86. E-mail: [umyvakin@mail.ru](mailto:umyvakin@mail.ru).

**Федорова Яна Андреевна** - аспирант Воронежский Государственный Университет. Тел. 8-920-40-238-36. E-mail: [yanker85@mail.ru](mailto:yanker85@mail.ru).

**Минаева Наталья Александровна** - инженер кафедры Математических методов исследования операций, Воронежский Государственный Университет. E-mail: [minaevantx@rambler.ru](mailto:minaevantx@rambler.ru).

**Umyvakin V.M.** - Dr. of geographical sciences, Candidate of technical sciences, The senior scientific employee of Voronezh State University. Tel. 8-910-241-96-86. E-mail: [umyvakin@mail.ru](mailto:umyvakin@mail.ru).

**Fedorova Y.A.** - post-graduate student of Voronezh State University. Tel. 8-920-40-238-36. E-mail: [yanker85@mail.ru](mailto:yanker85@mail.ru).

**Minaeva N.A.** - engineer of dept. of the Mathematical Methods of Operation Research, Voronezh State University. E-mail: [minaevantx@rambler.ru](mailto:minaevantx@rambler.ru).