

## Методы системной динамики при анализе социально-экономического развития стран и регионов

Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Аверин Е.Г.

Донецкий национальный технический университет,  
averin@cs.dgtu.donetsk.ua, Zviagintseva@cs.dgtu.donetsk.ua

### Abstract

*Averin G., Zviagintseva A., Averin E. "Methods of system dynamics at the analysis of social and economic development of countries and regions" The characteristic of methods of the analysis of social and economic development of the countries and regions is given. The objective social and economic development estimation method based on countries' human potential status equations is offered. The generalized criteria for a comprehensive estimation of complex systems state are formulated.*

### Введение

Научные методы стратегического прогнозирования и планирования крайне разнообразны, однако, в настоящее время не существует фундаментальной теории, которая характеризовала бы социально-экономическое и экологическое развитие стран и регионов. Сегодня каждый город и административный район страны во исполнении закона Украины «О государственном прогнозировании и разработке программ экономического и социального развития Украины», регулярно разрабатывает годовые и перспективные программы социально-экономического развития. Однако основной принцип создания таких программ – планирование от достигнутого в рамках имеющихся средств. При этом количество требующих анализа социально-экономических, демографических, экологических и др. показателей может достигать несколько сотен. Несмотря на важность данного вопроса, в этой области практически отсутствуют методы и средства поддержки принятия решений. В научном и практическом плане сейчас основным инструментом планирования являются процедуры стратегической оценки – учет комплекса требований при принятии стратегических решений о социально-экономическом и экологическом развитии. Однако, на современном уровне становления научной теории вопрос о том, при каких условиях сложная система может удовлетворять выставленному комплексу требований, остается открытым.

Принятый в первом чтении Закон Украины «О государственном прогнозировании и стратегическом планировании в Украине» предполагает повсеместное использование системного подхода при государственном прогнозировании и разработке программ

экономического и социального развития страны. Принцип системности предусматривает реализацию требований общей теории систем, когда социально-экономическая система государства рассматривается как большая сложная система, которая, в свою очередь, является частью более общей сложной системы – международной глобальной организации человеческого общества [1]. Принцип научной обоснованности декларирует, что в основу прогнозирования и планирования должен быть положен учет законов развития (экономического, социального, демографического, экологического и т.п.) как объекта планирования, так и практики планирования (принимаемых решений). Таким образом, проект закона рассматривает объект планирования как управляемую систему, где принимаемые решения могут приводить к различным сценариям развития этой системы [1].

Декларировать в документах подобные положения легче, чем осуществить это на практике. В настоящее время в науке об экономике и обществе не используется объективный подход, так как законы развития экономических и общественных сложных систем не установлены. Кроме того, сегодня отсутствуют единые базы данных социально-экономических, финансовых, демографических, экологических и др. показателей объектов планирования (областей, территорий, страны в целом), доступные широкой научной общественности и дающие возможность поиска подобных законов. Именно поэтому в стратегической оценке применяются преимущественно экспертные методы. Хотя экспертные методы в своей реализации представляются достаточно простыми, их недостатком является выраженный субъективный подход эксперта при прогнозировании и планировании, а также

фактор “утопизма” – подспудное желание выдать ожидаемое за действительное.

В настоящее время основной прогресс в совершенствовании теории прогнозирования развития стран и регионов связан с использованием индикаторов и индексов. Эти величины считаются обобщенными показателями, которые характеризуют состояние и динамику социально-экономических и экологических систем. Изучение различных индикаторов позволяет оценить уровень социальных, экологических и техногенных воздействий и проанализировать их последствия. При этом вопрос об информативности индикаторов и индексов при описании процессов развития, а также их связей между собой и с поведением системы в целом остается пока открытым.

В данной теории отсутствуют базовые методические предпосылки, связанные с использованием тех или иных законов сохранения или специальных форм уравнений состояний, которые отличались бы системным единообразием, а также обоснованным перечнем исходных независимых показателей для оценки.

Таким образом, развитие системы государственного прогнозирования и планирования должно осуществляться путем совершенствования методологии стратегической оценки [2, 3] и особенно, используемых в ней системных методов анализа.

### **Совершенствование методологии анализа социально-экономического и экологического развития**

Анализ процессов развития и стратегическое прогнозирование сегодня осуществляются практически во всех странах мира как упреждающий инструмент социальной и экологической политики. При этом практическим инструментом анализа в процедурах стратегической оценки выступают методы прогностики [4], которые отличаются крайне широким разнообразием экспертных подходов, а также существующие методы комплексной оценки.

В системной динамике оценка социально-экономического и экологического развития представляет собой не что иное, как задачу распознавания образов по комплексу показателей среди значительного числа объектов одного класса. При этом существующая методология сравнительного анализа предполагает выбор опорного состояния определенного объекта и ранжирование состояний всех других объектов относительно него. Соответствующие методы позволяют преобразовать матрицы данных к интегральным

индексам или набору комплексных показателей, по которым и может проводиться оценка. Существует множество алгоритмов для распознавания образов, относящихся к явлениям различной природы.

Создание информационных баз данных социально-экономических и экологических показателей стран и регионов дает возможность применить современные методы поиска закономерностей в массивах информации (Data mining – интеллектуальный анализ данных). Методы анализа данных (кластеризация, процедуры поиска телеконнекций, ассоциативный анализ, регрессионные деревья, метод аналогий и т.д.) широко применяются в фундаментальной физике, климатологии, биоинформатике, компьютерных сетях и Интернет, медицине, вычислительном эксперименте в физике и технике, анализе социальной преступности и т.д.

Данный путь позволяет также вести разработки информационных систем, отличающихся расширенными прогнозными и поисковыми возможностями для стратегического планирования. Разработка подобных систем в политическом плане имеет большое значение, так как они в будущем могут стать инструментом поддержки принятия управленческих решений, осуществляемых властью на местном, государственном и глобальном уровне.

Для теоретического обоснования методов анализа социально-экономического и экологического состояния объектов воспользуемся системным подходом [5] и методологией системодинамики, которая обосновывается в статьях данного сборника.

Подобные подходы имеют важное значение в интеллектуальном анализе данных, так как позволяют формулировать объективные методы анализа поведения систем  $n$ -мерной размерности.

Базовые идеи [5] для физических систем основаны на том, что термодинамическая форма уравнения сохранения энергии отличается полным единообразием структуры всех входящих в его состав слагаемых, которые относятся к явлениям различной физической природы. Впервые эта идея была предложена Гухманом.

Данный подход имеет значение и для стратегической оценки, если предположить существование некоторой универсальной функции состояния экосистемы (определим экосистему как экологическую, экономическую или социальную систему), которая, конечно же, не будет являться энергией в обычном физическом понимании. Таким образом, в основу теории предполагается положить методические предпосылки, связанные с

применением специальных форм уравнений сохранения количества воздействий, которые отличались бы системным единообразием.

Обычно под воздействием понимают любое действие на объект, которое влияет на него и приводит к наблюдаемым изменениям. В свою очередь, количество воздействия определяется как количественный параметр, позволяющий оценить уровень действия внешних сил на объект. При этом наблюдаемые изменения в экосистеме – это качественная или количественная переменная свойств экосистемы в результате осуществляемых на нее воздействий.

В системном анализе и общей теории систем количество воздействия, которое оказывает влияние на объект или систему при изменении  $z_k$ -ого свойства, определяется в виде [5]:

$$dQ_k = P_k \cdot dz_k, \quad (1)$$

где  $P_k$  – потенциалы;  $z_k$  – координаты.

Координаты – это независимые переменные, определяющие свойства, изменение которых является наиболее характерным проявлением реакции системы на воздействие. Потенциалы характеризуют взаимодействие системы с окружающей средой.

Основное дифференциальное уравнение для определения функции состояния системы  $u$  в качестве фундаментального закона (например, в физике – это первое начало термодинамики) через потенциалы и координаты представляют в следующем виде:

$$du = \sum_{k=1}^n P_k \cdot dz_k, \quad (2)$$

где  $n$  – число степеней свободы системы, которое определяется количеством свойств, подверженных изменению.

Таким образом, предположим, что существует универсальная функция состояния экосистемы ( $u$ ), которая однозначно связана с координатами состояния. Будем считать, что в любом состоянии экосистемы данная функция может иметь только одно определенное значение. Ранее эта функция была названа общей мерой состояния системы. Будем считать эту величину безразмерной. Иными словами, общая мера системы вполне определяется заданием ее состояния. Для этого необходимо определить значения всех координат состояния системы. Таким образом, общая мера является однозначной функцией координат состояния вида (3):

$$u = u(z_1, z_2, \dots, z_n). \quad (3)$$

Сформулируем следующую гипотезу. Будем считать, что мера  $u$  является функцией состояния, для которой изменение величины в каком-либо процессе не зависит от характера процесса и определяется только начальным и конечным состоянием системы, т.е. величина

$du$  является полным дифференциалом. На основе изложенного элементарные изменения функции состояния  $du$  экосистемы непосредственно могут быть поставлены в связь с соответствующими количествами воздействия  $dQ_k$ . Другими словами имеем зависимость вида:

$$du = \sum_{k=1}^n dQ_k = \sum_{k=1}^n P_k \cdot dz_k = \sum_{k=1}^n \frac{\partial u}{\partial z_k} \cdot dz_k. \quad (4)$$

Теперь итог изложенного можно коротко сформулировать следующим образом: любое взаимодействие системы с окружающей средой имеет своим необходимым следствием изменение общей меры системы на величину, равную количеству воздействия. При этом понятие количество воздействия может быть поставлено в связь только с процессом изменения состояния системы.

Таким образом, целью моделирования системы любой природы является построение закономерности вида (4), которая представляет собой некоторый закон сохранения или точнее зависимость для общей меры системы. Причем построение такой зависимости предполагает, что на всем возможном множестве состояний системы выполнено некоторое преобразование координат, при котором определяются подмножества состояний, обладающие качественно однородными признаками.

Далее используем первый постулат системодинамики. Так как социально-экономические и экологические системы в своем подавляющем большинстве являются квазистатическими системами, то будем считать, что их свойства *подобны* при любых эволюционных изменениях состояний во времени относительно выбранного опорного состояния. Кроме этого предположим, что существует абсолютный индекс системы  $T$ , который в общем случае может быть представлен в виде функции независимых переменных  $z_k$ . Данный индекс комплексно характеризует качественное состояние системы и является функцией процесса. Будем считать, что он может быть теоретически определен и в последующем количественно измерен или оценен в балах или пунктах при длительном наблюдении за поведением системы или путем сравнения значительного количества объектов между собой. В этом случае величина  $T = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$  определяет уравнение состояния системы в координатах  $z_1, \dots, z_n$ , в отличие от уравнения (4), которое дает базовый закон для меры системы. Исходя из этих допущений и первого постулата системодинамики, абсолютный индекс системы  $T = T(z_1, z_2, \dots, z_n)$  в многомерном пространстве переменных  $z_k$  будет иметь вид однородной

функции степени  $q$ , удовлетворяющей формуле Эйлера:

$$T = \frac{1}{q} \left( z_1 \frac{\partial T}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial T}{\partial z_2} + \dots + z_n \frac{\partial T}{\partial z_n} \right). \quad (5)$$

В идеальном случае данное уравнение определяет связь между оценкой качества и наблюдаемыми свойствами для любого состояния системы, которое может быть реализовано и свойства которого могут быть параметризованы.

Для случая двух переменных данное линейное уравнение в частных производных первого порядка будет иметь вид:

$$z_1 \frac{\partial T}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial T}{\partial z_2} = q \cdot T. \quad (6)$$

Решение  $T = T(z_1, z_2)$  уравнения (6) при заданных граничных условиях геометрически представляет собой поверхность в пространстве  $z_1, z_2, T$ . Эта поверхность является интегральной поверхностью. Функции  $z_1, z_2, q \cdot T$  определяют некоторое поле направлений в указанном пространстве, а именно: в каждой фиксированной точке пространства имеется направление, направляющие косинусы которого пропорциональны  $z_1, z_2, q \cdot T$ . Согласно метода характеристик [6] интегральные кривые, соответствующие этому полю направлений, определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{dz_1}{z_1} = \frac{dz_2}{z_2} = \frac{dT}{q \cdot T} = ds. \quad (7)$$

Эти интегральные кривые называются характеристиками уравнения (6). Введем параметр  $s$ , изменяющийся вдоль характеристики. В результате система дифференциальных уравнений (7) примет вид:

$$\frac{dz_1}{ds} = z_1, \quad \frac{dz_2}{ds} = z_2, \quad \frac{dT}{ds} = q \cdot T. \quad (8)$$

Решением системы уравнений (7) являются следующие независимые интегралы:

$$\frac{z_1}{z_2} = C_1, \quad \frac{T}{z_2^q} = C_2, \quad \text{откуда} \quad (9)$$

$$T = \frac{C_2}{C_1} z_2^{q-1} \cdot z_1. \quad (10)$$

Для определения вида уравнения состояния системы введем ограничивающие условия. Так как  $z_1$  и  $z_2$  являются произвольными независимыми переменными, то из условия симметрии решения имеем:

$$z_2^{q-1} z_1 = z_1^{q-1} z_2. \quad (11)$$

Выполнение условия (11) возможно при  $q = 2$ . Таким образом, решение уравнения (6) можно представить в виде:

$$T = \frac{z_1 \cdot z_2}{R}, \quad (12)$$

где  $R$  – константа, которая определяется по опытным данным в процессе построения шкалы абсолютного индекса системы  $T$ .

Можно показать, что решение (12) характеризует линейное изменение свойств системы во времени в окрестности опорного состояния, когда  $z_1 = z_{10}$ ;  $z_2 = z_{20}$ . Параметрическое решение системы уравнений (8), выраженное через начальные значения переменных  $z_1, z_2, T$  будет [6]:

$$T = T_\tau \cdot e^s; \quad z_1 = z_{1\tau} \cdot e^{s/2}; \quad z_2 = z_{2\tau} \cdot e^{s/2}. \quad (13)$$

Предположим, что процесс изменения свойств в окрестности опорного состояния  $\{z_{10}, z_{20}, T_0\}$  определяется как:

$$z_{1\tau} = z_{10}(1 + \beta_1 \cdot \tau); \quad z_{2\tau} = z_{20}(1 + \beta_2 \cdot \tau), \quad (14)$$

тогда количественная оценка качественного состояния системы будет иметь

$$\text{вид: } T_\tau = \frac{z_{1\tau} \cdot z_{2\tau}}{R}.$$

Подставим (14) в (13) и найдем определитель

$$\Delta = z_{1\tau}' \cdot z_{2s}' - z_{1s}' \cdot z_{2\tau}' = \frac{\beta_1 - \beta_2}{2} \cdot e^s \cdot z_{10} \cdot z_{20} \neq 0,$$

который не обращается в нуль при  $s = 0$ . Исключая  $s$  и  $\tau$ , получим интегральное уравнение (12) в явном виде, где  $R = z_{10} \cdot z_{20}$  [6].

Используем сформулированную ранее гипотезу существования общей меры системы ( $u$ ) в виде уравнения (4). В этом случае величина  $du$  должна являться полным дифференциалом, и к ней может быть применен принцип Эйлера [7], позволяющий определить справедливость того, является ли форма (6) полным дифференциалом, или нет. Для двух независимых переменных необходимое и достаточное условие, при котором форма (1)  $du = P_1 dz_1 + P_2 dz_2$  является полным дифференциалом, имеет вид:

$$\left( \frac{\partial P_1}{\partial z_2} \right)_{z_1} = \left( \frac{\partial P_2}{\partial z_1} \right)_{z_2}. \quad (15)$$

При выполнении условия (15) мера системы  $u$  будет являться функцией состояния, значение которой не зависит от вида процесса при переходе системы из состояния  $A$  в состояние  $B$ .

По аналогии с термодинамикой введем величину  $\alpha$ , которая будет связывать количество воздействия  $Q$ , полученное экосистемой с изменением абсолютного индекса  $T$  в любом процессе  $l$ :

$$\alpha_l = \frac{dQ}{dT}. \quad (16)$$

Данная гипотеза предполагает, что в окрестности каждого состояния элементарное

изменение индекса экосистемы  $dT$  линейно относительно общего элементарного воздействия, действующего на экосистему  $dQ$ .

Также как и в термодинамике предположим, что величина  $\alpha_l$  может определяться экспериментально и зависит от направления процесса  $l$  (процесс  $AB$ ) в окрестности состояния  $A$ . Будем считать  $\alpha_l$  безразмерной величиной. Тогда в окрестности состояния  $A$  имеем:

$$\frac{\partial Q}{\partial z_1} = \alpha_1 \frac{\partial T}{\partial z_1}; \quad \frac{\partial Q}{\partial z_2} = \alpha_2 \frac{\partial T}{\partial z_2}. \quad (17)$$

В соответствии с (17) уравнение (6) для воздействия  $Q$  относительно свойств  $z_1$  и  $z_2$  можно представить в виде:

$$\frac{z_1}{\alpha_1} \cdot \frac{\partial Q}{\partial z_1} + \frac{z_2}{\alpha_2} \cdot \frac{\partial Q}{\partial z_2} = q \cdot T. \quad (18)$$

В идеальном случае данное уравнение определяет связь между оценкой качества системы, её свойствами и возможным воздействием в окрестности любого состояния системы при осуществлении процессов, которые могут быть реализуемы.

Характеристики уравнения (18) определяются системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида:

$$q \cdot \alpha_1 \frac{dz_1}{z_1} = q \cdot \alpha_2 \frac{dz_2}{z_2} = \frac{dQ}{T} = ds. \quad (19)$$

По аналогии с термодинамикой введем переменную  $ds = \frac{dQ}{T}$ . Определим величину  $s$  как безразмерную энтропию экосистемы. Как следует из (19), энтропия системы может быть представлена в виде характеристики уравнения (18). При этом получаем следующие закономерности.

Во-первых, элементарное количество воздействия  $dQ$  через энтропию экосистемы может быть представлено в виде  $dQ = T \cdot ds$ . Во-вторых, из (19) при  $q=2$  получаем соотношение для определения энтропии системы относительно переменных  $z_1$  и  $z_2$ .

$$ds = \frac{dQ}{T} = \alpha_1 \frac{dz_1}{z_1} + \alpha_2 \frac{dz_2}{z_2}. \quad (20)$$

Применяя к уравнению (20) признак Эйлера (15), можно показать, что  $ds$  является полным дифференциалом.

Уравнение (20) подобно уравнению энтропии, которое применяется в термодинамике, однако величина  $s$  в данном случае является безразмерной. Используя уравнение (12) и уравнение (20), построим общую меру системы  $u$  в виде:

$$\begin{aligned} du &= dQ - z_2 \cdot dz_1 = T \cdot ds - z_2 \cdot dz_1 = \\ &= \frac{\alpha_1 - R}{R} z_2 \cdot dz_1 + \frac{\alpha_2}{R} z_1 \cdot dz_2. \end{aligned} \quad (21)$$

Применяя к величине  $du$  признак Эйлера (13), можно показать, что  $du$  является полным дифференциалом при условии:

$$\alpha_1 - \alpha_2 = R. \quad (22)$$

Последнее соотношение представляет собой аналог известного в термодинамике уравнения Майера. При справедливости уравнения (22) величина  $du$  будет иметь вид:

$$du = \frac{\alpha_2}{R} d(z_1 \cdot z_2) = \alpha_2 \cdot dT. \quad (23)$$

Таким образом, на основе уравнений (6), (12), (20), (23) может быть построена идеальная модель оценки состояния экосистемы в случае двух независимых переменных. При этом из экспериментальных данных должны определяться постоянная  $R$ , характеризующая изменение свойств экосистемы относительно выбранного опорного состояния, и постоянная  $\alpha_2$ , связывающая количество воздействия с абсолютным индексом системы  $T$  при  $z_1 = const$ . В элементарной окрестности опорного состояния данная модель является абсолютно точной, при удалении от опорного состояния погрешность модели будет возрастать.

Построим общую меру состояния системы для случая трех переменных, для чего рассмотрим уравнение (5) вида:

$$z_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial z_1} + z_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial z_2} + z_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial z_3} = q \cdot T. \quad (24)$$

Решим систему характеристических уравнений:

$$\frac{dz_1}{z_1} = \frac{dz_2}{z_2} = \frac{dz_3}{z_3} = \frac{dT}{q \cdot T} = ds. \quad (25)$$

Данная система уравнений имеет следующие независимые интегралы:

$$\begin{aligned} \frac{z_1}{z_3} = C_1, \quad \frac{z_2}{z_3} = C_2, \quad \frac{T}{z_3^q} = C_3, \text{ откуда} \\ T = \frac{C_3}{C_1 \cdot C_2} \cdot z_3^{q-2} \cdot z_1 \cdot z_2. \end{aligned} \quad (26)$$

$$\text{Из условия симметрии решения} \\ z_3^{q-2} \cdot z_1 \cdot z_2 = z_1^{q-2} \cdot z_2 \cdot z_3 = z_2^{q-2} \cdot z_1 \cdot z_3$$

получим, что  $q=3$ .

Таким образом, решение уравнения (24) можем представить в виде мультипликативной функции:

$$T = \frac{z_1 \cdot z_2 \cdot z_3}{R}. \quad (27)$$

Теперь построим модель оценки состояния системы при воздействии в случае трех переменных. В окрестности состояния  $A$  имеем:

$$\frac{\partial Q}{\partial z_1} = \alpha_1 \frac{\partial Q}{\partial z_1}; \quad \frac{\partial Q}{\partial z_2} = \alpha_2 \frac{\partial Q}{\partial z_2}; \quad \frac{\partial Q}{\partial z_3} = \alpha_3 \frac{\partial Q}{\partial z_3}.$$

Из (24) получаем следующее уравнение:

$$\frac{z_1}{\alpha_1} \frac{\partial Q}{\partial z_1} + \frac{z_2}{\alpha_2} \frac{\partial Q}{\partial z_2} + \frac{z_3}{\alpha_3} \frac{\partial Q}{\partial z_3} = q \cdot T, \quad (28)$$

для которого характеристические уравнения имеют вид:

$$q \cdot \alpha_1 \frac{dz_1}{z_1} = q \cdot \alpha_2 \frac{dz_2}{z_2} = q \cdot \alpha_3 \frac{dz_3}{z_3} = \frac{dQ}{T} = ds.$$

Из этой системы при  $q=3$  получаем соотношение для энтропии экосистемы в случае трех переменных  $z_1, z_2, z_3$ :

$$ds = \frac{dQ}{T} = \alpha_1 \frac{dz_1}{z_1} + \alpha_2 \frac{dz_2}{z_2} + \alpha_3 \frac{dz_3}{z_3}. \quad (29)$$

Для построения общей меры системы  $u$ , используем уравнения (27) и (29), для чего определим элементарное количество воздействия  $dQ$ :

$$dQ = T \cdot ds = \alpha_1 \frac{z_2 z_3}{R} dz_1 + \alpha_2 \frac{z_1 z_3}{R} dz_2 + \alpha_3 \frac{z_1 z_2}{R} dz_3. \quad (30)$$

Форма (30) не является полным дифференциалом, так как  $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3$ . Преобразуем зависимость (30) таким образом, чтобы получить как слагаемое полный дифференциал  $du_1$  вида (21). Для этого добавим и вычтем в правой части уравнения (30) величину  $z_2 z_3 dz_1$ . После преобразования получим:

$$dQ = \alpha_2 z_3 d\left(\frac{z_1 z_2}{R}\right) + \frac{\alpha_3}{R} z_1 z_2 dz_3 + z_2 z_3 dz_1 \quad (31)$$

На следующем шаге выделим полный дифференциал  $du$ , добавив и исключив в (31) величину  $z_3 d(z_1 z_2)$ , тогда

$$dQ = \left(\frac{\alpha_2}{R} - 1\right) z_3 d(z_1 z_2) + \frac{\alpha_3}{R} z_1 z_2 dz_3 + z_3 d(z_1 z_2) + z_2 z_3 dz_1. \quad (32)$$

Выделим в (32) дифференциал  $du$  вида:

$$du = \left(\frac{\alpha_2}{R} - 1\right) z_3 d(z_1 z_2) + \frac{\alpha_3}{R} z_1 z_2 dz_3. \quad (33)$$

К пфаффово́й форме  $du$  может быть применен принцип Эйлера [7], позволяющий определить справедливость того, является ли форма (33) полным дифференциалом или нет. Для трех независимых переменных необходимое и достаточное условие, что форма  $du = P_1 dz_1 + P_2 dz_2 + P_3 dz_3$  является полным дифференциалом, имеет вид:

$$\left(\frac{\partial P_1}{\partial z_2}\right)_{z_1, z_3} = \left(\frac{\partial P_2}{\partial z_1}\right)_{z_2, z_3}; \quad \left(\frac{\partial P_2}{\partial z_3}\right)_{z_1, z_2} = \left(\frac{\partial P_3}{\partial z_2}\right)_{z_1, z_3};$$

$$\left(\frac{\partial P_1}{\partial z_3}\right)_{z_1, z_2} = \left(\frac{\partial P_3}{\partial z_1}\right)_{z_2, z_3}. \quad (34)$$

Применяя к (33) признак Эйлера, можно показать, что  $du$  будет полным дифференциалом при условии  $\alpha_2 - \alpha_3 = R$ , в этом случае

$$du = \frac{\alpha_3}{R} d(z_1 z_2 z_3) = \alpha_3 dT.$$

Окончательно (30) представим в виде:

$$dQ = du + 2z_2 z_3 dz_1 + z_3 z_1 dz_2. \quad (35)$$

Таким образом, в случае трех независимых переменных справедливо представление общей меры состояния системы  $u$  в виде уравнения единообразной структуры типа (4):

$$du = \left(\frac{\alpha_1 z_2 z_3}{R} - 2z_2 z_3\right) dz_1 + \left(\frac{\alpha_2 z_1 z_3}{R} - z_1 z_3\right) dz_2 + \alpha_3 \frac{z_1 z_2}{R} dz_3. \quad (36)$$

При этом согласно признаку Эйлера (34), величина  $du$  является полным дифференциалом при выполнении ранее полученных условий:

$$\begin{cases} \alpha_1 - \alpha_2 = R \\ \alpha_2 - \alpha_3 = R. \end{cases} \quad (37)$$

Потенциалы взаимодействий в случае системы с тремя переменными согласно (36) равны:

$$\begin{aligned} P_1(z_1, z_2, z_3) &= \frac{\alpha_1 z_2 z_3}{R} - 2z_2 z_3, \\ P_2(z_1, z_2, z_3) &= \frac{\alpha_2 z_1 z_3}{R} - z_1 z_3, \\ P_3(z_1, z_2, z_3) &= \frac{\alpha_3 z_1 z_2}{R}. \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, и для случая трех переменных может быть построена модель состояния экосистемы, которая в элементарной окрестности опорного состояния  $A\{z_{10}, z_{20}, z_{30}\}$  будет строгой.

Количественная оценка состояния социально-экономических и экологических систем проводится на основе использования целого ряда индикаторов и показателей [8–13]. Например, при определении индекса развития человеческого потенциала (ИРЧП) индикатор образования определяется по двум показателям, а индикаторы продолжительности жизни и ВВП соответственно – по одному [14, 15]. В целом ИРЧП в окончательном виде находится по трем сводным индикаторам. Аналогичную структуру определения имеет и индекс нищеты населения (ИНН-1). В свою очередь, индекс развития с учетом гендерного фактора (ИРГФ) имеет структуру определения, при которой три составляющих определяются по двум индикаторам и затем они сводятся в один общий индекс из трех компонентов [14, 15]. Всего в

докладах о развитии человека используется более 120 индикаторов, объединенных в 15 групп.

Аналогично, при экологической оценке индикаторы формируются в следующих областях: социально-экономическое развитие, здоровье населения, качество атмосферного воздуха и поверхностных вод, изменение климата, воздействие отраслей экономики на окружающую природную среду. В разных методиках используются от десяти до ста различных показателей, позволяющих оценить развитие стран или регионов. Например, при оценке экологического развития стран могут использоваться около 70 индикаторов, объединенных в 14 групп, которые комплексно характеризуют социально-экономическую и экологическую ситуацию в странах Европы, а также безопасность жизнедеятельности [16]. Украинская методика социально-экономической оценки развития регионов [17] использует статистические данные приблизительно по ста индикаторам, которые объединены в девять групп. Российская методика оценки социально-экономического развития субъектов федерации применяет 295 индикаторов, которые сведены в 9 разделов.

В свою очередь, российская методика оценки экологического состояния территории [18] использует 45 индикаторов для оценки изменения среды обитания, состояния здоровья населения, оценки нарушения природной среды, деградации наземных экосистем, биогеохимической оценки территории и т.д.

Базовый перечень показателей для экологической оценки разработан ЕЭК ООН и применяется на практике при оценке развития стран ЕС. Базовый перечень социально-экономических показателей для оценки общего развития стран мира разработан Всемирным банком [11].

В настоящее время метод индикаторов и индексов применяют не только при экологической оценке и устойчивом развитии, но и при измерении уровня глобализации стран. Наиболее известны две системы количественного и качественного измерения глобализации [19, 20], которые позволяют ежегодно рассчитывать индекс глобализации. По первой системе (система КОФ), этот индекс рассчитывается для 123 стран мира, а по второй системе (СЕИР) – для 62. Методология расчета индекса глобализации такая же, как и при оценке ИРЧП, хотя имеет свои особенности.

В мировой экономике и оценке развития стран сегодня также широко применяют индекс конкурентоспособности развития (<http://www.weforum.org>), состоящий из 47 наборов данных, индекс экономической свободы, включающий 50 наборов данных (<http://www.heritage.org>), индекс экологического

измерения (<http://www.yale.edu/esi>), обобщающий 76 наборов данных, индекс качества и безопасности жизни (6 индикаторов, <http://www.eu.wikipedia.org>) и т.д. В экономике используют фондовые индексы, различные индексы ценообразования и т.д. Широкое применение метод индексов получил в климатологии, оценке растительности и биомассы Земли, анализе состояния атмосферы, океана, почв и т.д. В этих областях определение индексов, характеризующих качественное состояние системы, основывают на методах дистанционного зондирования Земли. Например, индекс растительности (NDVI), который оценивается по данным дистанционного определения степени поглощения и отражения видимого красного (RED) и инфракрасного (NIR) излучения разными видами растительности. Таким образом, метод индикаторов и индексов широко применяется в экологической и стратегической оценке и науках о Земле.

Если применить принцип суперпозиции, то при определении индекса с любым количеством индикаторов, можно построить схему на основе использования решений уравнения (5) для двух и трех независимых переменных. Это приводит к необходимости построения методики определения индекса состояния экосистемы, где индикаторы при расчетах необходимо компоновать по двум или трем показателям в группы, характеризующим ту или иную область деятельности человека.

В основе построения такой методики для любой экосистемы может лежать гипотеза существования, абсолютного индекса  $T$ , который является мерой оценки качественного состояния системы по комплексу её свойств  $z_k$ . Величина  $T$  обобщенно отражает динамику процессов, происходящих во времени в исследуемой системе. Для измерения величины  $T$  необходимо построить шкалу и провести ее градуировку, другими словами, – сформировать стандартную эмпирическую шкалу индекса (или комплекс шкал) состояния экосистемы определенного класса. Первое, что необходимо сделать при построении шкалы, – это выбрать два значения индекса  $T$ , которые легко определяются, и принять интервал между ними за стандартный, равный, например, 100 или 1000 баллам. В дальнейшем будем рассматривать экосистемы, в которых свойства могут быть скомпонованы в группы с двумя или тремя переменными. В качестве переменных будут выступать экологические индикаторы, социально-экономические показатели и другие величины. При этом группы индикаторов могут охватывать инфраструктурные, социальные, территориальные, демографические, экологические, экономические, политические и другие свойства экосистем.

### **Существующая система оценки развития человеческого потенциала**

В настоящее время систематическая оценка индекса человеческого развития ведется для 177 стран мира; почти для 100 стран такая оценка дается с 1975 года [15]. С 1990 года оценка индекса человеческого развития ведется почти для 140 стран мира и результаты анализа публикуются в открытой печати.

Существующие таблицы показателей развития человека дают глобальную оценку достижений страны в различных областях развития общества. Таблицы содержат данные по 177 странам, т.е. по всем странам, для которых может быть рассчитан индекс развития человеческого потенциала.

Страны, для которых рассчитывается ИРЧП, подразделяются по уровню развития человеческого потенциала на три группы: страны с высоким уровнем развития человеческого потенциала (ИРЧП составляет 0,800 и выше), страны со средним уровнем развития (0,500-0,799) и страны с низким уровнем развития человеческого потенциала (менее 0,500).

При оценке развития стран на основе методики ИРЧП в качестве основных свойств используются индикаторы продолжительности жизни ( $I_1$ ), образования ( $I_2$ ) и ВВП ( $I_3$ ) – для каждого из которых устанавливаются общемировые минимальные и максимальные значения (планки) [14, 15].

Интегральный индекс человеческого развития ( $I$ ), вычисляется по формуле:

$$I = \sum_{i=1}^3 \beta_i \cdot I_i, \quad \beta_i = 1/3. \quad (39)$$

Каждый из индикаторов ИРЧП выражается величиной от нуля до единицы и рассчитывается по следующим формулам.

Индикатор продолжительности жизни определяется в виде:

$$I_1 = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (40)$$

где  $X$  – ожидаемая продолжительность жизни в стране, при этом  $X_{\max}$  принимают равным 85, а  $X_{\min}$  равным 25 (лет).

Индикатор образования определяется следующим образом:

$$I_2 = \frac{2}{3} X_1 + \frac{1}{3} X_2, \quad (41)$$

где  $X_1$  – доля грамотного взрослого населения (от 15 лет и старше, доли ед.);  $X_2$  – доля обучающихся в начальных, средних и высших учебных заведениях в возрасте от 5 до 23 лет, доли ед.

При расчете показатель дохода (ВВП на душу населения) корректируется, так как при достижении достойного уровня развития человеческого потенциала не требуется

неограниченного дохода. Поэтому при расчете соответствующего индикатора используются логарифмы дохода:

$$I_3 = \frac{\log(X) - \log(X_{\min})}{\log(X_{\max}) - \log(X_{\min})}, \quad (42)$$

где  $X_{\max} = 40000$  дол. США по ППС, а  $X_{\min} = 100$  дол. США по ППС. Паритет покупательной способности (ППС) представляет собой обменный курс, отражающий ценовую разницу в зависимости от страны и позволяющий осуществлять международные сопоставления реальных показателей производительности и доходов. С учетом ППС курса доллара США, 1 доллар США имеет такую же покупательную силу в условиях внутренней экономики страны, как и 1 доллар США в Соединенных Штатах Америки. Методика оценки ППС приведена на сайте Всемирного банка [21].

Методика ИРЧП имеет много недостатков, однако сегодня она широко применяется при оценке человеческого потенциала разных стран мира [14, 15, 22, 23, 24].

### **Построение уравнения состояния человеческого потенциала**

Возможность построения абсолютной шкалы индекса  $T$  для группы свойств экосистемы покажем на примере формирования такой шкалы для оценки состояния развития человеческого потенциала разных стран мира. При соответствующей корректировке данная методика может быть применена во всех случаях той или иной группировки свойств экосистемы. Выделенную группу свойств будем называть соответствующим компонентом системы, например, демографический компонент, экономический компонент и т.д.

Адаптацию теоретической модели (27) – (38) по статистическим данным проведем путем установления связи между абсолютной шкалой индекса  $T$ , которая может быть определена согласно уравнения (27), и эмпирической шкалой индекса  $t$ , методика определения которой будет приведена ниже. Примем в качестве независимых переменных для модели стратегической оценки индикаторы  $I_1, I_2, I_3$ . Базы данных значений показателей для расчета ИРЧП приведены за многие годы в источниках [14, 15, 22, 23] и др. За последние несколько лет подобные таблицы данных приведены в Докладах [14, 15, 24].

В отличие от (39) – (42) определим индикатор  $I_i$  как отношение переменной  $z_i$  к некоторому опорному состоянию  $z_{i0}$ , то есть  $I_i = z_i / z_{i0}$ . В соответствии с данными [14, 15] в таблице 1 приведены значения переменных  $z_i$  для некоторых стран мира в 2004 году.

Таблица 1. – Показатели развития человеческого потенциала стран мира в 2004 году

Страны мира	$N$	$S$	$z_1$	$z_{21}$	$z_{22}$	$z_3$
Норвегия	4,6	323,8	79,6	99,0	100	38454
Австралия	19,9	7686,9	80,5	99,0	100	30331
Швеция	9,0	450,3	80,3	99,0	96	29541
США	295,4	9363,0	77,5	99,0	93	39676
Финляндия	5,2	338,2	78,7	99,0	100	29951
Франция	60,3	551,5	79,6	99,0	93	29300
Испания	42,6	505,4	79,7	98,0	96	25047
Германия	82,6	357,0	78,9	99,0	89	28303
Израиль	6,6	20,8	80,0	97,1	90	24382
Словения	2,0	20,3	76,6	99,0	95	20939
Венгрия	10,1	93,0	73,0	99,0	87	16814
Польша	38,6	312,7	74,6	99,0	86	12974
Эстония	1,3	45,2	71,6	99,8	92	14 555
Литва	3,4	65,3	72,5	99,6	92	13107
Словакия	5,4	49,0	74,3	100,0	77	14623
Болгария	7,8	111,0	72,4	98,2	81	8078
Румыния	21,8	238,4	71,5	97,3	75	8480
Россия	143,9	17098	65,2	99,4	88	9902
Беларусь	9,8	207,6	68,2	99,6	88	6970
Венесуэла	26,3	912,1	73,0	93,0	74	6043
Таиланд	63,7	514,0	70,3	92,6	74	8090
<b>Украина</b>	<b>47,0</b>	<b>603,6</b>	<b>66,1</b>	<b>99,4</b>	<b>85</b>	<b>6394</b>
Казахстан	14,8	2724,9	63,4	99,5	91	7 440
Армения	3,0	29,8	71,6	99,4	74	4101
Китай	1308	9597,0	71,9	90,9	70	5896
Турция	72,2	783,6	68,9	87,4	69	7753
Грузия	4,5	69,7	70,6	100,0	75	2844
Алжир	32,4	2381,7	71,4	69,9	73	6603
Египет	72,6	1001,5	70,2	71,4	76	4211
Молдова	4,2	33,8	68,1	98,4	70	1729
ЮАР	47,2	1219,9	47,0	82,4	77	11192
Индия	1087,1	3287,6	63,6	61,0	62	3139
Пакистан	154,8	803,9	63,4	49,9	38	2 225
Конго	3,9	2345,4	52,3	83,0	52	978
Уганда	27,8	236,0	48,4	66,8	66	1478
Йемен	20,3	528,0	61,1	49,0	55	879
Кения	33,5	582,7	47,5	73,6	60	1140
Гаити	8,4	27,8	52,0	52,0	48	1892
Нигерия	128,7	923,8	43,4	67,0	55	1 154
Ангола	15,5	1246,7	41,0	67,4	26	2180
Замбия	11,5	752,6	37,7	68,0	54	943
Мозамбик	19,4	801,6	41,6	46,0	49	1237
Эфиопия	75,6	1127,1	47,8	42,0	36	756
Чад	9,4	1284,0	43,7	25,7	35	2090
Нигер	13,5	1267,0	44,6	28,7	21	779

Здесь  $N$  – общая численность населения, млн. чел.;  $S$  – площадь страны, тыс. км<sup>2</sup>;  $z_1$  – ожидаемая продолжительность жизни при рождении, лет;  $z_{21}$  – уровень грамотности взрослого населения (от 15 лет и старше), %;  $z_{22}$  – общий показатель обучающихся в начальных, средних и высших учебных заведениях, %;  $z_3$  – ВВП на душу населения, в долл. США (по ППС).

Выберем одну из наименее развитых стран в качестве базы для проведения сравнения. Опорные свойства, определяющие развитие человеческого потенциала, определим по состоянию на конец 2004 года. Тогда значения  $z_{i0}$  будут соответствовать данным страны Нигер:  $z_{10}=44,6$  лет;  $z_{21,0}=28,7\%$ ;  $z_{22,0}=21\%$ ;  $z_{30}=779$  \$ США (по ППС).

Определим показатель  $I_2$ , который характеризует уровень образования населения, согласно (41) в виде 
$$I_2 = \frac{2}{3} \left( \frac{z_{21}}{z_{21,0}} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{z_{22}}{z_{22,0}} \right),$$

тогда оценку человеческого развития стран мира, как и в методике ИРЧП, разработанной ООН, можно будет вести по трем независимым переменным  $I_1, I_2, I_3$ .

Дадим формальное определение абсолютной шкалы индекса  $T$  для случая оценки ИРЧП. Согласно (27) для любого выбранного объекта при изменении свойств системы с тремя независимыми переменными справедлива следующая зависимость  $I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 = R_k \cdot T$ .

Значение индекса  $T$  связано с уровнем воздействия окружающей среды на объект оценки. Можно считать, что чем выше уровень урбанизации страны, тем выше и уровень её развития. Сегодня города являются центрами, где сосредоточена половина населения Земли, им принадлежит ведущая роль в современной жизни. По прогнозам ООН в течение следующих двух десятилетий 60% населения мира будет проживать на урбанизированных территориях. Города являются крупными промышленными и транспортными узлами, центрами экономики, торговли и образования, сосредоточием социальной и культурной жизни в различных странах. Выполненная оценка взаимосвязи индикаторов  $I_i$  с долей городского населения стран указывает на достаточно высокую корреляцию между переменными. При этом уравнения регрессии являются линейными, а их коэффициенты корреляции лежат в пределах от 0,60 до 0,63.

Исходя из этого, сформулируем следующую гипотезу: при одинаковых значениях индикаторов  $I_i$  абсолютный индекс состояния  $T$  выше у той страны, у которой выше уровень урбанизации. Примем в качестве меры для оценки уровня урбанизации страны долю городского населения, которую будем определять по отношению к общему населению страны. Данная гипотеза должна подтверждаться результатами обработки статистических данных, при этом уравнение (27) можно представить в виде:

$$T = \mu_k \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot I_3}{R_1} = \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot I_3}{R_k}, \quad (43)$$

где  $\mu_k = \alpha_k / \alpha_1$ ,  $\alpha_k$  – доля городского населения  $k$ -ой страны в 2004 году;  $\alpha_1$  – доля городского населения страны Нигер в 2004 году,  $\alpha_1 = 16,7\%$ .

Величину  $R_1 = 0,01$  [1/балл] определим из условия, что в 2004 году абсолютный индекс  $T$  для страны Нигер условно был равен 100 баллов. Результаты оценки индекса  $T$  для стран мира в 2004 году даны в таблице 2.

При построении эмпирической шкалы индекса  $t$  в качестве объекта непосредственной оценки этой величины может быть принята любая величина  $\rho$  при условии, что индекс  $t$  связан с ней как взаимно однозначные функции. Подобный подход дает возможность построить несколько эмпирических шкал величины  $t$ . Например, если актуален вопрос изучения общего развития стран, то в качестве величины  $\rho$  можно принять потребление энергии на душу населения. Если предполагается изучение демографических тенденций, то в качестве величины  $\rho$  может выступать плотность населения, процент населения определенного возраста, смертность или рождаемость. При оценке уровня развития здравоохранения это может быть: количество врачей, коэффициент младенческой или детской смертности, распространение туберкулеза или ВИЧ. В свою очередь, при изучении технологического развития – количество патентов, число абонентов сотовых телефонов или пользователей Интернет (на 1 тыс. чел.), при экономической оценке – изменение индекса цен или темпы роста, доля импорта или экспорта в ВВП страны; при оценке неравенства – коэффициент Джинни и т.д.

Значение индекса  $t$  для примера свяжем с уровнем потребления энергии на душу населения [14, 15, 24]. Если эту величину принять в качестве показателя  $\rho$ , то возможно градуирование эмпирической шкалы индекса  $t$ . В этом случае, величина  $\rho$  легко статистически определяема (измеряема) для любой страны. Построение шкалы индекса  $t$  будем основывать на методе двух точек. Реперной точке  $A$  поставим в соответствие значение величины  $t = 0$  пунктов, реперной точке  $B$  – значение, равное в 100 пунктов. Шкалу  $t$  примем линейной относительно данных реперных точек.

Точку  $A$  определим как состояние системы при отсутствии потребления энергии ( $\rho = 0$ ).

Таблица 2. – Результаты определения показателей, необходимых для построения уравнения состояния человеческого потенциала стран мира

Страны мира	$T$	$t$	$R_k$	$R_k^*$
Норвегия	158509	63238	0,00216	0,00542
Австралия	143941	28615	0,00190	0,00955
Швеция	131463	41508	0,00199	0,00629
США	161083	35143	0,00207	0,00951
Финляндия	96482	42778	0,00273	0,00616
Франция	116109	20798	0,00218	0,01219
Испания	100153	15813	0,00218	0,01381
Германия	107302	18145	0,00222	0,01315
Израиль	113448	17108	0,00182	0,01209
Словения	53575	17773	0,00328	0,00989
Венгрия	51311	10128	0,00253	0,01284
Польша	37902	9255,0	0,00269	0,01103
Эстония	46896	15235	0,00242	0,00744
Литва	41164	8632,5	0,00251	0,01196
Словакия	37308	13443	0,00297	0,00825
Болгария	25095	11838	0,00239	0,00507
Румыния	19292	6102,5	0,00312	0,00987
Россия	30142	15758	0,00228	0,00437
Беларусь	21826	8470,0	0,00233	0,00599
Венесуэла	23580	8775,0	0,00180	0,00483
Таиланд	10431	4740,0	0,00522	0,01148
<b>Украина</b>	<b>18013</b>	<b>9207,5</b>	<b>0,00247</b>	<b>0,00483</b>
Казахстан	17434	10285	0,00292	0,00496
Армения	11318	3437,5	0,00260	0,00856
Китай	9300,4	3600,0	0,00423	0,01092
Турция	19221	4947,5	0,00250	0,00971
Грузия	6346,6	3915,0	0,00320	0,00519
Алжир	14153	2322,5	0,00267	0,01626
Египет	6232,6	3350,0	0,00391	0,00728
Молдова	3205,4	4750,0	0,00359	0,00242
ЮАР	16719	11488	0,00284	0,00413
Индия	2354,6	1485,0	0,00586	0,00929
Пакистан	1478,2	1232,5	0,00484	0,00581
Конго	1451,5	515,0	0,00279	0,00787
Уганда	400,59	147,5	0,01336	0,03628
Йемен	500,79	530,0	0,00621	0,00587
Кения	509,3	385,0	0,00815	0,01078
Гаити	1272,6	152,5	0,00438	0,03658
Нигерия	991,9	405,0	0,00353	0,00865
Ангола	1606,0	445,0	0,00317	0,01144
Замбия	521,1	1577,5	0,00479	0,00158
Мозамбик	551,8	997,5	0,00496	0,00274
Эфиопия	151,3	82,5	0,01064	0,01950
Чад	449,9	27,5	0,00673	0,11017
Нигер	100,0	100,0	0,01000	0,01000

Здесь  $T$  – абсолютный индекс для каждой страны в 2004 году, балл;  $t$  – эмпирический индекс, определенный по уровню потребления энергии в стране в 2004 году, пункт;  $R_k$  – постоянная в уравнении (43), 1/балл;  $R_k^*$  – скорректированная постоянная в уравнении (46), 1/пункт.

Реперную точку  $B$  эмпирической шкалы  $t$  совместим с реперной точкой абсолютной шкалы  $T$ . Для этого используем данные по потреблению энергии страны Нигер в 2004 году ( $\rho = 40$  кВт·час/чел).

В результате получаем простую линейную эмпирическую шкалу для определения индекса  $t$  вида:

$$t = 2,50 \cdot \rho, \quad (44)$$

где размерность потребления энергии  $\rho$  задается в удельных единицах [кВт·час/чел], а размерность величины  $t$  задается в пунктах относительно показателей страны Нигер в 2004 году.

При этом отметим, что цена деления одного балла абсолютной шкалы  $T$  отличается от цены деления одного пункта эмпирической шкалы  $t$ .

Таким образом, мы определили линейную эмпирическую шкалу индекса  $t$ , при этом обеспечили возможность ее измерения на основе использования статистических данных по каждой стране.

Используя шкалу (44), определим индекс  $t$  для каждой страны в 2004 году. Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 2.

Проверку адекватности модели проведем путем сравнения расчетных значений абсолютной шкалы  $T$  согласно (27) и эмпирической шкалы  $t$ . Зависимость величины  $T$  от индекса  $t$  представлена на рисунке 1. Линейное уравнение регрессии в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \ln T &= 1,15089 + \ln t \quad \text{или} \\ T &= 3,161 \cdot t. \end{aligned} \quad (45)$$

При обработке данных коэффициент корреляции является значимым и составляет 0,93, что указывает на существование очень тесной связи между данными величинами.

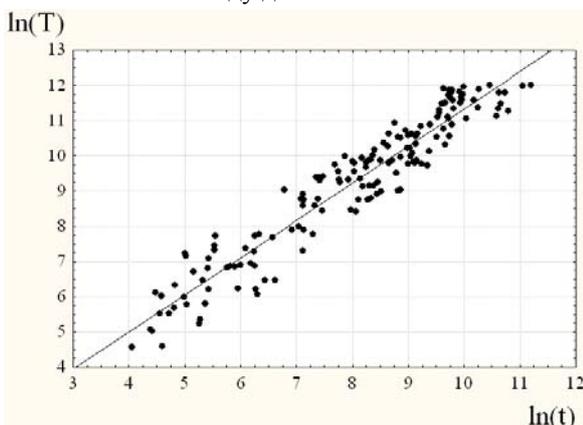


Рисунок 1. – Зависимость величины  $T$ , рассчитанной согласно (43), от индекса  $t$ , определенного с учетом шкалы (44)

Исходя из полученных результатов, приведем универсальное уравнение состояния системы, где абсолютный индекс  $T$  может

находиться по эмпирической шкале в зависимости от уровня потребления энергии на душу населения страны. При этом пересчитаем цену деления абсолютной шкалы, задав ее в пунктах эмпирической шкалы. В этом случае переопределим постоянные  $R_k^*$  таким образом, чтобы уравнение (43) было абсолютно строгим. В результате получаем следующее уравнение:

$$I_1 \cdot I_2 \cdot I_3 = R_k^* \cdot T, \quad (46)$$

где абсолютный индекс  $T$  определяется по простой формуле относительно эмпирической шкалы:

$$T = t. \quad (47)$$

В данном случае абсолютный индекс  $T$  и величина  $t$  измеряются в одинаковых единицах – пунктах, при этом, значения индекса  $t$  определяются согласно эмпирической шкалы (44). В свою очередь значения величины  $R_k^*$  для различных стран приведены в таблице 2.

Модель (46) – (47) для стран мира в 2004 году является абсолютно точной. Если использовать данную модель в качестве основы, то возможно построение уравнения состояния системы для всех периодов оценки развития человеческого потенциала стран мира.

В этом случае при наличии достаточного объема статистических данных, модель (46)–(47) может быть обобщена на другие годы. Например, в термодинамике, обобщение подобных моделей на всю область определения переменных осуществляется путем введения дополнительных корректирующих членов вида:

$$\begin{aligned} Z = \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot I_3}{R_k^* \cdot T} &= 1 + a_1 \cdot f_1(I_1, I_2, I_3) + \\ &+ a_2 \cdot f_2(I_1, I_2, I_3) + \dots \end{aligned} \quad (48)$$

Часто правую часть уравнения (48) представляют в виде полинома относительно величин  $I_i$ .

Таким образом, если имеется достаточно большой массив статистических данных по индикаторам, полученным в различные годы и характеризующим определенный компонент состояния системы, то возможно построение уравнений состояния развития человеческого потенциала для каждой страны мира на весь период оценки, например, 1990-2010 годы. Однако, при этом, сложность модели для оценки состояния системы возрастает.

Подобный подход может быть использован и при других способах построения шкалы  $t$ , когда применяются различные индикаторы для оценки состояния системы.

Например, если в качестве величины  $\rho$  использовать младенческую смертность, то эмпирическая шкала индекса  $t$  может быть определена в виде:

$$t = 0,6579 \cdot \rho. \quad (49)$$

Здесь в качестве величины  $\rho$  используется статистика по показателю младенческой смертности в странах мира [кол-во смертей на 1 тыс. живорожденных]. Для страны Нигер в 2004 году эта величина равна  $\rho = 152$ .

В этом случае вид уравнения (43) сохраняется, а зависимость связи абсолютной шкалы индекса  $T$  представляется следующим образом:

$$T = 5,934 \cdot 10^5 \cdot t^{-1,5}. \quad (50)$$

Коэффициент корреляции данной зависимости также высокий ( $r=0,92$ ), что указывает на тесную связь между переменными. Результаты обработки данных в этом случае даны на рисунке 2.

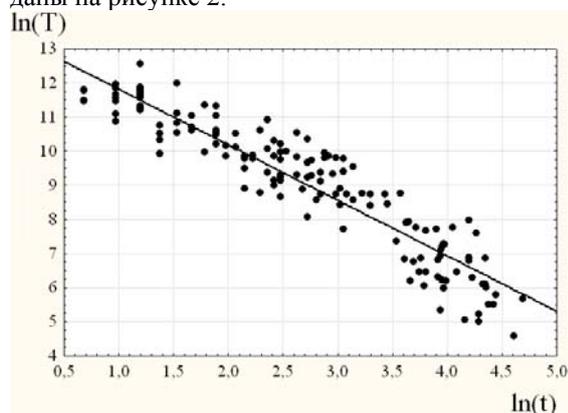


Рисунок 2. – Зависимость величины  $T$ , рассчитанной согласно (43) от индекса  $t$ , определенного с учетом шкалы (49)

Таким образом, видна возможность построения эмпирических шкал индекса  $t$  и уравнений состояния системы.

В заключение отметим, что модель (46)-(47) является идеальной моделью развития мира, которая характерна для стран в 2004 году. Для других периодов времени на основе имеющихся данных возможно уточнение модели (см. например, уравнение (48)). Это дает возможность построить для каждой страны уравнение состояния человеческого потенциала, а по мере увеличения объема статистических данных систематически осуществлять его корректировку.

Аналогичным образом, возможно создание шкалы абсолютного индекса  $T$  для любого компонента системы, включающего два или три индикатора. При стратегической оценке экосистемы, в которой выделяется несколько компонентов, необходимо для каждого из компонентов системы построение соответствующих шкал абсолютного индекса  $T$ . Из приведенного материала виден путь построения уравнений состояний вида «экологический компонент – экономический компонент» или «экономический компонент – социальный компонент» и т.д. С этой целью

необходимо на основе статистических данных установить связи между абсолютными шкалами  $T$ , построенными для каждого из компонентов экосистемы. Разработка шкал индекса  $T$  является первым этапом в построении моделей для стратегической оценки состояния экосистем, так как они позволяют практически найти матрицы уравнений состояния экосистемы.

### Критерии комплексной оценки состояния экосистем

Учитывая результаты теоретических исследований, в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки состояния экосистем следует принять энтропию системы  $s$  и общую меру состояния  $u$ . Наряду с абсолютным индексом  $T$  данные две величины однозначно характеризуют любое состояние экосистемы на поверхности, которое определяется уравнением состояния вида  $T = F(I_1, I_2, I_3)$ . При этом, энтропия системы будет определять в криволинейных координатах  $(s, u)$  удаленность точки, характеризующей состояние экосистемы, по линии характеристики от выбранного начала координат. В свою очередь общая мера состояния  $u$  будет определять поверхность уровня, перпендикулярную линиям характеристики в каждой точке поверхности  $T = F(I_1, I_2, I_3)$ .

При обосновании критериев для комплексной оценки важным является построение линий постоянной энтропии. Существуют различные способы экспериментального определения положений линий, соответствующих уравнению  $s = const$ . Наиболее распространенный метод основан на понятии адиабатического процесса. Адиабатическим процессом называется такой процесс, при котором на систему не оказывается воздействия. Исходя из уравнения (29), для любого адиабатического процесса, можно написать:

$$\alpha_1 \frac{dI_1}{I_1} + \alpha_2 \frac{dI_2}{I_2} + \alpha_3 \frac{dI_3}{I_3} = 0. \quad (51)$$

При отсутствии воздействия на систему  $dQ = 0$ , откуда в идеальном случае величина  $ds = 0$ . Это означает, что система при любых изменениях показателей  $I_1, I_2, I_3, T$  находится в состоянии отсутствия внешних воздействий, т.е. каждая точка линии  $s = const$  в криволинейных координатах  $(s, u)$  равноудалена от начала координат, например, точки  $I_1 = 0, I_2 = 0, I_3 = 0$ . При этом все линии лежат на поверхности  $T = (I_1 \cdot I_2 \cdot I_3) / R_k^*$ .

Определим значения констант  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  в уравнении (51). Для этого предположим, что в состоянии  $A$  все объекты системы имеют параметры, наблюдаемые в 2004 году. При отсутствии внешнего воздействия (условия быстрого регресса) объекты за различный период времени перейдут в состояние  $P$ , которое наблюдалось в человеческом обществе, например, в далеком прошлом, когда в слабо цивилизованном обществе продолжительность жизни, образование и доходы населения были низкими. Нижними планками в этом случае можно принять для средней продолжительности жизни значение, равное 25 лет, в свою очередь для ВВП на душу населения – значение 100 \$ США [14, 15, 24]. Оценки грамотности населения в прошлом достаточно неоднозначны. Для России в 1860 году уровень грамотности составлял всего 5 % населения, в США и Европе грамотность населения в 1870 была существенно выше – 60 – 80 %. В те времена неграмотность населения рассматривалась как функциональная неграмотность. Известно, что в 1950 году 50 % населения мира было неграмотно. Учитывая эти данные, а также другие оценки, можно нижнюю шкалу грамотности населения мира к концу XIX века приблизительно принять 10 %. Таким образом, естественное состояние мира в прошлом в слабо цивилизованном обществе может характеризоваться следующими оценочными значениями индикаторов:

$$I_{1p} = 0,561; I_{2p} = 0,348; I_{3p} = 0,128.$$

Более правильно было бы определить величины  $I_{1p}$ ,  $I_{2p}$ ,  $I_{3p}$  для каждой страны в прошлом, однако сейчас для большинства стран мира подобные данные отсутствуют.

Проинтегрируем уравнение (51) с учетом зависимостей (37) от состояния  $A$  (значения  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  в 2004 году) до состояния  $P$ . В результате получим систему уравнений для определения констант  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  для каждой страны мира. Результаты расчетов даны в таблице 3. Из уравнения (51) видно, что уравнение адиабатического процесса для стран мира имеет вид:

$$I_3 = I_1^{k_1} \cdot I_2^{k_2}, \quad (52)$$

$$\text{где } k_1 = |\alpha_1/\alpha_3|; k_2 = |\alpha_2/\alpha_3|.$$

Из данного уравнения следует, что рост ВВП стран однозначно связан с увеличением продолжительности жизни и уровня образования населения, т.е. рост благосостояния определяет социальное развитие и наоборот.

После определения величин  $\alpha_i$  можно найти для каждого объекта функцию энтропии системы ( $s$ ) и общую меру состояния системы ( $u$ ). Данные функции состояния и будут

выступать в качестве обобщенных критериев для комплексной оценки экосистем по уровню развития человеческого потенциала. Относительно выбранного состояния стран мира в 2004 году имеем безразмерные зависимости для определения этих величин согласно уравнений (53) и (54):

$$S - S_0 = \ln I_3 - k_1 \cdot \ln I_1 - k_2 \cdot \ln I_2, \quad (53)$$

$$U - U_0 = T - T_0, \quad (54)$$

где  $S = s/\alpha_3$  и  $U = u/\alpha_3$ .

Таблица 3. – Результаты определения констант  $\alpha_i$  для стран мира в 2004 году

Страны мира	Константы в уравнении (51)		
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
Норвегия	0,00814	0,00273	-0,00269
Австралия	0,01421	0,00467	-0,00488
Швеция	0,00936	0,00307	-0,00322
США	0,01437	0,00486	-0,00465
Финляндия	0,00920	0,00303	-0,00313
Франция	0,01816	0,00598	-0,00621
Испания	0,02045	0,00664	-0,00717
Германия	0,01960	0,00645	-0,00670
Израиль	0,01790	0,00581	-0,00628
Словения	0,01461	0,00472	-0,00517
Венгрия	0,01892	0,00608	-0,00676
Польша	0,01604	0,00501	-0,00602
Эстония	0,01091	0,00347	-0,00397
Литва	0,01743	0,00548	-0,00648
Словакия	0,01207	0,00383	-0,00442
Болгария	0,00724	0,00217	-0,00290
Румыния	0,01416	0,00430	-0,00557
Россия	0,00638	0,00201	-0,00236
Беларусь	0,00854	0,00255	-0,00344
Венесуэла	0,00679	0,00197	-0,00286
Таиланд	0,01651	0,00502	-0,00646
<b>Украина</b>	<b>0,00689</b>	<b>0,00206</b>	<b>-0,00278</b>
Казахстан	0,00716	0,00220	-0,00276
Армения	0,01179	0,00323	-0,00534
Китай	0,01541	0,00448	-0,00644
Турция	0,01400	0,00429	-0,00542
Грузия	0,00697	0,00179	-0,00340
Алжир	0,02323	0,00698	-0,00928
Египет	0,01014	0,00286	-0,00441
Молдова	0,00315	0,00073	-0,00169
ЮАР	0,00637	0,00224	-0,00190
Индия	0,01299	0,00370	-0,00559
Пакистан	0,00804	0,00223	-0,00358
Конго	0,01026	0,00239	-0,00548
Уганда	0,05003	0,01375	-0,02253
Йемен	0,00742	0,00156	-0,00431
Кения	0,01456	0,00378	-0,00700
Гаити	0,05152	0,01494	-0,02164
Нигерия	0,01196	0,00332	-0,00533
Ангола	0,01701	0,00557	-0,00587
Замбия	0,00221	0,00063	-0,00095
Мозамбик	0,00391	0,00117	-0,00157
Эфиопия	0,02595	0,00644	-0,01306
Чад	0,16719	0,05702	-0,05316
Нигер	0,01400	0,00400	-0,00600

Будем считать, что в состоянии, свойственном параметрам  $(I_{10}, I_{20}, I_{30})=1$  система имеет значение энтропии  $S_0=0$  и общей меры  $U_0=0$ . Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4. – Значения обобщенных критериев  $S$  и  $U$  для комплексной оценки и рейтинги стран мира в 2004 году

Страны мира	$S$	$U$	Ранг стран		
			по ИРЧП согласно:		по темпам развития
			[14]	(54)	
Норвегия	0,769	63138	1	2	6
Австралия	0,642	28515	3	11	12
Швеция	0,641	41408	5	6	9
США	0,836	35043	8	10	16
Финляндия	0,667	42678	11	5	10
Франция	0,655	20698	16	18	30
Испания	0,576	15713	19	32	19
Германия	0,658	18045	21	22	53
Израиль	0,572	17008	23	26	39
Словения	0,544	17673	27	24	28
Венгрия	0,518	10028	35	46	51
Польша	0,364	9155	37	50	49
Эстония	0,462	15135	40	35	45
Литва	0,394	8533	41	54	46
Словакия	0,442	13343	42	40	37
Болгария	0,180	11738	54	43	23
Румыния	0,232	6003,5	60	69	67
Россия	0,405	15658	65	33	22
Беларусь	0,165	8370,0	67	55	31
Венесуэла	0,049	8675,0	72	53	43
Таиланд	0,245	4640,0	74	78	87
<b>Украина</b>	<b>0,166</b>	<b>9107,5</b>	<b>77</b>	<b>51</b>	<b>42</b>
Казахстан	0,289	10185	79	45	36
Армения	-0,138	3337,5	80	93	58
Китай	0,066	3500,0	81	91	65
Турция	0,275	4847,5	92	76	61
Грузия	-0,309	3815,0	97	88	50
Алжир	0,189	2222,5	102	105	93
Египет	-0,038	3250,0	111	94	100
Молдова	-0,519	4650,0	114	77	40
ЮАР	1,139	11388	121	44	47
Индия	-0,010	1385,0	126	115	95
Пакистан	-0,094	1132,5	134	119	102
Конго	-0,511	415,0	140	135	94
Уганда	-0,124	47,5	145	158	158
Йемен	-0,674	430,0	150	132	114
Кения	-0,279	285,0	152	139	113
Гаити	0,054	52,5	154	156	160
Нигерия	-0,098	305,0	159	138	126
Ангола	0,625	345,0	161	137	123
Замбия	-0,008	1477,5	165	112	74
Мозамбик	0,178	897,5	168	125	153
Эфиопия	-0,383	-17,5	170	167	122
Чад	0,899	-72,5	171	171	152
Нигер	0,000	0,0	177	163	130

Таким образом, мы получили оценки величин  $S$  и  $U$  для всех стран мира в 2004 году. Безразмерные энтропия системы  $S$  и общая мера  $U$  показывают, на сколько изучаемый объект в криволинейных координатах  $(U, S)$  на семействе поверхностей  $T = f_k(U, S)$  удален от опорного состояния. При этом чем больше  $U$ , тем дальше объект находится от этого состояния. Дифференциал общей меры  $dU$  показывает темпы развития объекта в криволинейных координатах. По данным функциям могут быть определены ранги объекта, которые характеризуют место каждого объекта по уровню развития человеческого потенциала среди стран мира.

Полученные результаты позволяют ответить на ряд актуальных вопросов. Например, может ли Украина за десять лет попасть в тридцать наиболее развитых стран мира? На этот вопрос можно ответить отрицательно, так как (см. табл. 4) из 50 стран, которые находятся по уровню развития выше Украины, 33 страны имели в 2004 и 2005 годах более высокие темпы развития.

Данный метод позволяет оценивать сценарии развития путем изучения процессов, характеризующих переходы объектов с течением времени в новые состояния. Наиболее эффективный путь развития страны определяется вектором характеристики, который можно найти из характеристической системы дифференциального уравнения (28).

Для Украины в 2004 году система характеристических уравнений имела вид:

$$2,483 \frac{dI_1}{I_1} = 0,742 \frac{dI_2}{I_2} = \frac{dI_3}{I_3}. \quad (55)$$

При этом, если темпы роста продолжительности жизни в стране почти оптимально соответствуют темпам роста ВВП, то изменение показателей в области образования не является оптимальным. Это связано с относительно низким охватом молодого населения начальным, средним и высшим образованием по сравнению с развитыми странами.

Подобные подходы к анализу процессов развития стран можно реализовать для систем различной сложности на основе изучения многих компонентов и соответствующих наборов индикаторов. Однако, с увеличением числа индикаторов свыше 8 – 10 аналитические зависимости для анализа процессов развития становятся слишком сложными, в связи с чем при стратегической оценке необходимо использовать матричный анализ, алгоритмические методы и вычислительную технику. Кроме того, из-за значительного количества оцениваемых вариантов может потребоваться применение параллельных вычислений.

## **Выводы**

Таким образом, в результате исследований были сформулированы обобщенные критерии для комплексной оценки состояния экосистем. Данные критерии позволяют провести ранжирование объектов, в качестве которых выступают страны мира, по уровню развития человеческого потенциала. Предложенный метод дает возможность найти уравнение состояния для любого компонента системы, включающего два или три индикатора. Так как полученные функции состояния (полные дифференциалы) обладают свойством аддитивности, то при стратегической оценке экосистем, в которой выделяется несколько компонентов, возможно суммирование данных величин по каждому из компонентов системы. Это дает возможность сформулировать объективный метод оценки состояния экосистем.

Таким образом, формирование баз данных статистических показателей в комплексе с использованием новых методов и средств работы с данными позволит на практике подойти к разработке моделей социально-экономического и экологического развития стран и регионов. В основе получения таких моделей будет лежать уже объективный, а не экспертный подход.

## **Литература**

1. Проект закона Украины “Про державне прогнозування та стратегічне планування в Україні”.
2. Руководство по проведению стратегической экологической оценки / Ред. Горкина И., Максименко Ю., Сенгени И. М.: ИД РПОИ, 2006. – 71 с.
3. Справочное пособие по экологической оценке. Т.1.: Политика, процедуры, проблемы, общие для разных отраслей. Т.2.: Инструкции к различным видам хозяйственной деятельности. Т.3.: Инструкция по экологической оценке проектов в области энергетики и промышленного производства – World Bank, Washington, 1991.
4. Прогностика. Общие понятия. Объект и аппарат прогнозирования. Терминология. М.: Наука, 1978. – 32 с.
5. А.А. Гухман. Об основаниях термодинамики. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.
6. Н.С. Кошляков и др. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Вс. шк., 1970. – 712 с.
7. Г.М. Фихтенгольц. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Том 1. М.: Наука. 1969. – 607 с.
8. Руководящие указания по применению экологических показателей в странах восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. – Женева. 2006. – 105 с.
9. Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies United Nations, New York, 1996.
10. Environmental Indicators for Agriculture. Vol. 3. Methods and Results, OECD, 2001.
11. World Bank, World Development Indicators (issued annually) //http://www.worldbank.org/ (10.03.10).
12. United Nations, Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, 2001.
13. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies. Prepared by D. Briggs, Occupational and Environmental Health. WHO, 1999.
14. Доклад о развитии человека 2006. Что кроется за нехваткой воды: власть, бедность и глобальный кризис водных ресурсов / Пер. с англ. – М.: Весь мир. 2006. – 423 с.
15. Доклад о развитии человека 2007/2008. Борьба с изменениями климата: Человеческая солидарность в разделенном мире / Пер. с англ. – М.: Весь мир. 2007. – 400 с.
16. Защита окружающей среды Европы. Четвертая оценка. – ЕАОС, Копенгаген, 2007. – 452 с.
17. Методика вимірювання людського розвитку регіонів України. – Київ, 2001. – 36 с.
18. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия (утв. Минприроды РФ 30.11.1992).
19. Система количественного и качественного измерения глобализации // Эл. ресурс. URL: [www.kof.ch/globalization](http://www.kof.ch/globalization) (10.06.2010).
20. Международная организация CEIP // Эл. ресурс. URL: [www.atkearney.com](http://www.atkearney.com) (20.06.2010).
21. <http://www.worldbank.org/data/icp> (15.10.2009).
22. База данных ДРЧ. [http://hdr.undp.org/reports/view\\_reports.cfm](http://hdr.undp.org/reports/view_reports.cfm). (11.10.09).
23. Национальные ДРЧ. <http://hdr.undp.org/nhdr/> (11.10.09).
24. Доклад о развитии человека 2009. Преодоление барьеров: человеческая мобильность и развитие / Пер. с англ. – М.: Весь мир. 2009. – 217 с.