

УДК 338.2:681

ББК 65В631

3 28

Е.Н. Захарова

## О когнитивном моделировании устойчивого развития социально-экономических систем

(Рецензирована)

### **Аннотация:**

Рассматриваются различные аспекты устойчивости систем. Предлагается система критериев в качестве оценки устойчивости социально-экономической системы и когнитивный подход к ее использованию.

### **Ключевые слова:**

Устойчивое развитие, социально-экономическая система, индикаторы, когнитивная модель, импульсное моделирование.

Возникновение понятия и концепции устойчивого развития было вызвано социально-экономическим кризисом, который охватил планету во второй половине XX века. Это кризис можно определить как кризис во взаимодействии природы и общества, он был обусловлен социально-экономическими причинами, непродуманными действиями человека, результатом чего явилось истощение и разрушение природной среды обитания, подрыв механизмов саморегулирования экологических систем.

Термин «устойчивое развитие» получил широкое распространение после публикации доклада, подготовленного для ООН в 1987 г. специально созданной Международной комиссией по окружающей среде и развитию, известной как комиссия Брунтланд. В докладе Гру Харлем Брунтланд было сказано: «Устойчивое развитие – это такое развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, но не ставит под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности. Оно включает два ключевых понятия:

- понятие потребностей, в частности, потребностей, необходимых для существования беднейших слоев населения, которые должны быть предметом первостепенного приоритета;

- понятие ограничений, обусловленных состоянием технологии и организации общества, накладываемых на способность окружающей

среды удовлетворять нынешние и будущие потребности» [9].

Сами термины – sustainable development, sustainability – можно перевести как развитие, поддерживающее равновесие.

В русском языке нет более близкого к этому понятию, чем понятие «ноосферного развития», которое было введено академиком В.И. Вернадским.

А.Д. Урсул и А.А. Романович [13] определяют устойчивое развитие как стратегию социоприродного развития, которая обеспечивает выживание и непрерывный прогресс общества и не разрушает окружающую природную среду.

О.Л. Кузнецов и Б.Е. Большаков [7] также рассматривают устойчивое развитие как сбалансированное взаимодействие общества и природы, осуществляемое в триаде: природа-общество-человек.

Применительно к экономическим системам существует определение устойчивости, данное Л.Л. Тереховым [11]: «устойчивость – это способность системы функционировать в состояниях, близких к равновесным, в условиях постоянных внешних и внутренних возмущающих воздействий».

Обсуждение проблемы реализации идеи устойчивого развития не привело пока к появлению общепризнанной системы научных взглядов на механизм ее постановки и решения. Тем не менее, в практической плоскости вопрос начинает приобретать предметные очертания.

Уже сейчас можно говорить о региональной составляющей обеспечения перехода к устойчивому развитию – появился ряд работ [4, 10, 12], в которых рассматриваются стратегии устойчивого развития для отдельных регионов.

Решение о близости конкретного региона к устойчивому состоянию, о возможности перехода его на траекторию устойчивого развития необходимо принимать по результатам всестороннего системного анализа его экономического, экологического, политического, военного, социального, демографического, ресурсного состояния, информационной базы, системы мониторинга, управленческих мероприятий. Разработка любых моделей устойчивого развития (УР), независимо от масштаба задачи, будь то страна или регион, предваряется установлением критериев и показателей – индикаторов устойчивого развития, а также определением приоритетов устойчивого развития.

Конкретные исследования в области УР требуют более конструктивного определения этого понятия. В книге [10] на основании существующих определений понятия «устойчивость» с позиций теории управления и методов оценки устойчивости систем приведено определение, которое положим в основу данного исследования:

«устойчивое развитие системы – это сложное динамическое свойство класса управляемости, сочетающее в себе требования:

1) попадания траектории развития за определенное время в целевое множество состояний;

2) не выхода ее на прогнозном интервале времени из некоторого множества «безопасных» состояний;

3) почти монотонного возрастания некоторых показателей развития (например, уровня жизни и др.) на определенном интервале времени с последующим сохранением их в заданных интервалах допустимых значений;

4) асимптотической устойчивости (стабилизированности) программной траектории;

5) гармонизации интересов сторон».

В данной работе предлагается в качестве оценки устойчивости развития социально-экономической системы региона принять указанную систему критериев.

Применение первого и второго критерия традиционно. Эти критерии диктуют выбор оп-

ределенных показателей (индикаторов) экономической устойчивости объекта исследования, которые будут описывать и характеризовать эволюцию производства, уровень его количественных и качественных параметров в системе мировой статистики. Важное значение имеют не сами показатели, а их пороговые значения, т.е. предельные величины, несоблюдение значений которых препятствует нормальному ходу развития воспроизводства, приводит к формированию негативных, разрушительных тенденций в экономической безопасности.

Показатели (индикаторы), по которым определены пороговые значения, выступают системой показателей экономической устойчивости и безопасности. В идеальном случае устойчивость достигается при условии, что весь комплекс показателей находится в пределах допустимых границ своих пороговых значений, а пороговые значения одного показателя достигаются не в ущерб другим.

Среди индикаторов – уровень изменения ВВП (ВРП) по отношению к базовому, уровень продовольственной безопасности, доля в экспорте продукции обрабатывающей промышленности, ассигнования на науку, доля населения, живущего за порогом бедности, средняя продолжительность жизни и др.

Выявление угроз экономической устойчивости осуществляется с помощью мониторинга (систематического сопоставления действительного положения дел в экономике с желаемым) показателей экономики региона. Непосредственный отбор показателей (индикаторов) для мониторинга требует специальной проработки. Для точного определения «диагноза» состояния экономики, выявления и устранения опасных тенденций, необходима комплексная оценка пороговых значений всех показателей, что в свою очередь требует дополнительного углубленного исследования на основе классических и неклассических зависимостей экономических параметров.

Анализ показателей-индикаторов для Республики Адыгея показал явное отставание от пороговых значений. Так, например, уровень продовольственной зависимости в 2004 г. составлял 45% (пороговое – 30-35%), доля в экспорте продукции обрабатывающей промышленности составляла 14% (пороговое 45%). Это

означает, что по первым двум критериям развитие Республики нельзя назвать устойчивым.

Использование системы индикаторов в качестве критерия несомненно необходимо, но в нем не проявлена возможность того, каким образом обеспечить выполнение этого условия. Такой критерий раскрывает не все аспекты устойчивости.

Для исследования устойчивости по третьему и четвертому из системы предложенных критериев применим известные методы [2] исследования устойчивости систем, которые адаптируем к конкретным социально-экономическим объектам. Для этого предварительно приведем ряд известных понятий, определений и теорем теории устойчивости.

Основным вопросом при таких исследованиях является вопрос: будет ли поведение системы существенно меняться в результате изменений (желательных, нежелательных, неизвестных, непредсказуемых) в режиме естественного эволюционного развития, а также в режиме управления? Или: будет ли система устойчиво выполнять свои функции при изменениях внешней и внутренней среды?

Это вербальная постановка вопроса. Формализация проблемы устойчивости и ее решение зависят от вида математической модели данной системы и исследуемого аспекта устойчивости. Рассмотрим различные подходы к математическому исследованию устойчивости.

Можно выделить два основных класса задач исследования устойчивости: «классическая» устойчивость и структурная устойчивость систем, каждая из которых может исследоваться на различных математических моделях внутреннего или внешнего описания.

При внутреннем описании [1], когда предполагается, что изменяется только окружающая среда, имеются классические результаты Ляпунова, Пуанкаре и других исследователей. Внутреннее описание – это описание динамики протекающих в объекте процессов на языке дифференциальных или разностных уравнений в терминах некоторых естественных переменных  $x$ , например, скорость, положение и т.д. Главная особенность классических понятий устойчивости состоит в том, что они относятся к одной конкретной системе и поведению ее траекторий в окрестности точки равновесия (области притяжения). Исследуются результаты внеш-

них воздействий на фиксированные системы, когда изменяется только окружающая среда, но не сама система.

Уровень устойчивости объекта характеризует близость реального состояния объекта к состоянию равновесия, а также необходимое усилие для вывода системы из состояния равновесия или возвращения его в таковое

Для указанных выше задач возникает ряд математических трудностей, связанных с тем, как определить, что такое «малые возмущения», траектории «близкие к началу координат», «близкие системы», «траектории, топологически подобные одна другой», тем более это трудно сделать для социально-экономических систем при механическом перенесении на них поставленных задач устойчивого развития.

Для анализа слабоструктурированных проблем сложных систем в настоящее время активно используется когнитивный подход, теоретические основы которого были заложены учеными-психологами, в нашей стране это направление успешно развивается в Институте проблем управления РАН [13].

В когнитивном анализе и моделировании исследование сложной системы начинается с решения задачи ее идентификации в виде когнитивной модели [4], одна из общих форм которой – параметрический векторный функциональный граф – это кортеж

$$\Phi_{\Pi} \langle \langle V, E \rangle, X, F, \theta \rangle, \quad (1)$$

в котором:

1)  $G = \langle V, E \rangle$ ,  $V = \{v_i \mid v_i \in V, i=1, 2, \dots, k\}$ ;  $E = \{e_{ij} \mid e_{ij} \in E, i, j=1, 2, \dots, k\}$ ;  $G$  – ориентированный граф (когнитивная карта),  $V$  – множество вершин, вершины («концепты»)  $V_i \in V, i=1, 2, \dots, k$  являются элементами изучаемой системы;  $E$  – множество дуг, дуги  $e_{ij} \in E, i, j=1, 2, \dots, N$ , отражают взаимосвязь между вершинами  $V_i$  и  $V_j$ ; влияние  $V_i$  на  $V_j$  в изучаемой ситуации может быть положительным (знак «+» над дугой), если увеличение (уменьшение) одного фактора приводит к увеличению (уменьшению) другого, и отрицательным (знак «-» над дугой), если увеличение (уменьшение) одного фактора приводит к уменьшению (увеличению) другого, или отсутствовать.

2)  $X: V \rightarrow \theta$ ,  $X$  – множество параметров вершин,  $X = \{X^{(v_i)} \mid X^{(v_i)} \in X, i=1, 2, \dots, k\}$ ,

$X^{(v_i)} = \{x_g^{(i)}\}$ ,  $g=1,2,\dots,l$ .  $x_g^{(i)}$  –  $g$  – параметр вершины  $V_i$ , если  $g=1$ , то  $x_g^{(i)} = x_i$ ;  $\theta$  – пространство параметров вершин, т.е. каждой вершине ставится в соответствие вектор независимых переменных.

3)  $F=F(X, E)$  – функционал преобразования дуг,  $F: E \times X \times \theta \rightarrow R$ .

Зависимость  $f_{ij}$  может быть не только функциональной, но и стохастической, в виде уравнений регрессий. Определение параметров характеристики  $f_{ij}$  включает в себя определение шкалы, показателей, метода, точности, единицы измерения.

Когнитивная карта помимо графического изображения (рис.1) может быть представлена матрицей отношения  $A_G$  – это квадратная матрица, строки и столбцы которой помечены вершинами графа, а на пересечении  $i$ -строки,  $j$ -столбца стоят (или нет) единицы, если существует (не существует) отношение между элементами  $V_i$  и  $V_j$ , т.е.

$$A_G = [a_{ij}]_{k \times k},$$

где отношение

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{если } V_i \text{ связано с } V_j \\ 0 & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (2)$$

Отношение  $a_{ij}$  может принимать значение «+1» или «-1». Отношение между переменными (взаимодействие факторов) – это количественное или качественное описание влияния изменения одной переменной на другие.

Переменными концептов могут быть, например, политические альтернативы, экономические причины и их эффекты, валовой национальный продукт и финансирование образования, параметры экономических законов, цели и необходимые средства их достижения.

На рис.1 представлена когнитивная модель региональной социально-экономической системы, в основу которой положена схема региональной экономической системы А.Г. Гранберга [3].

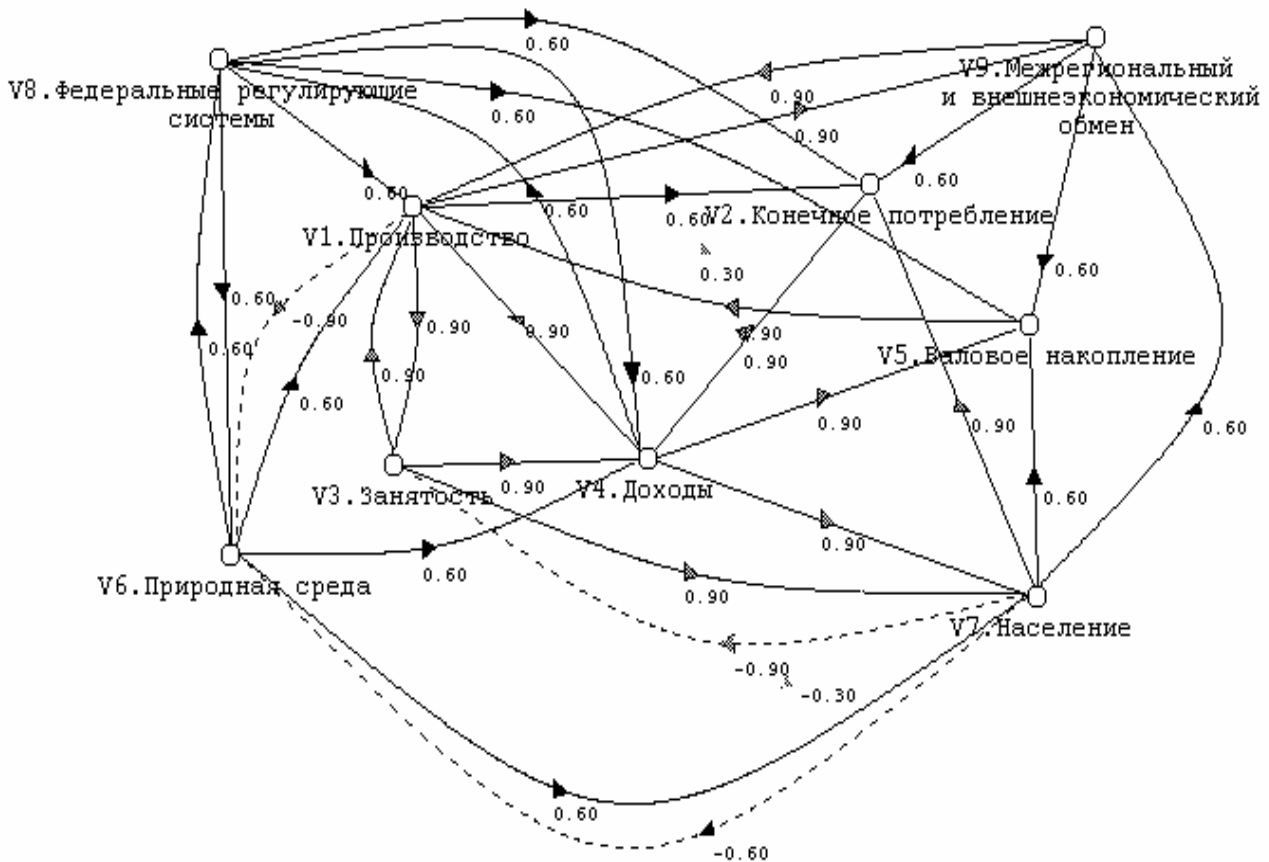


Рис.1. Когнитивная модель региональной социально-экономической системы

На рис. 1 вершины  $V$  имеют следующий смысл:

$V1$  – конечное потребление,  $V2$  – производство,  $V3$  – занятость,  $V4$  – доходы населения,  $V5$  – валовое накопление,  $V6$  – федеральные регулирующие системы,  $V7$  – межрегиональный и внешнеэкономический обмен,  $V8$  – природная среда,  $V9$  – население.

Качественный анализ когнитивной модели (содержания составляющих ее блоков, целевых и управляющих факторов, анализ путей и циклов, причинно-следственных связей и их характера) не раскрывает всей глубины явлений и процессов, протекающих в реальной системе. Поэтому следующим этапом исследования является моделирование импульсного процесса распространения возмущений, т.е. перехода системы из одного состояния в другое либо эволюционным путем, либо под воздействием управляющих или возмущающих воздействий. Каждый такой импульсный процесс является возможным сценарием развития системы. Этот способ изучения динамики процессов проще, чем аналитическое исследование моделей поведения в виде систем дифференциальных уравнений, которые затруднительно строить для социальных, экономических, экологических и т.п. объектов. Кроме того, импульсное моделирование на когнитивных картах, являющихся «внешним» описанием систем, позволяет изучать тенденции динамических изменений для всей системы в целом.

Для проведения импульсного моделирования в одной из вершин графа задается определенное изменение. Эта вершина актуализирует всю систему показателей, т.е. связанных с ней в большей или меньшей степени вершин.

В общем случае, если имеется несколько вершин  $V_j$ , смежных с  $V_i$ , то процесс распространения возмущения по графу при наличии внутренних импульсов  $P_j$  и отсутствии внешних возмущений определяется правилом

$$X_i(n+1) = X_i(n) + \sum f(X_i, X_j, e_{ij}) P_j(n) \quad (3)$$

при известных начальных значениях  $X(n=0)$  во всех вершинах и начальном векторе возмущения  $P(0)$ .

При наличии внешних возмущений  $Q_i$  импульсный процесс определяется правилом

$$X_i(n+1) = X_i(n) + \sum f(X_i, X_j, e_{ij}) P_j(n) + Q_i(n+1) \quad (4)$$

Модель импульсных процессов может быть представлена в матричном виде, что удобнее

при моделировании на знаковых графах. Пусть вектор параметров вершин в момент времени  $t$  задается уравнением (4). Тогда изменения параметров вершин в общем случае задаются следующим уравнением:

$$X_i(n+1) = X(n) + AP(n) + Q_i(n+1), \quad (5)$$

где  $A$  – матрица отношений графа  $G$  когнитивной карты.

Получим из уравнения (5) с учетом (4) для  $P(n)$ :

$$P(n) = A^{n-1}Q_0 + A^{n-2}Q_1 + \dots + AQ_{n-2} + IQ_{n-1}, \quad (6)$$

где  $I$  – единичная матрица. Анализ устойчивости системы, моделируемой взвешенным ориентированным графом, требует применение специфического математического аппарата. Рассмотрим уже существующие результаты такого анализа [6], чтобы адаптировать их к анализу устойчивости региональной социально-экономической системы.

При исследовании устойчивости взвешенного ориентированного графа – когнитивной карты – исследуется устойчивость по значению и устойчивость по возмущению системы по мере ее эволюции. Известны теоремы [6]:

Вершина  $V_j$  устойчива по значению, если последовательность значений  $\{x(t) | t=0,1,\dots\}$  ограничена.

Вершина  $V_j$  устойчива по возмущению, если ограничена последовательность импульсов  $\{p_j(t) | t=0,1,\dots\}$ .

Взвешенный орграф устойчив по возмущению (значению), если каждая его вершина обладает этим свойством.

Устойчивость по возмущению не означает наличия устойчивости по значению, хотя обратное и справедливо.

Между введенными понятиями устойчивости, соответствующей внутреннему описанию, и устойчивостью систем типа «черный ящик» (внешнее описание) имеет место явная аналогия, хотя имеется принципиальное существенное отличие в математическом описании.

Представим понятия алгебраического критерия устойчивости по возмущению и начальному значению и рассмотрим связь устойчивости графа с его топологической структурой, опираясь на известные работы [6, 8].

Основопологающим представлением при разработке критериев устойчивости графов является представление о характеристических

значениях матрицы отношений графа – когнитивной модели системы [6].

Пусть матрица взаимосвязи  $A$  для графа определена следующим образом:

$$A=[a_{ij}], a_{ij}=f(v_i, v_j), i,j=1,2,\dots,n,$$

где  $v_i, v_j$  – вершины графа,  $f(v_i, v_j)$  – весовая функция.

Характеристические значения графа определяются как собственные значения матрицы  $A$  (собственные значения – это корни характеристического многочлена матрицы,  $Y(\lambda)=|\lambda I-A|$ ,  $\lambda$  – характеристическая матрица для  $A$ , независимая переменная;  $I$  – единичная матрица).

Теорема о распространении возмущения. Для простого процесса распространения возмущения, начинающегося в вершине  $V_j$ , имеем:

$$p_j(t)=[A^t]_{ij} \quad X_j(t)=X_j(0)+[I+A+A^2+\dots+A^t]_{ij} \quad (7)$$

где  $A$  – матрица отношений для данного орграфа,  $[ \cdot ]_{ij}$  – элемент соответствующей матрицы, стоящий на пересечении  $i$ -строки и  $j$ -столбца.

Положение равновесных состояний и соответствующих областей притяжения зависит от динамических свойств изучаемой системы и может изменяться. Поэтому возникает еще один вопрос: поведет ли небольшое изменение системы к смещению состояния равновесия? Следовательно, в отличие от классической теории устойчивости, не рассматривавшей изменения в системе, а только возмущения в окружающей среде, необходимо изучать проблемы устойчивости при структурных изменениях самой системы – эти изменения, даже малые, могут привести к резким качественным изменениям в дальнейшем поведении системы.

Существует «комбинированное» понятие устойчивости, сочетающее классически идеи Ляпунова с комбинаторно-топологическим подходом, – понятие связной устойчивости, которое первоначально возникло в связи с изучением вопросов равновесия в экономике [14].

При изучении связной устойчивости задача формулируется так: останется ли состояние равновесия данной системы устойчивым в смысле Ляпунова вне зависимости от двойных связей между состояниями системы?

Состояние равновесия  $X=0$  считается связноустойчивым, если оно устойчиво по Ляпунову для всех возможных матриц взаимосвязи  $A$ .

Изучение связной устойчивости имеет практический интерес особенно при исследовании организационных систем, таких, как эко-

номическая система. Это обуславливается тем, что при описании процессов в этих системах наличие или отсутствие данной связи не всегда может быть очевидным вследствие нарушений работы самой системы, наличия возмущений, известной субъективности математической модели системы.

Центральным элементом современных взглядов на устойчивость является понятие структурной устойчивости, которое рассмотрим далее.

Основной задачей исследования структурной устойчивости является выявление качественных изменений в траектории движения системы при изменениях структуры самой системы, т.е. изучается поведение системы по отношению всех «близких» к ней аналогичных систем.

Возникает необходимость рассматривать группу систем, «близких» к некоторой стандартной, т.е. мы имеем дело с семейством траекторий, которое необходимо исследовать. В такой ситуации говорят о *структурной устойчивости* [6].

Систему называют структурно устойчивой, если топологический характер траекторий всех близких к ней систем такой же, как у стандартной.

Таким образом, свойство структурной устойчивости состоит в том, что рассматриваемая система ведет себя почти также, как и близкие к ней; в противоположном случае – система структурно неустойчива.

Уровень структурной устойчивости характеризует обобщенные сведения о степени устойчивости системы или отдельных ее элементов к внешним и внутренним возмущениям заданной природы. Центральным элементом понятия «структурной устойчивости» является выделение и анализ качественных изменений в траектории движения системы в фазовом пространстве при изменении структуры самой системы.

Можно выделить две группы методов математического анализа структурной устойчивости модели, записанных на языке знаковых орграфов. Первый основан на ряде теорем, связывающих спектр орграфа с его устойчивостью в простых импульсных процессах, второй – на преобразовании исходного знакового орграфа в матричную модель с подробным анализом по-

следней. Структурная устойчивость системы может быть установлена путем анализа циклов когнитивной карты.

Для анализа устойчивости социально-экономических систем была создана программная система когнитивного моделирования (ПС КМ) [5]. В частности, исследование социально-экономической системы Республики Адыгея с помощью ПС КМ показало отсутствие ее устойчивости как по возмущениям, так и по начальному значению, а также отсутствие структурной устойчивости.

#### Примечания:

1. Барбашин Е. И. Введение в теорию устойчивости. – М.: Наука, 1967.
2. Волкова В.Н., Денисов А.А. Основы теории систем и системного анализа: Уч. – СПб.: Изд. СПбГТУ, 1998.
3. Гранберг А.Г. Основы региональной экономики: Учебник для вузов. – М.: ГУ ВШЭ, 2000.
4. Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Гинис Л.А. Когнитивный анализ и моделирование устойчивого развития социально-экономических систем. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2005. – 288 с.
5. Горелова Г.В., Захарова Е.Н., Радченко С.А. Когнитивная технология системного анализа в применении к задачам устойчивого развития региональной социально-экономической системы / Сб. трудов IX Международной научно-практической конф. «Системный анализ в проектировании и управлении». – СПб.: СПбГПУ, 2005.
6. Касти Дж. Большие системы: связность, сложность и катастрофы. – М.: Мир, 1982.
7. Кузнецов О.Л., Большаков Б.Е. Устойчивое развитие: научные основы проектирования в системе природа – общество – человек // Изд-во «Гуманистика», Санкт-Петербург – Москва – Дубна, 2002.
8. Кульба В.В., Ковалевский С.В., Кононов Д.А., Чернов И.В., Шелков А.Б. Проблемы обеспечения экономической безопасности сложных социально-экономических систем. – М., 2000.
9. Наше общее будущее. Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1989.
10. Новая парадигма развития России (комплексные проблемы устойчивого развития) / Под ред. В.А. Коптюга, В.М. Матросова, В.К. Левашова. – М.: Академия, Изд-во МГУК, 1999.
11. Терехов Л.Л. Социально-экономическое прогнозирование: Учебн. пособие. – Ростов н/Д: Изд-во РГПУ, 1995.
12. Умаханов М.И. Устойчивое развитие региона: модель, основные направления, концепция: монография / М.И. Умаханов, Р.Д. Шахпазова. – М.: ЮНИТИ-ДАНА: Закон и право, 2006. 143 с.
13. Урсул А.Д., Романович А.А. Безопасность и устойчивое развитие: философско-концептуальные проблемы. – М., 2001.
14. Siljak D. Stability of Large-scale Systems under Structural Perturbations, IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC – 2, 657 – 663 (1972).