



УДК 303.732.4:303.094:303.224

DOI:10.18413/2411-3808-2018-45-1-140-148

О ПОДХОДАХ К ПРЕДСКАЗАТЕЛЬНОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

ON APPROACHES TO PREDICTIVE MODELING OF COMPLEX SYSTEM

Г.В. Аверин, А.В. Звягинцева, А.А. Швецова

G.V. Averin, A.V. Zviagintseva, A.A. Shvetsova

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

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

E-mail: averin@bsu.edu.ru; zviagintseva@bsu.edu.ru; 1162493@bsu.edu.ru

Аннотация

Для предсказательного моделирования сложных систем предложено использовать метод обработки и анализа разноплановой статистической информации, позволяющий одновременно учитывать как особенности изменения состояний отдельных объектов, так и закономерности их группового поведения при эволюционном развитии. Для этого при описании темпоральных данных, характеризующих объекты в многомерных пространствах состояний, применяются геометрические и феноменологические методы и приемы. Предлагается схема построения шкал для относительного сравнения между собой как состояний объектов, так и процессов изменения их состояний. Указанный метод и предложенная процедура шкалирования положены в основу разработки методики предсказательного моделирования сложных систем, кратко описанной в статье. На примере обработки статистических данных о состоянии и развитии городов России в 2003–2015 годах показана возможность реализации метода и получены зависимости для прогнозной аналитики. Данная научная область относится к актуальным разделам социофизики и системной динамики и позволяет развить методы прогнозирования состояний объектов, исходя из применения концепции континуальных полей эмпирических мер и моделей пространств состояний с различной геометрией. Полученные результаты имеют практическое значение и могут быть использованы для совершенствования инструментария стратегического прогнозирования социально-экономических систем – стран, регионов и городов, что является приоритетной целью государственного строительства.

Abstract

Proposed to be used for predictive modeling of complex systems method for simultaneous take into account both the dynamic patterns of state changes of individual objects and statistical regularities of their social behavior in evolutionary development. For this purpose, geometric and phenomenological methods and techniques are used in relation to the description of temporal data characterizing objects in multidimensional state spaces. On the example of processing of statistical data on the state and development of Russian cities in 2003-2015, the method of implementing the method is presented and equations and dependences for predictive Analytics are obtained. The proposed approach relates to the relevant sections of social physics and system dynamics and allows to develop methods for forecasting the States of objects, based on the application of the concept of continuum fields of empirical measures and models of state spaces with different geometries. The applied significance of the method is aimed at improving the means of strategic forecasting of the development of the country, regions and cities, which is a priority goal of state building.

Ключевые слова: социально-экономические системы, темпоральные массивы данных, предсказательное моделирование, пространства и уравнения состояний.

Keywords: economic and social systems, temporal data sets, predictive modeling, spaces and state equation.



Введение

В настоящее время актуален вопрос создания новой методологии прикладного моделирования, которая позволяла бы использовать общую структурно-логическую схему обработки и анализа данных наблюдений и единую процедуру построения математических моделей по отношению к различным классам объектов и явлений. Подобная методология могла бы стать основой для разработки универсальных алгоритмов обработки опытных данных, а также создания методики и информационно-аналитического обеспечения в области предсказательного моделирования и прогнозирования поведения и развития систем различной природы. Сегодня данная научная область относится к актуальным разделам социофизики и системной динамики [Forrester, 1973; Форрестер, 1974; Давыдов, 2005; Econophysics ..., 2006; Encyclopedia ..., 2009; Вайдлих, 2010; Mathematical ..., 2010; Словохотов, 2012; и др.]; общепризнано, что в этих науках могут быть получены важные результаты, направленные на развитие моделирования и прогнозирования общественных процессов [The dynamics ..., 2007; Lillo, 2008; Newman, 2011].

Основываясь на логических подходах термодинамики [Робертс, 1950; Гухман, 1986], сформулируем некоторые гипотезы и методы предсказательного моделирования, исходя из учета особенностей изменения как состояний отдельных объектов, так и закономерностей их группового поведения при эволюционном развитии.

Постановка задачи

Для того, чтобы подойти к формулировке логических и теоретических подходов к предсказательному моделированию сложных систем необходимо отработать методические принципы исследований. Идея данной работы связана с изучением возможности создания моделей, отличающихся описанием геометрических объектов (в частности, точек (состояний) и кривых (процессов)) в многомерных пространствах состояний сложных систем на основе имеющейся дискретной информации. При этом моделирование состояний и процессов основывается на гипотезе существования различных эмпирических мер при эволюционном развитии объектов во времени τ в виде функций многих переменных для параметров свойств $z_k = z_k(\tau)$: $W(\tau) = W(z_1(\tau), z_2(\tau), \dots, z_k(\tau))$. Для относительного сравнения состояний и процессов развития объектов в работе предлагаются различные системы измерения эмпирических мер. Среди множества полученных моделей по критериям адекватности выбираются наиболее качественные модели. Исходя из этого, целью данной статьи является обоснование применения геометрических и феноменологических методов и приемов при моделировании социально-экономических систем в многомерных пространствах состояний с различной геометрией.

С учетом поставленной цели, сделаем попытку сформулировать метод обработки и анализа разноплановой статистической информации, а также разработать модели для краткосрочного и среднесрочного прогнозирования социально-экономических процессов. Предлагаемый метод моделирования может быть реализован на высоких уровнях понимания информации, так как позволяет учитывать групповые закономерности в поведении и развитии многомерных систем.

Используемые гипотезы и методы

В целом методику предсказательного моделирования сложных систем можно представить следующим образом. Строится пространство состояний для изучаемого множества объектов относительно их параметров. Данное пространство является универсальным, так как охватывает максимально возможную область наблюдения значений параметров для данного класса объектов при различных внешних условиях. Предлагается геометрическая модель пространства состояний, которая является, по сути, исходной средой



моделирования. Применительно к данному пространству задаются меры для относительного сравнения состояний объектов между собой в виде шкал отношений или шкал интервалов. Шкалы строятся с учетом принятой метрики пространства или используемых эмпирических мер схожести состояний. На основе имеющихся данных создаются математические модели в виде уравнений состояний [Аверин, Звягинцева, 2016; Аверин, Звягинцева, 2017].

Далее каждой кривой, которая принадлежит пространству состояний, дополнительно ставится в соответствие эмпирическая мера, позволяющая сравнивать между собой процессы, совершаемые объектами. С использованием естественнонаучных принципов ищутся зависимости для эмпирических мер в виде феноменологических соотношений. Среди таких принципов особо выделяется принцип соответственных состояний, согласно которому состояния объектов могут подчиняться одному уравнению, если это уравнение выразить через некоторые приведенные переменные [Аверин, 2014; Аверин, Звягинцева, 2016; Аверин, Звягинцева, 2017]. В свою очередь, для оценки сходства процессов используется принцип подобия, в соответствии с которым геометрические объекты являются подобными, если между ними сохраняется пропорциональность параметров в их свойствах, то есть они могут быть измеряемыми по одной шкале. Полученные феноменологические соотношения описывают поведение объектов исходя из групповых закономерностей. Используя различные методы прогнозирования значений эмпирических мер и найденные феноменологические соотношения, даются оценки для возможных состояний объектов в будущем. После предсказания состояний объектов на определенный период упреждения, определяются значения параметров объектов. Все научные результаты основываются на обработке обширных структурированных массивов данных.

Множество значений наблюдаемых показателей часто представляется как массив данных, характеризующих совокупность однотипных объектов при изменении их состояний во времени [Костенко, Кузнецов, 2007; Аверин, Звягинцева, 2016]. Такие данные называют темпоральными и они имеют вид многомерных временных рядов. Соответствующие массивы дискретных данных имеют структуру таблиц в виде «объекты-показатели», причем все таблицы упорядочены во времени. В темпоральных массивах в качестве объектов выступают однотипные классы (сущности), свойственные реальным объектам. В качестве показателей (атрибутов), могут выступать различные физико-химические, социальные или экономические величины, имеющие количественное измерение.

Для темпоральных данных может быть построена среда моделирования в виде многомерного пространства состояний. Предположим, что для m объектов одного класса в массивах данных содержится количественная информация об n параметрах z_k ($k = 1, 2, 3, \dots, n$), характеризующих свойства изучаемых объектов. Примем эти параметры в качестве переменных состояния. Далее пусть в n -мерном пространстве состояний E^n , $z = (z_1, z_2, \dots, z_k)$, где $z \in E^n$ расположено определенное количество дискретных опытных точек M_i , $i = 1, 2, 3, \dots, q$, которые характеризуют состояния q объектов с параметрами $z_k = z_k(\tau)$, зависящими от времени τ . Представим эти точки как некую выборку из сплошной гипотетической среды бесконечного количества состояний для объектов одного класса. Будем считать, что по отношению к данным точкам наблюдений справедлив принцип инвариантности, когда в пространстве состояний дискретные данные формируют некий «образ», отражающий в определенной степени сущность групповых закономерностей, свойственных состояниям объектов. При этом инвариантность образа будет связана с изометрией пространства E^n , когда сохраняются расстояния между точками M_i .

Будем также применять континуальный принцип представления данных в пространстве E^n [Аверин и др., 2016; Звягинцева, 2016]. Тем самым используется концепция континуального поля некой величины (полевой переменной), которая характеризует в целом состояния объектов. Это позволяет каждой точке пространства поставить в соответствие некую величину, обладающую свойством неизменности по

отношению к преобразованиям переменных z_1, z_2, \dots, z_k . Определим данную полевую величину как эмпирическую меру состояний объектов в пространстве E^n в виде $W = W(M)$, где M – произвольное состояние.

Основная гипотеза исследования связана с описанием полевых закономерностей путем установления связи между эмпирической мерой W и априори заданной мерой схожести, которая отражает геометрическую структуру пространства состояний, исходя из той или иной принятой математической модели. Мере схожести состояний будем представлять в виде зависимостей относительно всех n переменных z_k : аддитивными, мультипликативными, степенными, однородными или иными зависимостями в виде евклидова, манхэттенского или степенного расстояний, расстояния Чебышева, Минковского и др. Всего может рассматриваться до 15–20 различных мер схожести.

Принцип соответственных состояний позволяет построить шкалу для относительного сравнения состояний объектов между собой. Процедура построения таких шкал досконально проработана в термодинамике [Робертс, 1950; Гухман, 1986]. В целом сущность метода заключается в следующем (рис. 1.). Выберем некий линейный эталонный процесс l_0 и на нем отметим опорное состояние M_0 . На данном процессе отмечаем второе опорное состояние M'_0 . Полученный отрезок делим на заданное количество одинаковых интервалов, например, 100, и устанавливаем длину полученных отрезков σ . Далее из начала координат проводим луч OM_0 и находим длину отрезка OM_0 . Шкалу измерений для состояний объектов формируем в виде некоего индекса θ применительно к лучу OM_0 с единицей измерения σ , при этом длина отрезка OM_0 в данной шкале составит $\theta_0 = OM_0/\sigma$. Для определенности назовем данный индекс θ менсурой (от лат. *mensura* – мера) и зададим соответствующую единицу измерения в виде градуса менсуры ($^\circ M$), который геометрически будет равен длине σ .

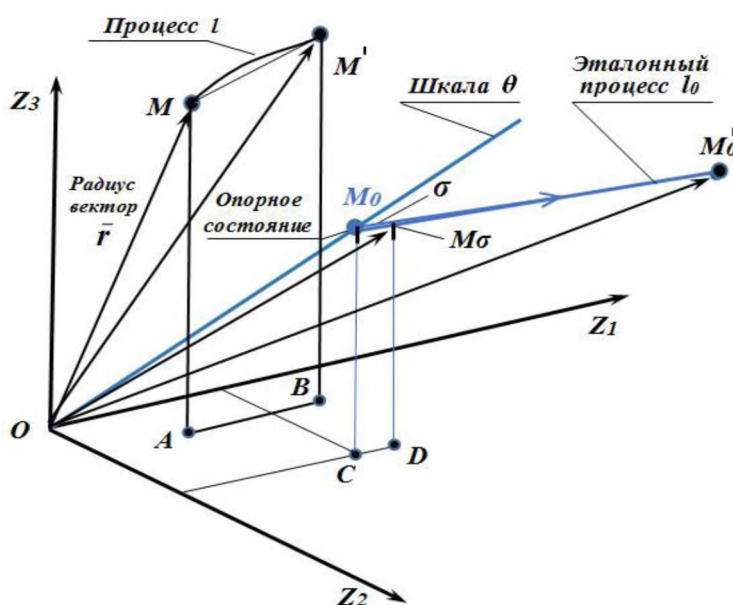


Рис. 1. Схема построения шкалы менсуры и измерения количества воздействия по отношению к опорному состоянию и эталонному процессу

Fig. 1. Scheme build scale measure and scale measurement impact in relation to the reference condition and the reference process

Проводя радиус-вектор \vec{r} до каждой опытной точки M_i и определяя его модуль, можно в полученной шкале измерить состояние в градусах менсуры. Таким образом,



менсура в целом характеризует состояния объектов и является эмпирической мерой для их измерения. Длины отрезков в евклидовом пространстве будем определять исходя из известной метрики: $l_{ab} = \sqrt{(z_{1b} - z_{1a})^2 + (z_{2b} - z_{2a})^2 + \dots + (z_{nb} - z_{na})^2}$, где a и b – начало и конец некоего отрезка ab . Теперь для опытных данных эмпирически можно искать модель в виде уравнения состояния [Аверин, Звягинцева, 2017]:

$$\theta = f(z_1/z_{1_0}, z_2/z_{2_0}, \dots, z_n/z_{n_0}). \quad (1)$$

Факт существования для объектов одного класса уравнения вида (1) должен подтверждаться на основе обработки имеющихся данных.

Если для описания состояний объектов можно использовать понятие менсуры, которая комплексно характеризует каждое состояние и представляет собой функцию точки, то для описания процессов следует ввести понятие количества воздействия в виде функции линии. Представление о количестве воздействия впервые было предложено А. Гухманом для определения различных взаимодействий [Гухман, 1986]. При этом данная величина связана с процессом изменения состояния и уровнем внешних воздействий среды на объект. Будем считать, что количество воздействия однозначно характеризует процесс, может быть определено через некую эмпирическую меру W и принятую по соглашению систему измерения этой величины.

Предположим, что произвольному процессу l в пространстве состояний может быть поставлено в соответствие значение эмпирической меры W_l (рис. 1). Соединим точки M и M' , принадлежащие процессу l , прямой линией MM' и будем считать, что для небольших периодов времени количество воздействия при изменении состояния объекта от M до M' пропорционально площади S_l треугольника OMM' , которая может быть выражена через векторное произведение радиус-векторов \overline{OM} и $\overline{OM'}$. Зададим единицу измерения количества воздействия, которая будет равна площади δ , приходящейся на один градус менсуры вблизи опорной точки M_0 эталонного процесса l_0 (площадь треугольника OM_0M_σ , рис. 1). Для сравнения процессов будем использовать критерий подобия (сходства) в виде отношения площадей S_l и δ : $W_l = S_l/\delta$. Векторное произведение определим в соответствии с известными формулами через проекции векторов на оси координат. Можно предложить и другие способы измерения количества воздействия.

Сформулированные подходы позволяют установить зависимости для значений количества воздействия и менсуры в различных процессах изменения состояний объектов. Особо отметим, что задача сравнения между собой как состояний, так и процессов сводится к выбору оптимальных систем измерения менсуры и количества воздействия. Покажем возможность получения таких соотношений на конкретном примере.

Эмпирические зависимости для моделирования

Применение предложенного метода проиллюстрируем на примере определения уравнений состояний для моделирования процессов развития городов России, для чего используем базу данных статистической информации [База данных ..., 2018]. На основе этого источника сформирован темпоральный массив данных, характеризующих состояние экономики и социальной сферы городов с населением свыше 100 тыс. чел. (всего 154 города, без Москвы и Санкт-Петербурга). Для каждого города имеется информация по 63 основным социально-экономическим показателям в период времени с 2003 по 2015 годы (шаг один год). Для произвольного примера возьмем четыре показателя: численность населения Z_1 , тыс. чел.; объем товаров производства, выполненных работ и услуг собственными силами по виду экономической деятельности «Обрабатывающие производства» Z_2 , млн. руб.; оборот розничной торговли Z_3 , млн. руб.; объем работ, выполненных по виду деятельности «Строительство» Z_4 , млн. руб.



В связи с тем, что темпы развития городов зависят от количества населения и региональных особенностей, будем пользоваться удельными показателями $z_k = Z_k / Z_1$ (млн. руб./тыс. чел.). В качестве опорной точки M_0 примем условное состояние с минимальными значениями показателей $z_{k_0} = z_{k \min}$ в группе городов, которые наблюдались в 2003 году. Соответствующий условный объект, для которого наблюдались данные показатели, будем считать городом с населением 100 тысяч человек. В качестве эталонного процесса выберем процесс развития этого города, при этом считаем, что показатели, характеризующие его развитие в каждом году с 2003 по 2015 гг. изменялись линейно. В качестве второй опорной точки M'_0 примем состояние данного города в 2015 году с показателями также равными минимальным значениям этих величин. Найдем эталон одного градуса ($1^\circ M$), равный длине σ элементарного отрезка, и методом регрессионного анализа определим уравнения состояний.

Результаты сравнительной оценки городов России по предлагаемой шкале менсусы для показателей z_2, z_3, z_4 могут быть описаны уравнением состояния вида (рис. 2):

$$\theta = 74,29(z_2/z_{2_0})^{0,792}(z_3/z_{3_0})^{0,150}(z_4/z_{4_0})^{0,047}. \tag{2}$$

Аналогичное уравнение получено для эмпирической меры W_l :

$$W_l = 65,30(z_2/z_{2_0})^{0,748}(z_3/z_{3_0})^{0,379}(z_4/z_{4_0})^{0,471}, \tag{3}$$

где процесс из изменений состояний l соответствует 2013–2015 годам, а показатели z_k – 2013 году. Коэффициенты множественной корреляции зависимостей (2) и (3) равны 0,98 и 0,89 соответственно. Хорошее качество полученных зависимостей позволяет сделать вывод о справедливости принципов соответственных состояний и сходства эволюционных процессов для изучаемого класса объектов. В результате анализа также установлено, что тесные связи между эмпирическими мерами и значениями параметров объектов существуют для различных интервалов времени в период 2013 – 2015 годов. При этом коэффициенты уравнений (2) и (3) линейно зависят от времени. Все это указывает на наличие групповых закономерностей в развитии городов России.

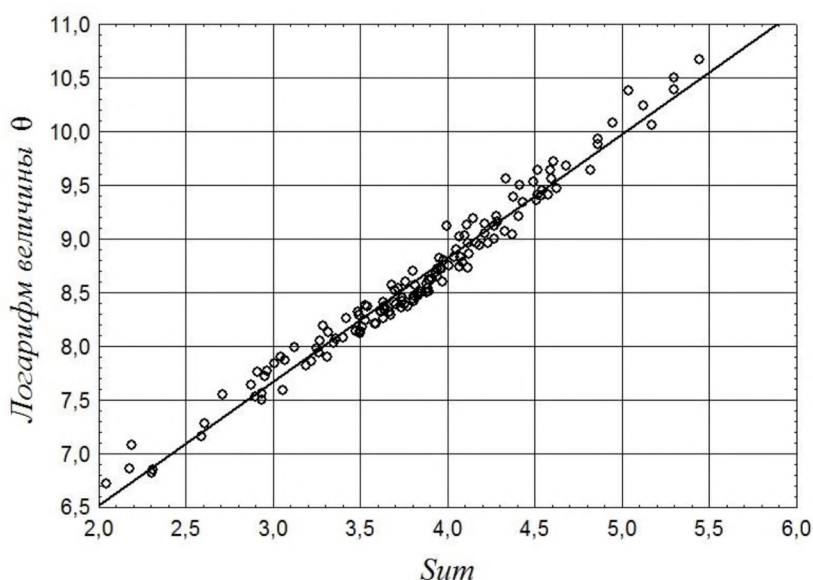


Рис. 2. Зависимость величины θ от совокупности показателей z_2, z_3, z_4 для 2015 года,

$$Sum = 0,792 \ln(z_2/z_{2_0}) + 0,150 \ln(z_3/z_{3_0}) + 0,047 \ln(z_4/z_{4_0})$$

Fig. 2. The dependence values θ for a set of indicators z_2, z_3, z_4 in 2015,

$$Sum = 0,792 \ln(z_2/z_{2_0}) + 0,150 \ln(z_3/z_{3_0}) + 0,047 \ln(z_4/z_{4_0})$$



Таким образом, установленные закономерности могут быть использованы при предсказательном моделировании. Сегодня при стратегическом прогнозировании на основе экстраполяции значений параметров объектов во времени на первое место выходит проблема достоверности полученных данных по отношению к факту тесной взаимосвязи показателей. При этом учет системных закономерностей представляет собой особую проблему при моделировании социально-экономических процессов. Так как опытные точки в пространствах состояний отражают свойства реальных объектов в ретроспективе, то установленные групповые закономерности в поведении и развитии объектов позволяют наложить дополнительные условия, которые будут определяться не только динамикой процессов изменения параметров $z_k = z_k(\tau)$, но и общей динамикой развития всей системы в целом $W(\tau) = W(z_1(\tau), z_2(\tau), \dots, z_k(\tau))$.

Исходя из этого методика предсказательного моделирования может быть кратко представлена следующим образом. В начале по ретроспективным данным определяются эмпирические меры и строятся шкалы для оценки схожести состояний и процессов. На следующем шаге устанавливаются феноменологические модели, например, вида (2) и (3). Для двух показателей получают не менее двух зависимостей для двух эмпирических мер, для трех показателей – не менее трех и т.д. Коэффициенты полученных уравнений характерны для определенных периодов наблюдения данных и являются функциями времени. Поэтому находится множество моделей для различных временных периодов и при прогнозе оценивается дрейф во времени коэффициентов в уравнениях математических моделей. Далее проводится экстраполяция эмпирических мер для состояний всех объектов на определенный прогнозный горизонт [Звягинцева, Константинов, 2018]. После этого решается система уравнений для определения значений переменных состояния вида (2)–(3) для всей совокупности объектов.

Оценка достоверности прогноза проводится с учетом полученных системных закономерностей взаимосвязи параметров объектов. Данный метод отличается необходимостью выполнения значительного объема вариантных расчетов, что требует автоматизации вычислительных процессов. Подобный подход позволяет прогнозировать значения социально-экономических показателей объектов на краткосрочную и среднесрочную перспективы [Звягинцева, Константинов, 2018]. Все это открывает возможности для разработки оригинальных методик и алгоритмов для системного решения задач прогнозной аналитики.

Заключение

Для моделирования сложных систем предложено использовать скалярные эмпирические меры, отражающие полевые закономерности, характерные для пространств состояний систем. Обработка и анализ информации основывается на применении измерительных шкал для относительного сравнения состояний объектов и процессов их изменения.

На конкретных примерах обработки опытных данных, характеризующих состояние и развитие городов России, показана возможность получения зависимостей, отражающих групповые закономерности в эволюционном развитии объектов. Найденные закономерности могут быть использованы для предсказательного моделирования и прогнозирования социально-экономических процессов.

Список литературы

References

1. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. 2016. Построение уравнений состояний сложных систем на основе событийной оценки индикативных показателей. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Экономика. Информатика, 23(244): 77–86.



Averin G.V., Zviagintseva A.V. 2016. Postroenie uravnenij sostojanij slozhnyh sistem na osnove sobytijnoj ocenki indikativnyh pokazatelej [Creation of the equations of difficult systems conditions on the basis of event assessment of indicators]. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Jekonomika. Informatika, 23(244): 77–86. (in Russian)

2. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. 2017. О справедливости принципа соответственных состояний для систем различной природы. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия Экономика. Информатика, 16(265): 104–112.

Averin G.V., Zviagintseva A.V. 2017. O spravedlivosti principa sootvetstvennyh sostojanij dlja sistem razlichnoj prirody [On justice of the principle of corresponding conditions for various systems]. Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija Jekonomika. Informatika, 16(265): 104–112. (in Russian)

3. Аверин Г.В., Константинов И.С., Звягинцева А.В. 2016. О континуальном подходе к модельному представлению данных. Вестник компьютерных и информационных технологий, 10: 47–52.

Averin G.V., Konstantinov I.S., Zvjaginceva A.V. 2016. O kontinual'nom podhode k model'nomu predstavleniju dannyh [About continual approach to model data presentation]. Vestnik komp'juternyh i informacionnyh tehnologij, 10: 47–52. (in Russian)

4. Аверин Г.В. 2014. Системодинамика. Донецк, Донбасс, 405.

Averin G.V. 2014. Sistemodinamika [Systemdynamics]. Donetsk, Donbass, 405. (in Russian)

5. База данных Федеральной службы государственной статистики. 2018. URL: <http://www.gks.ru/> (дата обращения: 3 февраля 2018).

Vaza dannyh Federal'noj sluzhby gosudarstvennoj statistiki. [Database of Federal State Statistics Service]. 2017. Available at: <http://www.gks.ru/> (accessed 3 February 2018).

6. Вайдлих В. 2010. Социодинамика: Системный подход к математическому моделированию в социальных науках. Пер. с англ. Изд.3. М., Либроком, 480.

Vajdljkh V. 2010. Sociodinamika: Sistemnyj podhod k matematicheskomu modelirovaniju v social'nyh naukah [Sociodynamics a Systematic Approach to Mathematical Modelling in the Social Sciences]. Per. s angl. Izd.3. Moscow, Librokom, 480.

7. Гухман А.А. 1986. Об основаниях термодинамики. М., Энергоатомиздат, 383.

Guhman A.A. 1986. Ob osnovanijah termodinamiki [About the thermodynamics bases]. Moscow, Jenergoatomizdat, 383. (in Russian)

8. Давыдов А.А. 2005. Системный подход в социологии: новые направления, теории и методы анализа социальных систем. М., URSS, 328.

Davydov A.A. 2005. Sistemnyj podhod v sociologii: novye napravlenija, teorii i metody analiza social'nyh system [System approach in sociology: new directions, theories and methods of analysis of social systems]. Moscow, URSS, 328. (in Russian)

9. Звягинцева А.В. 2016. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем. Под науч. ред. д.т.н., проф. Г.В. Аверина. М., Спектр, 257.

Zviagintseva A.V. 2016. Verojatnostnye metody kompleksnoj ocenki prirodno-antropogennyhsistem [Probabilistic methods of a complex assessment of natural and anthropogenic systems] Pod nauch. red. d.t.n., prof. G.V. Averina. Moscow, Spektr, 257. (in Russian).

10. Звягинцева А.В., Константинов И.С. 2018. Прогнозирование социально-экономических показателей городов на основе феноменологических моделей. Информационные системы и технологии, 1(105): 5–15.

Zviaginceva A.V., Konstantinov I.S. 2018. Prognozirovanie social'no-jekonomicheskikh pokazatelej gorodov na osnove fenomenologicheskikh modelej [Forecasting of social and economic indicators of the cities on the basis of phenomenological models]. Informacionnye sistemy i tehnologii, 1(105): 5–15.

11. Костенко Б.Б., Кузнецов С.Д. 2007. История и актуальные проблемы темпоральных баз данных. URL: <http://citforum.ru/database/articles/temporal/> (дата обращения: 3 февраля 2018).

Kostenko B.B., Kuznecov S.D. 2007. Istorija i aktual'nye problemy temporal'nyh baz dannyh [History and actual problems of temporal databases]. Available at: <http://citforum.ru/database/articles/temporal/> (accessed 3 February 2018).

12. Робертс Д. 1950. Теплота и термодинамика. М., Изд. технико-теор. литературы, 592.

Roberts D. 1950. Teplota i termodinamika [Heat and thermodynamics]. Moscow, Izd. tehniko-teor. literatury, 592. (in Russian)



13. Словохотов Ю.Л. 2012. Физика и социофизика. Ч. 1–3. Проблемы управления, 1: 2–20, 2: 2–31, 3: 2–34.
Slovohotov J.L. 2012. Fizika i sociofizika [Physics and social physics]. Ch. 1–3. Problemy upravlenija, 1: 2–20, 2: 2–31, : 2–34. (in Russian)
14. Форрестер Дж. 1974. Динамика развития города: пер. с англ. М., Прогресс, 224.
Forrester Dzh. 1974. Dinamika razvitija goroda [Dynamics of the city development]: per. s angl. Moscow, Progress, 224.
15. Econophysics and sociophysics: trends and perspectives. 2006. В.К. Chakrabarti, A. Chakraborti, A. Chatterie (eds.). Berlin, Wiley-VCH, 622.
16. Encyclopedia of complexity and systems science. 2009. R.A. Meyers (Editor-in-chief). Berlin, Springer, 10370.
17. Forrester Jay W. 1973. World Dynamics, (2 ed.). Waltham, MA: Pegasus Communications, 144.
18. Lillo F. 2008. Econophysics and the challenge of efficiency. Complexity. Vol. 14, 3: 39–54.
19. Mathematical modeling of collective behavior in socio-economic and life sciences. G. Naldi, L. Pareschi, G. Toskani (eds.). Berlin, Springer, 2010, 438.
20. Newman M.E.J. 2011. Complex systems: a survey. Amer. J. Phys., Vol. 79: 800–810, arXiv:1112.1440v1. Available at: <https://arxiv.org/archive/cond-mat/stat-mech> (accessed 3 February 2018).
21. The dynamics of complex urban systems. An interdisciplinary approach. 2007. S. Albeverio, et al. (eds.). Berlin, Springer, 504.