



УДК 504.05:303.732.4:001.5

## О ВЕРОЯТНОСТНОМ АНАЛИЗЕ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ О СОСТОЯНИИ ПРИРОДНО-АНТРОПОГЕННЫХ СИСТЕМ В МНОГОМЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

## ABOUT PROBABILISTIC ANALYSIS OF OBSERVATIONAL DATA ABOUT THE NATURAL AND ANTROPOGENIC SYSTEMS STATE IN MULTIDIMENSIONAL SPACES

**А.В. Звягинцева**  
**A.V. Zviagintseva**

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, Белгород, ул. Победы, 85*

*Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia*

*e-mail: zviagintseva@bsu.edu.ru*

*Аннотация.* Для решения прикладных задач предложена методика комплексной оценки состояний природно-антропогенных систем, которая основывается на выборе информативных показателей и событий, свойственных изучаемой системе и наиболее полно отражающих ее состояние, создании базы данных показателей, определении вероятностей характерных событий и установлении связей между вероятностями, построении вероятностных моделей и получении зависимостей для практических расчетов. На основе выполненных исследований разработана методика сравнения стран Европы по комплексу экологических показателей и на практическом примере анализа статистических данных показано, что предложенный метод комплексной оценки позволяет установить закономерности экологического развития стран в пространстве нескольких переменных. Данный метод комплексной оценки может быть применен к различным природно-антропогенным системам, например, странам, регионам, городам и природно-промышленным комплексам, а также к любой совокупности исходных экологических показателей.

*Resume.* In order to solve applied problems the technique of a comprehensive assessment of the state of natural and human systems, which is based on the selection of informative indicators and events characteristic of the system under study, and most fully reflect its status, create a database of indicators, determining probabilities specific events and establishing linkages Mezhuyev probabilities, the construction of probability models and getting dependencies for practical calculations. On the basis of the research the technique of comparing the countries of Europe on a range of environmental indicators and the practical example of the analysis of statistical data shows that the proposed method allows a comprehensive assessment of the environmental laws of the countries set in the space of a few variables. This method of integrated assessment can be applied to a variety of natural and man-made systems, for example, countries, regions, cities, and natural and industrial complexes, as well as any set of baseline environmental indicators.

*Ключевые слова:* вероятностный анализ данных, природно-антропогенные системы, комплексная оценка состояния объектов, энтропия и потенциал состояния, многопараметрическое ранжирование.

*Keywords:* probabilistic analysis of the data of natural and human systems, a comprehensive assessment of the status and development facilities, the entropy and the potential state, multiparameter rankings.

### Введение

Одна из фундаментальных задач науки связана с использованием при комплексной оценке природно-антропогенных систем и изучении их состояний естественнонаучных методов. Моделирование процессов для таких систем предлагается основывать на феноменологических подходах анализа и описания статистических данных, собранных в процессе наблюдений или опыта.

Данное направление в науке имеет большое значение, так как позволяет в общем случае предложить объективные методы исследования многомерных природно-антропогенных систем, отличающихся наличием биотических и абиотических компонентов. Сегодня в биологии, экологии, экономике, урбанистике и глобалистике много внимания уделяется разработке универсальных методов моделирования. На повестке дня стоит вопрос создания новой методологии прикладного моделирования, которая позволяла бы использовать общую логическую схему анализа данных и построения моделей по отношению к системам, которые в своем развитии характеризуются совокупностью самых разных показателей. Несмотря на множество исследований, существенного прогресса в этой области пока не наблюдается.



Для решения данной научной задачи необходимо разработать систему принципов, методов и средств феноменологического анализа данных для массивов эмпирической или статистической информации, отражающей в виде временных рядов процессы изменения и развития природно-антропогенных систем. Феноменологические модели могут быть ориентированы на описание массивов структурированной количественной информации в самых разных прикладных областях. Результаты работы получены с использованием методов теории систем и системной динамики, а также логических принципов и феноменологических методов, которые используются в термодинамике и физике сплошной среды.

### Основная часть

Обычно под природно-антропогенной системой понимают функционирующую как единое целое совокупность природных и искусственных объектов, которые взаимодействуют между собой. В данном исследовании в качестве природно-антропогенной системы определенного вида будем рассматривать некоторое множество однотипных природно-антропогенных объектов, которые можно считать объектами одного класса, например: предприятия, города, населенные пункты, экосистемы, страны и другие объекты, которые состоят из биотических и абиотических компонентов.

Основная цель настоящего исследования заключается в разработке новых методов и средств комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем, статистическая информация о которых может быть представлена в виде таблично-временных массивов данных, характеризующих процессы изменения и развития таких систем. Подобные данные имеют структуру таблиц в виде матриц «объекты – показатели», причем множество таблиц  $(t)$  упорядочено по времени: годам, месяцам и т.д.

В качестве объектов исследования различных видов природно-антропогенных систем могут выступать страны, области, районы, города, небольшие населенные пункты, природно-промышленные комплексы, отдельные территории, крупные предприятия, техногенные объекты, например: гидротехнические сооружения, отвалы, места складирования отходов и т.д. В качестве показателей и индикаторов природно-антропогенных систем могут использоваться самые различные величины. Например, в группе показателей, характеризующих загрязнение природных сред и наблюдаемый уровень антропогенного воздействия на природную среду и человека, это могут быть концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, поверхностных водах и почвах, объемы выбросов и сбросов загрязняющих веществ, выбросы парниковых газов, количество используемых пестицидов, объемы использованной свежей и оборотной воды, площади сельскохозяйственных и орошаемых земель, количество накопленных отходов, объемы добычи полезных ископаемых, объемы потребления и производства энергии, площади нарушенных земель и т.д. (обычно до 30–40 основных показателей). В качестве антропогенных характеристик природно-антропогенных систем могут выступать социально-экономические величины: численность населения, рождаемость и смертность, показатели ВВП и ВНП, доля городского населения, показатели структуры экономики и промышленности, расходы домашних хозяйств, уровень безработицы и миграции, младенческая и детская смертность, число убийств и тяжких преступлений, число заболеваний туберкулезом, продолжительность жизни, уровень грамотности населения и т.д. Количество основных социально-экономических показателей может достигать до сотни величин. В качестве показателей и индикаторов биологического разнообразия природно-антропогенных систем могут применяться характеристики окружающей среды, показатели, характеризующие распространение видов, площади охраняемых территорий, лесных и лесопокрытых территорий, количество основных и доминантных видов, индексы биоразнообразия и т.д. (обычно до 10–15 показателей).

Исходя из сказанного выше, для определенного объекта каждый показатель в таблично-временном массиве данных будет представлен временным рядом из опытных точек в количестве  $(t)$ , которые задаются с определенным лагом (год, месяц и т.д.). Структура таблично-временных данных, характеризующих природно-антропогенные системы, в виде «объекты-показатели-время» показана на рисунке 1.

В целом отметим, что в данном случае возможно использование любых статистических данных, характеризующих социально-экономический, промышленный, экологический, ресурсный или культурный потенциал изучаемой территории.

Сформулируем основные принципы, подходы и гипотезы, которые предполагается использовать при решении поставленной задачи.

Предположим, что определенная группа объектов некоторой природно-антропогенной системы в количестве  $m$  характеризуется  $n$ -статистическими показателями или индикаторами  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Тогда в  $n$ -мерном пространстве координат  $H_n \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  каждому изучаемому объекту будет соответствовать  $n$  значений координат  $p_k$ . Определим  $H_n$  как пространство наблюдаемых состояний для изучаемой группы объектов.

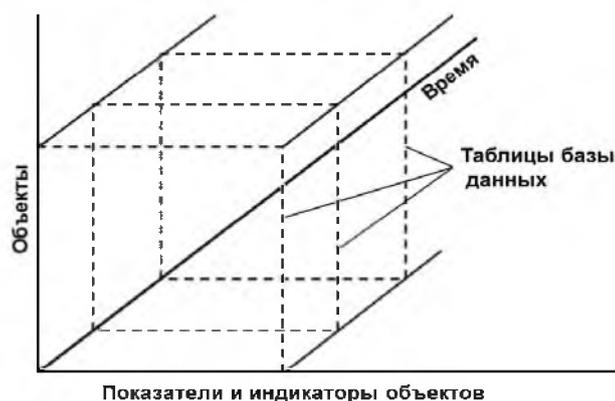


Рис. 1. Структура таблично-временных массивов статистических данных  
Fig. 1. The statistical data temporal array table structure

Таким образом, каждый объект в определенный момент наблюдения находится в некотором состоянии и характеризуется совокупностью показателей  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Состояния объектов изменяются с течением времени. Подобный общепринятый подход позволяет определить состояние объекта как совокупность его наблюдаемых показателей, которые формируются под действием условий окружающей среды в конкретный момент времени. Поэтому состояние любого объекта в  $n$ -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться точкой  $M = M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , процесс изменения состояния объекта во времени – многомерной кривой, которая описывается точкой  $M$  в этом пространстве.

Состояния каждого объекта могут характеризоваться не только показателями  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , но и некоторыми наблюдаемыми событиями, которые отражают характерные изменения в изучаемой природно-антропогенной системе и объектах этой системы. Рассмотрим одно или несколько характерных событий  $A_i$  и определим, что состояние определенного объекта в заданный момент времени будет характеризоваться величинами  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , которые в совокупности отображаются многомерной точкой  $M_i$ , а также данным наблюдаемым событием (событиями). Предположим, что существует вероятность данного события, которая может быть определена или теоретическим путем или эмпирически по выборке данных, полученных в наблюдениях, которые велись за всеми объектами изучаемой системы. Будем считать, что, исходя из имеющихся данных, вероятности события  $A_i$  всегда определяемы. По аналогии с работами [1–5], определим данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой природно-антропогенной системы (объектов системы). Статистические вероятности для события  $A_i$  могут быть найдены с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений. Основное условие для эмпирического определения статистической вероятности известными методами связано с тем, что количество данных наблюдений должно быть соизмеримым с числом  $N = d \cdot f^r$ , где  $f$  – число интервалов группирования данных для одной переменной, которое обычно принимается равным от 5 до 10,  $r$  – число характеристических переменных, которые определяют совместное событие, а  $d$  – число опытных данных на одном интервале группирования ( $d = 4 - 6$ ). Статистическая вероятность события  $A_i$  также может быть определена теоретически, исходя из теорем умножения и сложения вероятностей более простых событий [6, 7]. При этом события, которые свойственны одной таблице таблично-временных данных, будем рассматривать как совместные, а события, свойственные разным таблицам данных, – как несовместные.

Таким образом, каждой  $n$ -мерной точке  $M = M(p_1, p_2, \dots, p_n)$  может быть поставлена в соответствие эмпирическая или теоретическая оценка вероятности наблюдения некоторого простого или сложного события, например, наблюдения одного показателя или совместного наблюдения двух и более показателей, из числа всех показателей, а также вероятность наблюдения других событий, особо выделенных для изучаемой системы.

Научные идеи исследования заключаются в принятии нескольких гипотез, которые носят феноменологический характер и могут подтверждаться или опровергаться для данного вида природно-антропогенной системы на основе имеющихся опытных данных. Существование вероятностей сложных событий является основной статистической закономерностью и связано со свойством устойчивости относительных частот событий. Данное свойство справедливо для систем различной природы и является универсальной закономерностью при поведении очень многих систем. Так как считается, что по результатам наблюдений алгоритмически или теоретически можно определить



статистическую вероятность состояния изучаемой природно-антропогенной системы, то в таблично-временных массивах информации можно искать вероятностные связи. Другими словами предполагается искать взаимосвязи не между показателями объектов, а между вероятностями событий наблюдения этих величин. Подобный подход является универсальным и позволяет подойти к моделированию природно-антропогенных систем, исходя из вероятностных закономерностей природных, экологических и антропогенных процессов, которые отражают поведение этих систем.

Поэтому первая фундаментальная идея исследования заключается в поиске связей и закономерностей между вероятностями наблюдения различных событий, свойственных изучаемому массиву статистических данных. При данном подходе основной объект моделирования – это состояние объекта в пространстве  $H_n$ , которое отображается  $n$ -мерной точкой. Первой основой для количественной характеристики состояния являются показатели объекта, которые выражаются через переменные  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Второй основой для характеристики состояния является оценка вероятности состояния объекта, которая отражена во множестве наблюдаемых событий и их характеристических случайных величин [1]. Это позволяет гипотетически ввести в рассмотрение две величины для характеристики состояния системы в каждой элементарной области пространства  $H_n$ : статистическую вероятность наблюдения характерных событий  $w(p_1, p_2, \dots, p_n)$  и комплексный индекс  $T = T(p_1, p_2, \dots, p_n)$  – скалярную величину, характеризующую состояние изучаемой системы и отражающую результат моделирования, которая представляется в виде функциональных зависимостей относительно показателей  $p_1, p_2, \dots, p_n$ . Комплексный индекс  $T = T(p_1, p_2, \dots, p_n)$  в области  $H_n$  может быть представлен в виде функциональных зависимостей относительно всех  $n$  показателей: мультипликативными, мультипликативно-степенными, экспертными или иными зависимостями.

Вторая основная идея исследования связана с возможностью создания для описанных выше массивов таблично-временных статистических данных феноменологических моделей, отличающихся принятием гипотезы существования скалярных полей распределений вероятности событий. С этой целью предполагается, что вероятность  $w(p_1, p_2, \dots, p_n)$  в пространстве  $H_n$  образует скалярное поле. Считается также, что на основе комплексного индекса  $T = T(p_1, p_2, \dots, p_n)$  может быть построена приближенная математическая модель, которая формирует еще одно скалярное поле, называемое средой моделирования. Далее для любого процесса  $l$  вблизи произвольной точки  $M$  постулируется связь вида  $dw = c_l \cdot dT$ , где  $c_l$  – величины, зависящие от процесса, который осуществляется каждым природно-антропогенным объектом, и позволяющие получить значительно более точную модель системы. Величины  $c_l$  могут быть определены по имеющимся статистическим данным регрессионным анализом в случае, если сформулированные выше гипотезы справедливы для изучаемой системы. Таким образом видно, что предлагаемая методика очень тесно связана с логическим методом, принятым в термодинамике, сущность которого заключается в том, что на основе опытных данных формируются феноменологические модели, позволяющие описать с необходимой точностью поведение определенного класса объектов [1, 8]. Отличительной особенностью подхода является то, что предложенные выше гипотезы могут быть приняты или отвергнуты на основе обработки имеющихся данных, а также то, что данный подход позволяет изучать в совокупности процессы разной природы: физико-химические, экологические, социально-экономические и др.

Таким образом, основные подходы, идеи и рабочие гипотезы формулируются в виде:

- использование обширных статистических данных о состоянии и динамике природно-антропогенных систем в самых разных аспектах, а также теоретическое или алгоритмическое определение вероятностей событий, связанных с наблюдением показателей и индикаторов, позволит установить феноменологические закономерности для данного класса систем;
- поиск связей и закономерностей в массиве данных осуществляется не между показателями и индикаторами объектов, а между вероятностями событий наблюдения этих величин;
- статистические вероятности для характерных простых и сложных событий  $A_i$  могут быть найдены эмпирически с использованием различных алгоритмов сортировки, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке всех наблюдений или теоретически, исходя из теорем умножения и сложения вероятностей более простых событий;
- предполагается, что в пространстве состояний  $H_n$  можно сформировать некоторый комплексный индекс  $T = T(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , на основе которого будет создаваться математическая модель для комплексной оценки объектов и их многопараметрического ранжирования;
- для каждой элементарной окрестности пространства состояний системы  $H_n$ , которая определена произвольной точкой  $M = M(p_1, p_2, \dots, p_n)$ , и любого процесса  $l$  в окрестности этой точки используется гипотеза о связи статистической вероятности характерных событий и комплексного



индекса вида  $dw = c_i \cdot dT$ , где величины  $c_i$  определяются по статистическим данным, исходя из изменения величин  $w$  и  $T$  при осуществлении процесса  $l$ ;

– комплексная оценка и многопараметрическое ранжирование по совокупности показателей для конкретных объектов природно-антропогенной системы возможны по отношению ко всей группе объектов. Оценка проводится в многомерном вероятностном пространстве путем определения функций состояния, которые являются поверхностями уровня и координатными линиями в пространстве  $H_n$  для поля вероятности состояния системы. Нелинейное преобразование координат  $p_1, p_2, \dots, p_n$  пространства  $H_n$  относительно этих функций состояний позволяет преобразовать  $H_n$  в линейное пространство, в котором функции состояния как обобщенные координаты обладают свойством аддитивности. Все это дает возможность объективно оценить статус объекта среди множества объектов одного класса;

– предполагается, что для различных природно-антропогенных систем на основе предложенных методов могут быть разработаны методики для комплексной оценки и многопараметрического ранжирования объектов, а также методики оценки рисков различных событий, которые не будут связаны с применением экспертных методов.

Исходя из сформулированных принципов, подходов и гипотез, которые положены в основу разработки теории комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем, методика анализа данных в каждом конкретном случае включает следующие этапы:

– составляется база данных показателей и индикаторов для определенного вида природно-антропогенной системы. Считается, что опытные точки из этой базы данных являются ограниченной выборкой наблюдений из некоторой генеральной совокупности множества состояний однотипных объектов, которые формируют данную систему;

– применительно к изучаемой природно-антропогенной системе формулируются принципы и теоретические методы комплексной оценки, учитывающие особенности данной системы, суть которых в общих чертах была изложена выше;

– формируется перечень атрибутивных показателей, которые наиболее полно характеризуют состояния изучаемой системы. Атрибутивные показатели определяются сложившимися в научном сообществе представлениями о поведении изучаемой системы, корреляционным анализом данных или другими методами установления наиболее значимых переменных. Комплексная оценка и многопараметрическое ранжирование систем основывается на использовании данных показателей;

– выбираются некоторые характерные события, которые свойственны изучаемой природно-антропогенной системе. Также формулируются основные совместные события одновременного наблюдения атрибутивных показателей, которые однозначно характеризуют состояния изучаемой системы. Вероятности этих совместных событий определяют вероятность состояния системы. Выбираются методы оценки статистических вероятностей данных событий (как различных характерных событий, так и основных совместных событий);

– исследуются особенности и закономерности изучаемой системы, предлагаются гипотезы и разрабатываются способы определения комплексного индекса  $T = T(p_1, p_2, \dots, p_n)$  на основе выбранных атрибутивных показателей, входящих в базу данных существующего вида природно-антропогенной системы;

– устанавливаются регрессионные зависимости, характеризующие связь статистической вероятности состояния системы с комплексным индексом. Ищутся также зависимости, определяющие связь вероятности состояния системы с вероятностями различных характерных событий, свойственных изучаемой природно-антропогенной системе;

– после разработки методов оценки комплексного индекса и статистической вероятности состояния системы находятся феноменологические константы, характеризующие процессы изменения состояний для данного вида природно-антропогенной системы, исходя из регрессионного анализа данных;

– формулируются практические методы комплексной оценки и многопараметрического ранжирования природно-антропогенных систем. Определяются функции состояния, которые представляют собой многомерные поверхности уровня и координатные линии в линейно преобразованном пространстве  $H_n$ , свойственном изучаемой системе;

– осуществляются практические расчеты для тестовых примеров, разрабатываются модели комплексной оценки для отдельных видов природно-антропогенных систем, устанавливаются закономерности и особенности опасных событий и процессов в изучаемых системах, оценивается риск таких событий и процессов, исходя из определения вероятности соответствующих событий и связей между вероятностями различных событий;

– создаются практические методики для комплексной оценки конкретных видов природно-антропогенных систем на основе феноменологического анализа данных о состоянии природных и антропогенных сред.



### Пример реализации

Теперь проиллюстрируем предложенный метод комплексной оценки на примере разработки методики сравнения стран Европы по экологическим показателям. Возьмем в качестве атрибутивных переменных для оценки развития стран следующие экологические показатели: суммарные выбросы парниковых газов на душу населения ( $p_1$ ), тонн CO<sub>2</sub>-экв./чел.; долю охраняемых территорий в общей площади земли ( $p_2$ ), %; долю сельскохозяйственных земель в общей площади земли ( $p_3$ ), %. Для решения поставленной задачи воспользуемся базами данных [9–12].

На основе переменных  $p_1, p_2, p_3$  сформируем трехмерное пространство координат  $\{p_1, p_2, p_3\}$ , в котором возможные состояния изучаемой системы (все страны Европы) теоретически образуют некоторую область  $H_3$ , охватывающую все наблюдаемые точки базы данных. В этом случае состояние каждой страны может быть представлено трехмерной точкой  $M(p_1, p_2, p_3)$ .

Рассмотрим сложное совместное событие одновременного наблюдения указанных выше трех показателей и определим, что экологическое состояние каждой страны Европы может оцениваться данным наблюдаемым событием. Найдем статистическую вероятность этого события на основе опытных данных, которые имеются в базе данных [1, 9–12]. Считаем данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой системы. Эта статистическая вероятность  $w$  подсчитывается во всей группе объектов (по 52 странам Европы).

Зададим аналитическую функцию  $T(p_1, p_2, p_3)$ , на основе которой будет формироваться математическая модель вероятностного пространства в виде меры относительных изменений:

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}{p_{10} \cdot p_{20} \cdot p_{30}}, \quad (1)$$

В соответствии с результатами работ [1–4], определим энтропию и потенциал состояния системы в виде:

$$s = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + c_3 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{30}}\right), \quad (2)$$

$$p = \frac{p_1^2 - p_{10}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{20}^2}{c_2} + \frac{p_3^2 - p_{30}^2}{c_3}. \quad (3)$$

Для поиска связей между статистической вероятностью состояния системы и экологическими показателями воспользуемся методом регрессии применительно к нахождению зависимости (2).

Введем в рассмотрение значения опорных экологических показателей. Суммарные выбросы парниковых газов на душу населения ( $p_1$ ) по странам Европы изменяются в достаточно широких пределах от 0.85 до 28.1 тонн CO<sub>2</sub>-экв./чел. Примем в качестве опорного значения этого показателя среднее значение по странам Европы, равное  $p_{10} = 8.8$  тонн CO<sub>2</sub>-экв./чел. Аналогичным образом принимаем опорное значение по охраняемым территориям  $p_{30} = 10,9$  % (диапазон изменения от 0.5 до 40.1 %), а долю сельскохозяйственных земель в общей площади земли –  $p_{40} = 48.8$  % (диапазон изменения от 3.0 до 77.0 %). На основе приведенных данных получим опорную точку  $M_0(p_{10}, p_{20}, p_{30})$ , которая характеризует некоторый объект со среднестатистическими характеристиками.

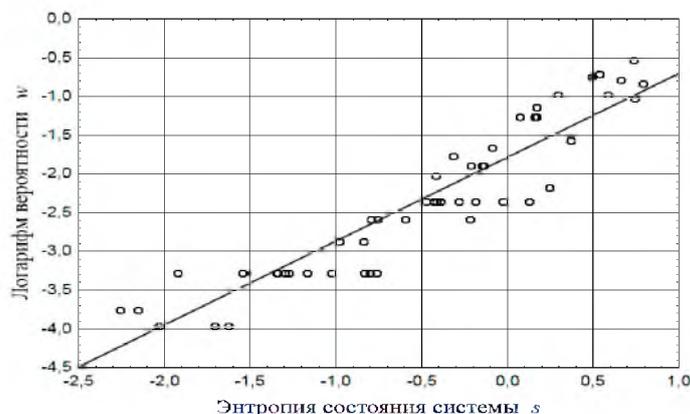


Рис. 2. Зависимость статистической вероятности состояния  $w$  от энтропии  $s$  для совместно наблюдаемых значений показателей  $p_1, p_2, p_3$

Fig. 2. The entropy  $s$  state  $w$  statistical probability dependence for the observed indicators  $p_1, p_2, p_3$  shared values



Свяжем вероятность  $w$  со значениями переменных в массиве опытных данных, в результате чего будем иметь следующую регрессионную зависимость величины  $w$  от энтропии состояния системы:

$$(4) \quad \ln(w) = -1.804 + s; \quad s = 0.466 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + 0.495 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + 1.041 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{30}}\right).$$

Коэффициент корреляции зависимости (4) составил 0.91, результаты обработки данных приведены на рисунке 2.

Исходные переменные относились к значениям  $p_{10}, p_{20}, p_{30}$ , которые соответствуют выбранному опорному состоянию. Из приведенных данных видно, что феноменологические константы  $c_1, c_2, c_3$  для изучаемого случая соответственно равны:  $c_1 = 0.466$ ,  $c_2 = 0.495$ ,  $c_3 = 1.041$ .

Таким образом, в пространстве состояний системы  $H_3$  можно построить криволинейные координаты, которые определяют некоторое поле направлений, отражающее среднестатистические тенденции, связанные с экологическими изменениями во всем изучаемом классе объектов (среди стран Европы).

Из данных таблицы видно, что страны Европы могут быть ранжированы по совокупности нескольких экологических показателей за счет определения потенциала каждой страны в пространстве переменных  $\{p_1, p_2, p_3\}$ . Комплексная оценка осуществляется путем определения положения каждой страны в криволинейных координатах данного пространства с учетом среднестатистических тенденций развития всех стран. Оценка осуществляется относительно средних значений экологических показателей по отношению к опорной точке  $M_0(p_{10}, p_{20}, p_{30})$ . Ранги стран устанавливались по возрастанию степени воздействия стран на окружающую природную среду.

**Значения потенциала ( $P$ ) для стран Европы относительно средних значений экологических показателей**  
**The values of the potential ( $P$ ) for European countries with respect to the environmental indicators average values**

Страны Европы	Потенциал страны $P$	Ранг страны	Страны Европы	Потенциал страны $P$	Ранг страны
Лихтенштейн	25.15	1	Украина	-0.80	27
Люксембург	22.64	2	Туркменистан	-0.99	28
Эстония	18.23	3	Латвия	-1.01	29
Германия	15.28	4	Словения	-1.17	30
Австрия	12.29	5	Исландия	-1.24	31
Польша	11.34	6	Литва	-1.41	32
Швейцария	10.88	7	Кипр	-1.52	33
Словакия	8.79	8	Румыния	-1.68	34
Монако	6.24	9	Швеция	-2.01	35
Чехия	6.09	10	Беларусь	-2.11	36
Великобритания	5.89	11	Португалия	-2.21	37
Нидерланды	4.62	12	Азербайджан	-2.26	38
Ирландия	4.23	13	Хорватия	-2.30	39
Финляндия	2.65	14	Македония	-2.32	40
Дания	2.07	15	Армения	-2.36	41
Россия	1.90	16	Молдова	-2.37	42
Казахстан	1.60	17	Узбекистан	-2.44	43
Бельгия	1.51	18	Мальта	-2.91	44
Италия	1.38	19	Андорра	-3.02	45
Греция	0.97	20	Турция	-3.22	46
Таджикистан	0.88	21	Сербия и Черногория	-3.26	47
Франция	0.81	22	Кыргызстан	-3.56	48
Испания	0.04	23	Грузия	-4.01	49
Венгрия	-0.20	24	Албания	-4.01	50
Болгария	-0.56	25	Босния и Герцеговина	-4.25	51
Норвегия	-0.77	26	Сан-Марино	-5.01	52

Таким образом, с учетом вероятностной оценки совместных событий, связанных с одновременным наблюдением показателей, можно проводить взаимное сравнение различных природно-антропогенных систем между собой на основе данных о состоянии и экологическом развитии этих систем. При этом важным является то, что показатели могут быть разной природы: экологические, социальные, экономические и т.д.



### Заклучение

Предложенный метод комплексной оценки, основанный на вероятностном анализе данных наблюдений, может быть применен к различным природно-антропогенным системам, например: странам, регионам, городам и природно-промышленным комплексам, а также к любой совокупности исходных экологических показателей.

Как видно из приведенного примера, методы комплексной оценки позволяют установить закономерности экологического развития природно-антропогенных систем и осуществить многопараметрическое ранжирование таких систем в пространстве многих переменных.

### Список литературы References

1. Аверин Г.В. 2014. Системодинамика. Донецк, Донбасс, 405.  
Averin G.V. 2014. Sistemodinamika. Doneck, Donbass, 405.
2. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. 2013. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины. Геотехническая механика, 112: 257–270.  
Averin G.V., Zvjaginцева A.V. 2013. Primenenie metodov intellektual'nogo analiza dannyh pri ocenke razvitiya Ukrainy. Geotekhnicheskaja mehanika, 112: 257–270.
3. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. 2012. Стратегическая оценка статуса Украины в современном мире по данным международных организаций. Часть 1: Теория и методика оценки // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, № 1(2)–2(4): 75–92.  
Averin G.V., Zvjaginцева A.V. 2012. Strategic assessment of the status of Ukraine in the modern world according to the data of international organizations. Part 1: Theory and Methodology of assessment. Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve, no.1(2)–2(4): 75–92.
4. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. 2013. Стратегическая оценка статуса Украины в современном мире по данным международных организаций. Часть 2: Примеры анализа и результаты // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе, № 1 (4)–2(5): 46–55.  
Zvjaginцева A.V., Averin G.V. 2013. Strategic Assessment of the status of Ukraine in the modern world according to the data of international organizations. Part 2: Examples of analysis and results. Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve, №.1 (4)–2(5): 46–55.
5. Averin G.V., Konstantinov I.S., Zviagintseva A.V. and Tarasova O.A. 2015. The Development of Multi-Dimensional Data Models Based on the Presentation of an Information Space as a Continuum. International Journal of Soft Computing, 10: 458–461.
6. Дрибан В.М., Пенина Г.Г. 2003. Теория вероятностей. Донецк, ДонГУЭТ, 519.  
Driban V.M., Penina G.G. 2003. Teorija verojatnostej. Doneck, DonGUJeT, 519.
7. Венцель Е.С. 1971. Теория вероятности. М., Наука, 576.  
Vencel' E.S. 1971. Teorija verojatnostej. M., Nauka, 576.
8. Гухман А.А. 1986. Об основаниях термодинамики. М, Энергоатомиздат, 383.  
Guhman A.A. 1986. Ob osnovanijah termodinamiki. M., Jenergoatomizdat, 383.
9. Защита окружающей среды Европы – Четвертая оценка. 2007. Европейское агентство по окружающей среде, Копенгаген. Дания: Schultz Grafisk, 452.  
Zashhita okruzhajushhej sredy Evropy – Chetvertaja ocenka. 2007. Evropejskoe agentstvo po okruzhajushhej srede, Kopengagen. Danija: Schultz Grafisk, 452.
10. Доклады о человеческом развитии (1990 – 2012 гг.). Электронный ресурс. URL: <http://hdr.undp.org/en/reports/> (03 февраля 2016).  
Doklady o chelovecheskom razvitii (1990 – 2012 gg.). Available at: <http://hdr.undp.org/en/reports/> (accessed 3 February 2016).
11. Доклад о человеческом развитии 2013. «Возвышение Юга: человеческий прогресс в многообразном мире» / Пер. с англ.; ПРООН. – М., Весь Мир, 216. Электронный ресурс. URL: [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr\\_2013\\_ru.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2013_ru.pdf) (03 февраля 2016).  
Doklad o chelovecheskom razvitii 2013. «Vozvyshenie Juga: chelovecheskij progress v mnogoobraznom mire» / Per. s angl.; PROON. – M., Ves' Mir, 216. Available at: [http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr\\_2013\\_ru.pdf](http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr_2013_ru.pdf) (accessed 3 February 2016).
12. Доклад о человеческом развитии 2014. «Обеспечение устойчивого прогресса человечества: уменьшение уязвимости и формирование жизнестойкости». / Пер. с англ.; ПРООН. – М., Весь Мир, 280. Электронный ресурс. URL: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr14-summary-ru.pdf> (03 февраля 2016).  
Doklad o chelovecheskom razvitii 2014. «Obespechenie ustojchivogo progressa chelovechestva: umen'shenie ujazvimosti i formirovanie zhiznestojkosti» / Per. s angl.; PROON. – M., Ves' Mir, 280. Available at: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/hdr14-summary-ru.pdf> (accessed 3 February 2016).
13. Яйли Е.А. 2006. Научные и прикладные аспекты управления урбанизированными территориями на основе инструмента риска и новых показателей качества окружающей среды. СПб., РГТУ, ВВМ, 448.  
Jajli E.A. 2006. Nauchnye i prikladnye aspekty upravlenija urbanizirovannymi territorijami na osnove instrumenta riska i novyh pokazatelej kachestva okruzhajushhej sredy. SPb., RGGMU, VVM, 448.