

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКАХ О ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
Основан в октябре 2011 года

№1(6) - 2(7)'2014

Донецк



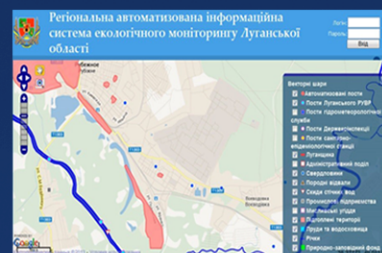
# Разработки и достижения кафедры компьютерных систем мониторинга



# Разработки и достижения кафедры компьютерных систем мониторинга Донецкого национального технического университета

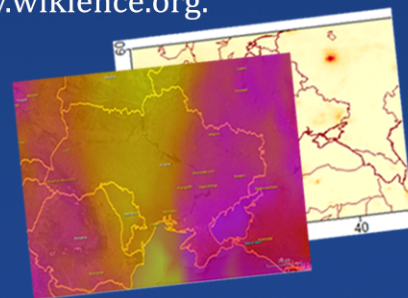
2010 Программно-аппаратный комплекс экологического мониторинга Донецко-Макеевского региона «АКИАМ».  
Комплекс «АКИАМ» предназначен для автоматизации мониторинга загрязнения атмосферного воздуха диоксидом серы, диоксидом азота, оксидом углерода и пылью, контроля метеопоказателей, а также представления, обработки, передачи, хранения и анализа экологической информации.

2011 Автоматизированные системы экологического мониторинга Донецкой и Луганской областей.  
Автоматизированные системы экологического мониторинга позволяют контролировать показатели загрязнения атмосферного воздуха и поверхностных вод, вести экологические и метеорологические базы данных, представлять тематические карты в геоинформационной системе, а также повысить эффективность экологического контроля за счет автоматизации процесса регистрации информации, ее передачи, обработки, анализа и хранения.



2012 Национальные доклады и труды кафедры.  
Подготовлены два документа национального уровня:  
- Национальный доклад Украины «Обмен информацией: Совместная система экологической информации (SEIS)»:  
[http://enpi-seis.ew.eea.europa.eu/east/ukraine/enpi-seis\\_country\\_report\\_ukraine\\_final.pdf](http://enpi-seis.ew.eea.europa.eu/east/ukraine/enpi-seis_country_report_ukraine_final.pdf);  
- Национальный доклад Украины «Инвентаризация выбросов и мониторинг качества воздуха в Украине»:  
<http://www.airgovernance.eu/index.php?a=main&pid=25&lang=en>.  
Вышли в свет два выпуска сборника научных трудов «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе»:  
<http://csm.donntu.org/ru/node/120>.

2013 Платформа для хранения геоданных и визуализации многолетних климатических и экологических данных: <http://www.wikience.org>.  
Информационная технология обработки спутниковых данных и мультиспектральных снимков, которая не имеет аналогов в мире. Для научного сообщества внедрение системы позволит применить новую модель ведения исследований и обмена результатами среди метеорологов и экологов.



2014 Вышли в свет три монографии сотрудников кафедры проф. Аверина Г.В. и доц. Беловодского В.Н., посвященные системному анализу и общей теории систем, линейной алгебре и аналитической геометрии:  
<http://www.chronos.msu.ru/ru/rrules/item/sistemodinamika-2>.

УДК 001.5:004.9

Публикуется по решению Ученого совета государственного высшего учебного заведения «Донецкий национальный технический университет» (протокол № 7 от 26.09.2014).

Настоящий сборник научных трудов посвящен междисциплинарным исследованиям в науках о природе и обществе. Публикации охватывают широкий спектр проблем – от фундаментальных вопросов системного анализа до прикладных разработок в области информационных технологий.

Материалы сборника предназначены для научных сотрудников, преподавателей, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов, научные интересы которых связаны с системным анализом и моделированием, междисциплинарными исследованиями и информационными технологиями в науках о природе и обществе.

Выпуск сборника научных трудов осуществлен факультетом компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета.

This journal issue is devoted to interdisciplinary research in environmental and social sciences. Publications cover the broad scope of problems – from fundamental questions of system analysis to applied developments in information technology.

The journal is for researchers, teachers, engineers, students whose research interests are related to the system analysis and modeling, interdisciplinary research and information technology in environmental and social sciences.

The issue of the journal was carried out by the computer science and technology department of Donetsk National Technical University.

**Учредитель и издатель** – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет».

Сборник научных трудов основан в октябре 2011 года, выходит 2 раза в год.

**Редакционная коллегия:** Минаев А.А., чл.-кор. НАНУ (главный редактор); Башков Е.А., д-р техн. наук, проф. (первый заместитель главного редактора); Аверин Г.В., д-р техн. наук, проф. (заместитель главного редактора); Аноприенко А.Я., канд. техн. наук, проф.; Звягинцева А.В., канд. техн. наук, доц. (отв. секретарь выпуска); Беловодский В.Н., канд. техн. наук, доц.; Губенко Н.Е., канд. техн. наук, доц.; Каргин А.А., д-р техн. наук, проф.; Недопекин Ф.В., д-р техн. наук, проф.; Костюкова Н.С., канд. техн. наук, доц.; Святный В.А., д-р техн. наук, проф.; Фельдман Л.П., д-р техн. наук, проф.; Григорьев А.В., канд. техн. наук, доц.

Сборник научных трудов зарегистрирован в Министерстве юстиции Украины. Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации. Серия КВ № 17409-6179 Р от 05.01.2011 г.

© Авторы статей  
© ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И  
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В  
НАУКАХ О ПРИРОДЕ И ОБЩЕСТВЕ**

**Сборник научных трудов**

**Основан в октябре 2011 года**

**Выходит 2 раза в год**

**№1(6)–2(7)'2014**

**ДОНЕЦК**

# Системный анализ в науках о природе и обществе

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ОСНОВАН В ОКТЯБРЕ 2011 ГОДА

№1(6)-2(7)'2014

---

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Введение.....	8
<b>Систематизация знаний и построение теорий</b>	
<i>Аноприенко А.Я.</i> Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности.....	11
<i>Аверин Г.В.</i> Общая теория систем: проблема создания формализованных теорий в области гуманитарного знания.....	30
<i>Беловодский В.Н., Смирнов А.Н.</i> Метод гармонического баланса и глобальный анализ динамических систем.....	42
<b>Системный анализ, моделирование и прогнозирование</b>	
<i>Андрюхин А.И.</i> Моделирование нейроморфных систем на переключательном уровне.....	49
<i>Польщиков К.А.</i> Нейроно-нечеткое прогнозирование длительности ожидания подтверждений в телекоммуникационной сети.....	57
<i>Климко Г.Т.</i> Метод координатной функции Фока, интегральные соотношения между спиновыми и зарядовыми распределениями, их свойства.....	62
<i>Бельков Д.В., Едемская Е.Н.</i> Анализ динамики уровня воды в Днестре, Припяти и реках Закарпатья.....	70
<i>Звягинцева А.В.</i> Многопараметрическое ранжирование территорий на основе анализа данных о состоянии природно-антропогенных систем.....	76

<i>Клюев В.В., Аверин Г.В.</i> Оценка фрагментации экологической сети Луганской области.....	84
<i>Харитонов А.Ю.</i> Анализ энергоэффективности муниципальных объектов с помощью методов системной динамики.....	91
<b>Автоматизированные системы и информационные технологии</b>	
<i>Григорьев А.В.</i> Концептуальная модель предметной области инструментальной оболочки для автоматизации построения интеллектуальных САПР.....	98
<i>Достлев Ю.С.</i> Особенности формирования свойств модулей обработки периодических событий в системах реального времени.....	117
<i>Аверин Г.В., Звягинцева А.В.</i> Модели данных для отдельных проблемно-ориентированных баз данных.....	121
<b>Аналитические обзоры и обобщения</b>	
<i>Звягинцева А.В.</i> Системы оценки опасности и риска при загрязнении атмосферного воздуха: попытка обобщения подходов.....	131
<b>Сведения об авторах на русском языке.....</b>	164
<b>Сведения об авторах на украинском языке.....</b>	167
<b>Сведения об авторах на английском языке.....</b>	170

# Системний аналіз у науках про природу та суспільство

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

ЗАСНОВАНО У ЖОВТНІ 2011 РОКУ

№1(6)-2(7)'2014

---

## З М І С Т

Вступ .....	8
<b>Систематизація знань і побудова теорій</b>	
<i>Анопрієнко О.Я.</i> Системодинаміка ноотехносфери: основні закономірності.....	11
<i>Аверін Г.В.</i> Загальна теорія систем: проблема створення формалізованих теорій в галузі гуманітарного знання.....	30
<i>Беловодський В.М., Смирнов О.М.</i> Метод гармонійного балансу та глобальний аналіз динамічних систем.....	42
<b>Системний аналіз, моделювання та прогнозування</b>	
<i>Андрюхін О.І.</i> Моделювання нейроморфних систем на перемикаючому рівні.....	49
<i>Польщиков К.О.</i> Нейро-нечітке прогнозування тривалості очікування підтверджень в телекомунікаційній мережі.....	57
<i>Климко Г.Т.</i> Метод просторової функції Фока, інтегральні співвідношення між спіновими і зарядовими густинами, їхні властивості.....	62
<i>Бельков Д.В., Єдемська Є.М.</i> Аналіз динаміки рівня води у Дністрі, Прип'яти та річках Закарпаття.....	70
<i>Звягінцева Г.В.</i> Багатопараметричне ранжування територій на основі аналізу даних про стан природно-антропогенних систем.....	76



<i>Клюев В.С., Аверін Г.В.</i> Оцінка фрагментації екологічної мережі Луганської області.....	84
<i>Харитонов А.Ю.</i> Аналіз енергоефективності муніципальних об'єктів за допомогою методів системної динаміки.....	91
<b>Автоматизовані системи та інформаційні технології</b>	
<i>Григор'єв О.В.</i> Концептуальна модель предметної області інструментальної оболонки для автоматизації побудови інтелектуальних САПР.....	98
<i>Достлев Ю.С.</i> Особливості формування властивостей модулів обробки періодичних подій у системах реального часу.....	117
<i>Аверін Г.В., Звягінцева Г.В.</i> Моделі даних для окремих проблемно-орієнтованих баз даних.....	121
<b>Аналітичні огляди та узагальнення</b>	
<i>Звягінцева Г.В.</i> Системи оцінки небезпеки при забрудненні атмосферного повітря: спроба узагальнення підходів.....	131
<b>Відомості про авторів російською мовою.....</b>	164
<b>Відомості про авторів українською мовою.....</b>	167
<b>Відомості про авторів англійською мовою.....</b>	170

**CONTENTS**

Introduction.....	8
<b>Knowledge systematization and theory construction</b>	
<i>Anopriyenko A.Y.</i> System dynamics of nootehnosphere: basic laws.....	11
<i>Averin G.V.</i> General systems theory: the problem of creating formalized theories in the domain of humanitarian knowledge.....	30
<i>Belovodskiy V.N., Smirnov A.N.</i> Harmonic balance method and global analysis of dynamical systems.....	42
<b>System analysis, modeling and forecasting</b>	
<i>Andruckin A.I.</i> Switch-level modeling of neuromorphic systems.....	49
<i>Polschykov K.O.</i> Neuro-fuzzy prediction of confirmations waiting time in telecommunication network.....	57
<i>Klimko G.T.</i> The Fock coordinate wave function method, the integral relations between spin and charge densities, its properties .....	62
<i>Belkov D.V., Edemskay E.N.</i> Analysis of dynamics of water level in Dnestr, Prypyat and rivers of Carpathians region.	70
<i>Zviagintseva A.V.</i> Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems.....	76

<i>Kliuiev V.E., Averin G.V.</i> Evaluation the fragmentation of ecological network of Luhansk region.....	84
Kharytonov A.J. The analysis of municipal object’s energy efficiency with methods of system dynamics..	91
<b>Automated systems and information technology</b>	
<i>Grigoryev A.V.</i> The instrumental shell conceptual model domain to automate the intelligent CAD construction.....	98
<i>Dostlev Y.S.</i> Features of formation properties of processing modules periodic events in real-time.....	117
<i>Averin G.V., Zviagintseva A.V.</i> Data models for certain problem-oriented databases.....	121
<b>Analytical surveys and generalization</b>	
<i>Zviagintseva A.V.</i> Systems of risk assessment when air pollution: an attempt to summarize the approaches.....	131
<b>Information about the Authors in Russian</b> .....	164
<b>Information about the Authors in Ukrainian</b> .....	167
<b>Information about the Authors in English</b> .....	170

## Введение

(Hominus, dum docent, discunt)

Обучая – учимся

В этом году Донецкому техническому университету исполнилось девяносто три года. Вуз основан в 1921 году группой известных русских ученых. Сегодня университет переживает сложный период своей истории. На Донбассе идет война. Донбасс – это наша родина, а ДонНТУ – яркий символ этого края. Нам приходится принимать на себя те вызовы, которые ставит жизнь перед ДонНТУ. Задача нашего университета в это сложное время вести образовательную, просветительскую и научную деятельность так, как это делали наши коллеги на протяжении всего времени, несмотря на беды, потрясения и трудности, которые уже не раз бывали в истории ДонНТУ. Войны всегда заканчиваются, и жизнь требует решения новых и масштабных задач созидания, поэтому именно нам готовить инженеров для восстановления разрушенного края.



Хороший инженер должен не только иметь необходимые знания и навыки, но и уметь стратегически мыслить и «видеть» будущее. Развить системное мышление у человека очень не просто, только трудолюбие, фундаментальные знания, опыт и научная деятельность позволяют это сделать. «Что имеет значение? Фантазия в первую очередь. А еще дар к абстрактному мышлению» (А.А. Алехин). Поэтому надо развивать у студентов и аспирантов способности мечтать и формализовывать свои идеи. Мечты порождают новые идеи, а умственный труд над ними моделирует новшества и воплощает их в реальность.

Шестой и седьмой номера сборника научных трудов университета «Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе» включают публикации, посвященные проблемам моделирования. Методология моделирования сегодня оформилась в целую область научного знания. Существующие методы и средства исследования и моделирования систем, процессов и явлений позволили сформировать научный метод познания – системный анализ, а вся область знания стала ветвиться на разнообразные научные дисциплины: общая теория систем, математическое моделирование систем и процессов, экономико-математическое моделирование, компьютерное, имитационное и геоинформационное моделирование, предсказательное и прогностическое моделирование и т.д.

Однако на фоне бурного развития этой научной области в теории моделирования систем назревает кризис – количество методов и средств анализа и моделирования растет очень быстрыми темпами, а экспериментальная и опытная база для их апробации существенно отстает. При этом нельзя сказать, что данных не достаточно, чаще всего эти данные не структурированы и представляют собой хранилища разноплановой информации, которая требует значительного труда по обработке и ассимиляции данных. Работа с данными опыта и наблюдений и, особенно, с большими данными – это первая актуальная проблема системного анализа, моделирования процессов и применения информационных технологий. Разработка современных методов феноменологического описания данных крайне важна для верификации моделей, получаемых в процессе абстрактного моделирования систем, и установления новых закономерностей.

Вторая проблема связана с применением естественнонаучных методов исследований в биологических, экологических и социогуманитарных науках. Цель таких исследований связана с созданием формализованных теорий в областях знаний, где сегодня применяются в основном методы качественного описания процессов и явлений. Третья важная проблема связана с комплексной оценкой объектов, процессов и явлений, использованием новых методов моделирования, а также ретроспективным и прогностическим анализом динамики состояний систем различной природы.

Статьи данного научного сборника затрагивают указанные выше проблемы в самых разных предметных областях. Надеемся, что материалы сборника будут способствовать росту интереса у исследователей к указанным выше научным направлениям, а также более интенсивному научному обмену и сотрудничеству в этой области.

*проф. А.Я. Аноприенко*

## ***Раздел 1***

# ***Систематизация знаний и построение теорий***

УДК 001.51:122

## Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности

Аноприенко А.Я.

Донецкий национальный технический университет  
anoprien@gmail.com

*Аноприенко А.Я. «Системодинамика ноотехносферы: основные закономерности». Системодинамику ноотехносферы можно определить как науку о закономерностях процессов развития и изменения во времени глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры, а также входящих в ее состав аппаратно-программных и информационных ресурсов и систем. В данной работе систематизированы и обобщены эмпирические наблюдения, которые характеризуют системодинамику ноотехносферы, и предложены зависимости, позволяющие в наиболее краткой и сжатой форме представить основную совокупность известных на сегодня в данной области закономерностей и названные обобщенным законом Мура. Показано, что многообразие основных закономерностей, характеризующих закон Мура, может быть представлено в виде обобщенной зависимости, характеризующей зависимость наблюдаемых параметров ноотехносферы от времени. Предполагается, что выявленная система закономерностей обладает прогностическими свойствами необходимой точности на долгосрочную перспективу.*

**Ключевые слова:** системодинамика, ноотехносфера, экспоненциальный рост, закономерности развития компьютерных систем, обобщенный закон Мура

### Введение

Данная публикация содержит новые результаты, полученные в ходе выявления и исследования закономерностей развития современной информационно-компьютерной инфраструктуры, и является продолжением ряда работ автора, посвященных данной теме, в частности тех, результаты которых изложены в публикациях [1 – 4]. В данной работе впервые сделана попытка систематизации всего известного в этой области комплекса закономерностей и зависимостей (как правило, эмпирических) с точки зрения системодинамики.

Системодинамика традиционно определяется как наука о закономерностях процессов развития и изменения сложных систем во времени [5 – 6]. Термином «техносфера» академик А.Е. Ферсман в 20-е годы XX столетия обозначил среду обитания, которую формирует человек, используя разум и пользуясь искусственными орудиями труда [7]. Параллельно при активном участии академика В.И. Вернадского сформировалось понятие «ноосфера» – «сфера разума», рассматриваемая как следующая стадия развития биосферы. В современных условиях активного развития «интеллектуальной» информационно-компьютерной составляющей техносферы наблюдается тенденция объединения указанных терминов. В частности, в работе [7] утверждается, что «современная искусственная среда наиболее адекватно может интерпретироваться как ноотехносфера» и что «глобальный характер становления ноотехносферы обуславливает логику ее

интерпретации в качестве определяющей характеристики современной эпохи».

Под ноотехносферой в контексте данной публикации далее будем понимать «интеллектуальную» составляющую техносферы, т.е. информационно-компьютерный глобальный континуум, состоящий из множества компьютерных систем и размещенных на них информационных ресурсов различного состава, назначения и масштаба, интегрированных в единое целое сетевой инфраструктурой. В настоящее время наблюдается процесс интенсивного развития ноотехносферы, заключающийся в росте ее масштабов, качества, плотности, связности, производительности, насыщенности устройствами, программным обеспечением и информацией. По состоянию на сегодня ноотехносфера в целом представляет собой наиболее сложную из всех когда-либо созданных человеком систем, и сложность ее продолжает стремительно увеличиваться.

Таким образом, системодинамику ноотехносферы можно определить как науку о закономерностях и особенностях процессов развития и изменения во времени современной глобальной информационно-компьютерной инфраструктуры, а также входящих в ее состав аппаратно-программных и информационных ресурсов и систем.

В данной работе систематизированы и обобщены известные эмпирические закономерности, которые характеризуют системодинамику ноотехносферы, и предложены зависимости, позволяющие в наиболее краткой и сжатой форме представить основную

совокупность известных на сегодня в данной области закономерностей. Полученные зависимости предложено назвать обобщенным законом Мура.

### **Закон Мура и законы его развития**

Так называемый «закон Мура» приобрел на сегодня статус фактически главной закономерности, определяющей технический прогресс не только в компьютерных технологиях, но и во многих других областях науки и техники. В то же время нарастает неоднозначность и неопределенность в понимании того, что же в действительности определяет данная закономерность. Современный диапазон интерпретаций закона Мура распространяется от наиболее широкого его понимания как практически любой формы экспоненциального развития систем до наиболее узкого понимания, предполагающего удвоение ряда показателей компьютерной техники каждые 1,5 года. Последний вариант интерпретации закона, являющийся на сегодня наиболее популярным, самим Муром, как это ни парадоксально, никогда не формулировался. В целом можно утверждать, что в настоящее время в связи со стремительным расширением использования термина «закон Мура» созрела необходимость всесторонне проанализировать все проявления данной закономерности и перейти к более точным и однозначным формулировкам и определениям.

Гордон Мур, один из основателей корпорации Интел, в 1965 году впервые высказал предположение, что интенсивное развитие цифровой микроэлектроники позволит ежегодно удваивать количество активных элементов на кристалле [8]. Однако уже в 1975 году ему пришлось сделать существенное уточнение: в долговременной перспективе удвоение сложности интегральных схем возможно лишь каждые 2 года [9], что в дальнейшем, как показывает детальный анализ, полностью подтвердилось (рис. 1, 2). Своё название данная закономерность получила в 1970-е годы благодаря Карверу Миду (Carver Mead) – преподавателю Калифорнийского технологического института, сотруднику основанной Гордоном Муром лаборатории и автору первого учебного пособия по проектированию сверхбольших интегральных схем [10].

Таким образом, необходимо четко различать как минимум два варианта закона Мура (словосочетание «закон Мура» используется с 1970 года и сегодня считается общепринятым), которые можно обозначить в соответствии с годом их появления как «закон Мура 1965» и «закон Мура 1975». Целесообразно также ввести для дальнейшего

использования сокращенные обозначения для различных версий данного закона, состоящие из аббревиатуры ML (от англоязычного исходного наименования данной эмпирической закономерности как Moore's law) и года появления соответствующей версии закона: ML1965, ML1975 и т.д.

Часто цитируемый в литературе интервал в 18 месяцев самим Гордоном Муром никогда не рассматривался, он лишь высказывал предположение, что реальный период удвоения производительности может составлять примерно 20 месяцев, но в действительности это не подтвердилось. Предложенный период в 18 месяцев связан с прогнозами его коллег, пришедших к середине 80-х годов к выводу о том, что производительность процессоров должна удваиваться каждые 18 месяцев из-за сочетания роста количества транзисторов и быстродействия каждого из них. Эту весьма популярную на сегодня интерпретацию имеет смысл обозначить как «закон Мура 1985» (ML1985) – именно об этой версии закона, как правило, по умолчанию ведется речь, когда упоминается факт экспоненциального роста многих показателей в области компьютерных технологий.

Следует отметить, что при достаточно известной и однозначно определенной дате появления первого варианта закона Мура (1965 год) и благодаря последовавшему ровно через 10 лет его существенному уточнению, каждые последующие юбилейные даты активизировали обсуждение данной закономерности и порождали новые варианты ее формулировки и интерпретации.

Сам Гордон Мур, изначально предполагавший не более чем десятилетний период бурного роста с ежегодным удвоением показателей, на каждый такой юбилей (начиная с 1975 года) с завидной регулярностью (рис. 3) продлевал возможный срок действия закона своего имени еще на одно десятилетие. В связи с этим можно сформулировать своеобразный первый закон развития закона Мура: каждое десятилетие появляются достаточные основания продлить срок действия закона еще минимум на десятилетие.

Кроме этого, уже начальный период развития показал, что примерно к середине каждого десятилетия (начиная с 1960-х годов) появляется новая модификация закона, которая существенно дополняет известные ранее эмпирические наблюдения. Данный факт позволяет сформулировать второй закон развития закона Мура, суть которого заключается в том, что каждое десятилетие выявляется новая модификация эмпирической закономерности, которая дополняет предыдущие и характеризует либо особенности



экспоненциального развития компьютерных технологий или систем, либо разные темпы их развития на различных этапах эволюции. Закономерности, выявленные в 1965, 1975 и 1985 гг., описывающие относительно простые показатели, связанные с ростом степени интеграции и быстродействия цифровых микросхем, целесообразно назвать первым поколением законов Мура – именно эта группа версий закона наиболее известна.

Последующие десятилетия развития компьютерных технологий позволили выявить аналогичные закономерности и по целому ряду других показателей, связанных с ростом сложности микросхем лишь косвенно. Эту группу будем называть вторым поколением законов Мура.

Начало второму поколению выявленных закономерностей было положено в середине 90-х годов, когда созрел так называемый «второй закон Мура», определяющий экспоненциальный рост стоимости производства микросхем по мере их усложнения в соответствии с «первым законом Мура». Гордон Мур в 1995 году впервые достаточно убедительно показал, что дальнейший экспоненциальный рост полупроводниковой промышленности может существенно сдерживаться исходя из сугубо экономических ограничений, связанных с экспоненциальным удорожанием соответствующих средств производства [12]. В частности он обратил внимание на то, что стоимость строительства новой и более современной фабрики по производству микросхем удваивается примерно каждые 4 года. В последующем длительность периода удвоения стоимости фабрик в различных исследованиях уточнялась. При этом указывались периоды в 5 и 6 лет, что в конечном итоге привело к признанию того факта, что эта стоимость изменяется примерно на порядок за 20 лет (рис. 4). Этот факт обозначим как «закон Мура 1995» (ML1995). Данную закономерность иногда также называют законом Рока (Rock's law) в честь Артура Рока, который в 1968 г. помог своими инвестициями основать корпорацию «Intel».

Примерно такими же темпами нарастали стоимость фотолитографического оборудования, объемы выпуска кремниевых пластин для производства микросхем и масштабы полупроводниковой промышленности в целом. Все это при сохранении нынешних темпов развития в ближайшие десятилетия ведет к достижению полупроводниковой промышленностью суммарного уровня производства, равного в стоимостном выражении суммарному уровню производства всех видов продукции всего мирового хозяйства [12]. Экстраполяция наблюдавшихся в середине

90-х годов тенденций приводила к выводу, что произойти это должно было примерно к 2050 году (рис. 5).

Естественно, эта ситуация представлялась несколько абсурдной даже с учетом стремительно нарастающей доли «полупроводникового хозяйства» в мировой экономике. Поэтому единственно возможный вывод из всего этого заключался в том, что примерно в 20-е годы XXI столетия действие закона Мура в его нынешнем виде станет невозможным по сугубо экономическим причинам. Именно на это обратил внимание Гордон Мур в 1995 году [12]. В дальнейшем его наблюдения подтвердили другие известные исследователи [13].

К 2005 году выявились и новые фундаментальные технологические ограничения, которые существенно ограничивали дальнейший экспоненциальный рост характеристик микропроцессоров. В частности, по мере увеличения частоты синхронизации в 32-разрядных микропроцессорах плотность энергии в расчете на единицу площади кристалла с середины 80-х годов возрастала каждые 10 лет примерно на порядок (рис. 6), что приводило к стремительному увеличению нагрева кристаллов и катастрофическому усугублению проблем с теплоотводом. Экстраполяция этих тенденций на ближайшие десятилетия показывала неуклонное приближение температуры нагрева кристаллов к невероятным значениям, характерным, например, для рабочей зоны ядерных реакторов [14].

Ярко проявившаяся к 2005 году закономерность роста плотности энергии в микропроцессорах (десятикратно за десятилетие – целесообразно обозначить это как «закон Мура 2005» или ML2005) привела к коренному пересмотру технической политики в дальнейшем развитии микропроцессорных технологий: рост частоты синхронизации практически прекратился. При этом дальнейший рост производительности обеспечивался за счет тотального распараллеливания вычислительных процессов, в частности, путем наращивания количества вычислительных ядер в процессорах и роста числа процессоров на кристалле (рис. 7).

Одной из особенностей второго поколения законов Мура, как мы видим, является не только и не столько выявление и констатация наблюдаемых темпов экспоненциального развития, но и определение пределов роста. Причем в случае «закона Мура 2005» выявленный предел оказал практически немедленное воздействие на особенности дальнейшего развития микропроцессоров.

С приближением 50-летия закона Мура выявилась еще одна любопытная закономерность, связанная в первую очередь с ростом производительности наиболее мощных компьютерных систем. Благодаря статистике роста производительности 500-т наиболее мощных суперкомпьютеров, собираемой и регулярно публикуемой с 1993 года (список «Тор500»), выявилась закономерность, которая не укладывалась в известные до этого варианты закона Мура: производительность росла практически точно на порядок каждые 4 года. Выяснилось также, что такие темпы экспоненциального роста (ранее не подтвердившиеся применительно к росту стоимости фабрик полупроводников) наблюдаются и в ряде других случаев. Например, этой закономерности подчиняется рост количества вычислительных ядер в суперкомпьютерных системах, снижение стоимости хранения гигабайта информации на внешних носителях, глобальный ежегодный рост производства накопителей на жестких дисках, выраженный в виде их суммарной емкости, количество сетевых прикладных программных интерфейсов и т.д. Данную закономерность целесообразно обозначить как «закон Мура 2015» (ML2015). В отличие от двух других законов Мура второго поколения данная закономерность имеет более общий характер и в большинстве случаев может экстраполироваться на обозримое будущее без каких-либо существенных ограничений.

Таким образом, за 50 лет существования закона Мура выявилось не менее шести его модификаций, характеризующихся различными темпами экспоненциального роста. Такое разнообразие вносит существенную путаницу в использование самого понятия «закон Мура» и настоятельно требует на текущем этапе его переосмысления и обобщения.

### **Обобщенный закон Мура**

В идеале необходимо выявить закономерность, связывающую все известные на сегодня варианты закона Мура в единую систему, описываемую достаточно простыми функциональными зависимостями.

В процессе уточнения реальных ежегодных коэффициентов роста (ЕКР) и различных попыток их систематизации такая зависимость в итоге была выявлена. Она оказалась достаточно простой и изящной, вполне сопоставимой со знаменитой формулой  $E=mc^2$ , связывающей массу и энергию. Добиться этого удалось в процессе упорядочивания всех известных к 2015 году вариантов закона Мура в соответствии с возрастанием темпов экспоненциального роста. При этом максимально уточнялись значения как

ЕКР, так и коэффициентов роста за различные многолетние периоды. В процессе исследований выяснилось, что коэффициенты роста для всех шести вариантов выстраиваются в единую шкалу, в рамках которой, начиная с «самой медленной» закономерности ML1995 с ЕКР, равным примерно 1,122, для каждого последующего «более быстрого» варианта закономерности наблюдается возрастание коэффициентов роста в 1,122 (табл. 1). На основании данного наблюдения была получена следующая зависимость:

$$P_i = P_0 \cdot 2^{L(Y_i - Y_0)/6}, \quad (1)$$

где  $L$  – коэффициент, равный порядковому номеру закономерности при их упорядочивании в соответствии с возрастанием темпов экспоненциального роста (табл. 1);

$Y_0$  – начальный год действия соответствующей закономерности;

$Y_i$  – текущий год действия соответствующей закономерности;

$P_0$  – значение наблюдаемого параметра в начальном году;

$P_i$  – значение наблюдаемого параметра в искомом году.

При этом в качестве наиболее краткого обозначения каждого варианта закона Мура используется обозначение  $L_j$ , где в качестве элемента  $j$  предлагается значение  $L$  для каждого из вариантов. При этом само символьное обозначение  $L$  в соответствии с англоязычными терминами, начинающимися на эту букву, можно интерпретировать и как номер варианта закона (англ. Law), и как уровень (англ. Level) или скорость экспоненциального роста.

Зависимость (1), которую можно рассматривать в качестве обобщенного закона Мура, обладает целым рядом интересных особенностей. В частности, за 6-летний период коэффициенты роста описываются степенями двойки и имеют значение  $2^L$ . Особенно примечательным является тот факт, что за 20-летний период коэффициенты роста имеют значение  $10^L$ . В большинстве случаев действие различных вариантов закона Мура наблюдается на протяжении уже более чем 20-ти лет. Знание этого факта позволяет наиболее просто классифицировать все закономерности роста в соответствии с шестью уровнями или скоростями экспоненциального роста. К настоящему времени проанализированы десятки различных процессов экспоненциального роста в ноотехносфере, некоторые примеры которых приведены далее. Самое удивительное заключается в том, что в большинстве случаев наблюдается довольно точное соответствие одному из 6-ти вариантов закономерности. Но некоторые отклонения от точного соответствия

зависимости (1) вполне естественны и иногда наблюдаются. Поэтому в наиболее общем случае должен учитываться поправочный или уточняющий коэффициент  $k$ , что приводит зависимость к следующему виду:

$$P_i = k \cdot P_0 \cdot 2^{L(Y_i - Y_0)/6}. \quad (2)$$

В большинстве случаев с точностью до нескольких знаков (как правило, 3-х) после запятой  $k = 1$ . Однако в общем случае величина  $k$  может принимать значения в диапазоне от 0,944 до 1,059. При этом, если  $k < 1$ , то соответствующий вариант закономерности целесообразно обозначать как « $Lj-$ », например, « $L4-$ », а если  $k > 1$ , то следует использовать обозначение « $Lj+$ », например, « $L4+$ ». Следует также иметь в виду, что хотя в данной статье все значения и приводятся с точностью не более 3-х десятичных знаков после запятой, в процессе анализа и расчетов использовались значения с 10-ю знаками после запятой. В частности ЕКР для «самого медленного» варианта ML1995 в статье для краткости принимается равным 1,122, но в действительности составляет 1,1224620483. Такое же значение имеет и «коэффициент ускорения» при переходе от одного варианта закономерности к следующей.

Некоторые из вариантов закона Мура, представленные в таблице 1, имеют свои специфические особенности. Например, зависимость  $L4$  при рассмотрении роста показателей год за годом практически полностью соответствует ряду Фибоначчи, а зависимость  $L5$  каждые 2 года и зависимость  $L1$  каждые 10 лет дают коэффициент роста, близкий к значению числа  $\pi$ .

Еще одним удивительным фактом является то, что в современной ноотехносфере абсолютное большинство процессов роста достаточно точно вписывается в диапазон из 6-ти рассмотренных вариантов. Однако в ряде случаев процессы экспоненциального роста в техносфере или в природе могут по своим параметрам выходить далеко за пределы, характерные для ноотехносферы. В случае более медленных процессов целесообразно использовать обозначение « $L4--$ » (при этом  $k < 0,944$  или  $k \ll 0,944$ ), а в случае существенно более быстрых – « $L6++$ » (при этом  $k > 1,059$  или  $k \gg 1,059$ ).

Следует также иметь в виду, что экспоненциальный рост различных показателей имеет своеобразное зеркальное отражение в таком же экспоненциальном снижении ряда других показателей, например, стоимости, энергопотребления и т.п. В этом случае зависимости (1) и (2) приобретают, соответственно, вид (3) и (4):

$$P_i = P_0 / \left( 2^{L(Y_i - Y_0)/6} \right), \quad (3)$$

$$P_i = k \cdot P_0 / \left( 2^{L(Y_i - Y_0)/6} \right). \quad (4)$$

Пример такого зеркального отражения (но с разной скоростью изменений) представлен на рисунке 9.

### Примеры проявлений закона

Стремительное развитие ноотехносферы началось после завершения второй мировой войны и появления первых электронных цифровых вычислительных машин. Поэтому в большинстве случаев  $Y_0 > 1945$ . Но в каждом конкретном случае год начала действия той или иной закономерности определяется индивидуально. Причем далеко не всегда начало проявления той или иной закономерности совпадает с годом выявления соответствующего варианта закона Мура. Более того, применение обозначений вида  $L1, \dots, L6$  по сравнению с обозначениями, содержащими год выявления закономерности, является в большинстве случаев предпочтительным еще и потому, что, во-первых, закономерности, как правило, начинают проявляться задолго до того, как исследователи обращают на них внимание, а, во-вторых, для впервые выявленных закономерностей в дальнейшем находят самые разные аналоги, начинающие проявляться на самых разных этапах развития ноотехносферы. В частности, большинство действующих в настоящее время закономерностей в области развития современных компьютерных технологий актуализировалось с начала 90-х годов (рис. 10).

На рисунках 11 – 32 представлены некоторые характерные примеры из множества проанализированных элементов информационно-компьютерной инфраструктуры, свидетельствующие, что практически все исследованные экспоненциальные изменения достаточно точно соответствуют одной из 6-ти закономерностей обобщенного закона Мура.

### Заключение

Для большинства представленных в работе закономерностей были определены примерные даты начала их действия. Для некоторых закономерностей известны и приблизительные даты завершения их действия (или уже состоявшегося или предполагаемого). Но в целом, с учетом того, что в обозримом будущем процесс развития ноотехносферы будет продолжаться примерно с той же интенсивностью, что и в настоящее время, можно утверждать, что выявленная система закономерностей будет обладать достаточными прогностическими свойствами еще на много десятилетий вперед.

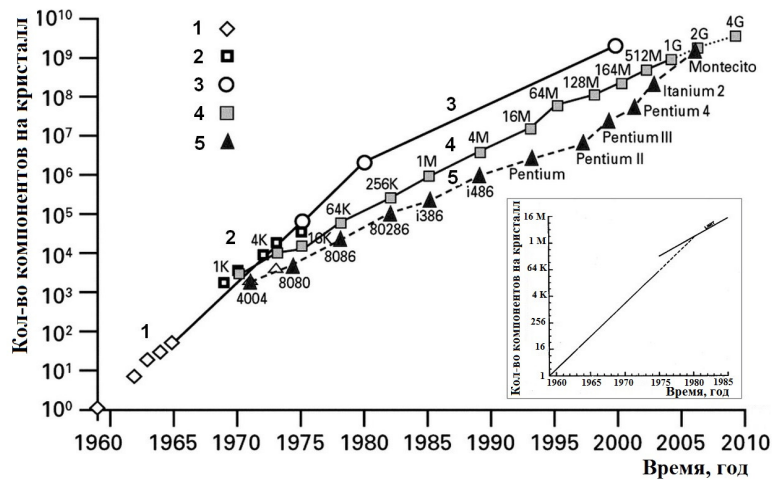


Рисунок 1. – Ожидаемый и реальный рост степени интеграции [11]:

1 – данные первой половины 60-х годов, на основании которых был сформулирован самый первый вариант закона Мура; 2 – реальные показатели степени интеграции микросхем памяти на рубеже 60-х и 70-х годов; 3 – прогноз Гордона Мура, сделанный в 1975 году; 4 – реальный рост степени интеграции микросхем памяти; 5 – реальный рост степени интеграции микропроцессоров. На врезке справа внизу – рисунок, которым завершается доклад Г. Мура в 1975 году [9], констатирующий, что десятилетие начального оптимизма «закона Мура 1965» (ежегодное удвоение) закончилось и начинается период реалистичного «закона Мура 1975» (удвоение каждые 2 года)

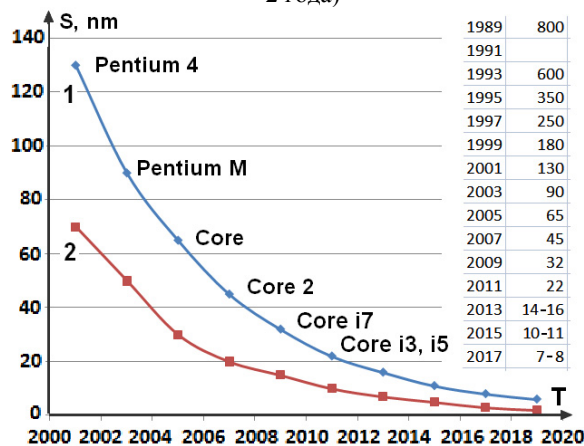


Рисунок 2. – «Закон Мура 1975» в действии:

уменьшение проектных норм микропроцессоров фирмы Интел в среднем в 2 раза каждые 4 года (в 1,4 раза каждые 2 года) в 1993 – 2018 гг. позволяет увеличивать количество активных элементов на той же площади кристалла в 2 раза каждые 2 года, но за счет увеличения размеров микропроцессоров обеспечивалось реальное увеличение количества транзисторов примерно в 2 раза каждые 1,5 года; кривая 1 – серийные микропроцессоры, кривая 2 – экспериментальные образцы

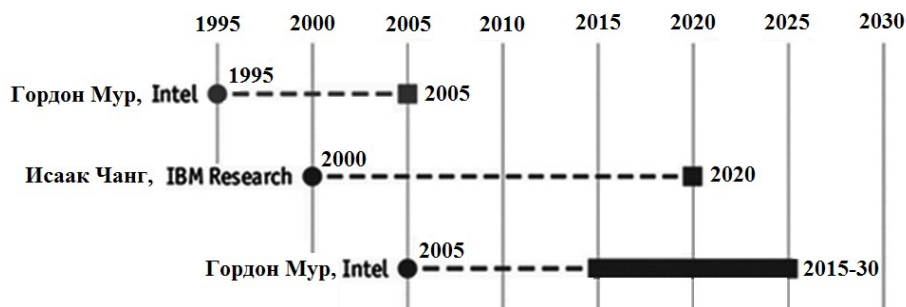


Рисунок 3. – Наиболее популярные прогнозы предстоящего срока действия закона Мура: круглым значком обозначен год публикации соответствующего прогноза, прямоугольником – прогнозируемый период завершения действия закона

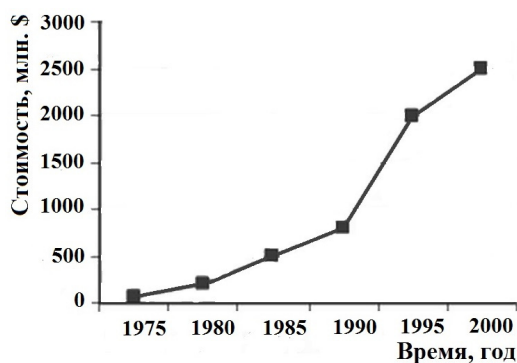


Рисунок 4. – Рост стоимости фабрик по производству микросхем в соответствии с «законом Мура 1995»: примерно на порядок за 20 лет



Рисунок 5. – Рост промышленности полупроводников на фоне роста суммарного уровня производства всех видов всего мирового хозяйства; источник информации: IMF, WSTS [12]

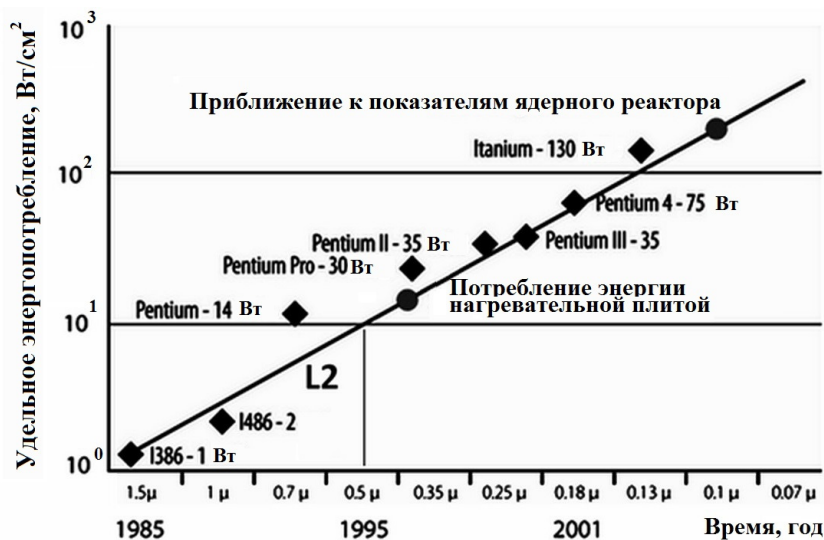


Рисунок 6 – Рост удельного потребления энергии в микросхемах неуклонно приближается к показателям рабочей зоны ядерного реактора; источник [14]

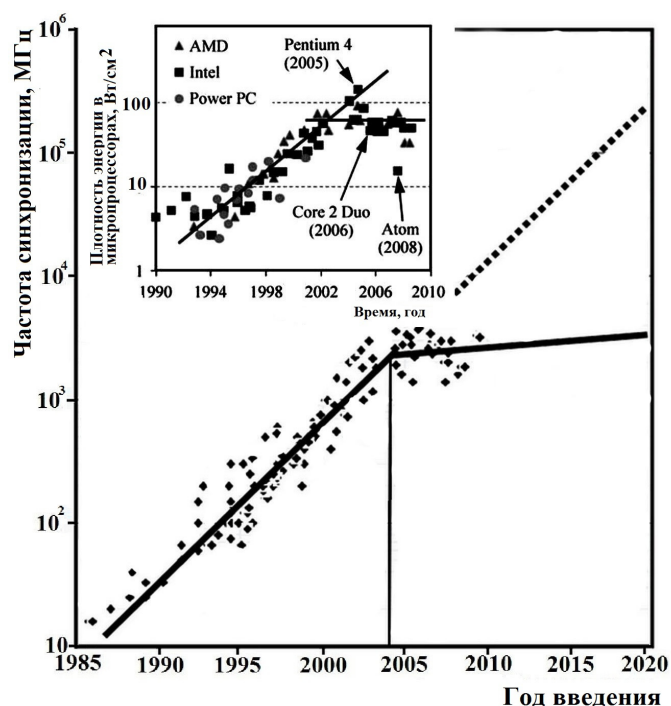


Рисунок 7. – Экспоненциальный рост частоты синхронизации микропроцессоров практически прекратился к 2005 году, что позволило предотвратить катастрофическое нарастание плотности энергии в микропроцессорах (рисунок-врезка слева сверху)

Таблица 1. – Основные закономерности роста для шести вариантов закона Мура

Законо- мерность	Описание закономерности	Обозна- чение	L	Коэффициент роста за указанный период (в годах)		
				1	6	20
ML1995	Рост в 10 раз каждые 20 лет	L1	1	1,122	2	10
ML2005	Рост в 10 раз каждые 10 лет	L2	2	1,260	4	102
ML1975	Закон Мура 1975: удвоение за 2 года	L3	3	1,414	8	1 024
ML1985	Закон Мура 1985: удвоение за 1,5 года (ряд Фибоначчи)	L4	4	1,587	16	10 321
ML2015	Рост в 10 раз каждые 4 года	L5	5	1,782	32	104 032
ML1965	Закон Мура 1965: ежегодное удвоение	L6	6	2	64	1 048 576

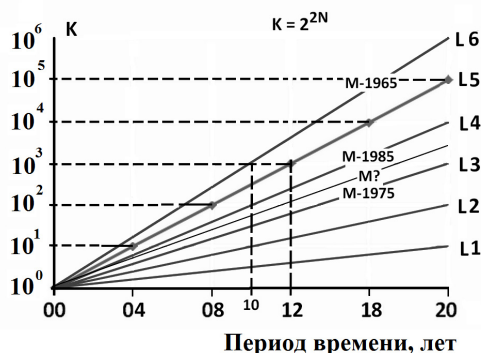


Рисунок 8. – Семейство базовых закономерностей экспоненциального роста L1 – L6, определяющих системодинамику ноотехносферы в пределах 20-летнего периода. Различные версии закона Мура обозначены как M-1965 (L6), M-1975 (L3) и M-1985 (L4). Гипотеза Мура о существовании закономерности удвоения примерно каждые 20 месяцев, не подтверждаемая фактическими данными, обозначена как «M?»

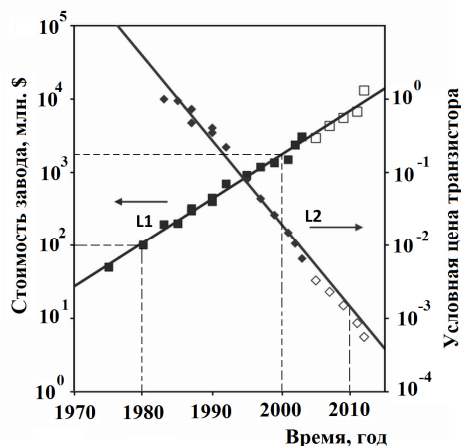


Рисунок 9. – Экспоненциальный рост стоимости все более современных заводов по производству полупроводников сопровождается аналогичным падением условной цены одного транзистора [15]

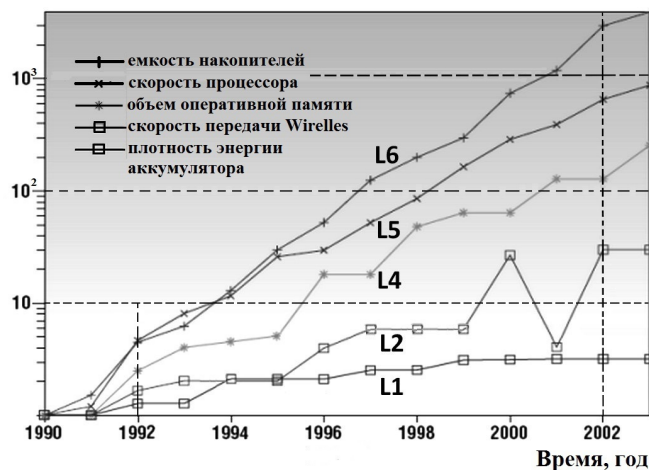


Рисунок 10. – Базовые закономерности L1 – L6 позволяют с достаточной точностью представить динамику роста самых различных характеристик современных компьютерных систем: L1 – рост плотности энергии батарей питания, L2 – рост скорости беспроводной связи, L4 – рост объемов оперативной памяти, L5 – рост скорости процессоров, L6 – рост емкости накопителей на жестких дисках (все данные представлены в относительных единицах по сравнению с уровнем 1990 года)

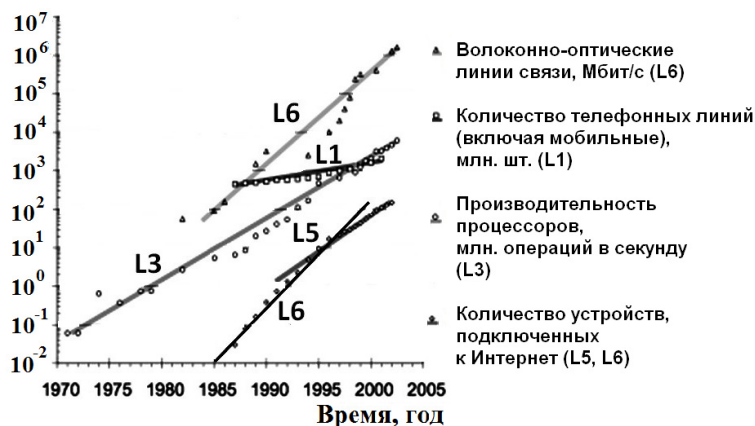


Рисунок 11. – Экспоненциальное развитие ноотехносферы сопровождается самыми различными процессами экспоненциального роста: L1 – рост количества телефонных линий (в миллионах, включая мобильную связь); L3 – рост производительности процессоров (в MIPS– миллионах операций в секунду); L6 – L5 – рост количества компьютеров, подключенных к Интернет (в миллионах); L6 – рост пропускной способности волоконно-оптических (Photonic) линий (Мбит/с); источник: ITU, Intel

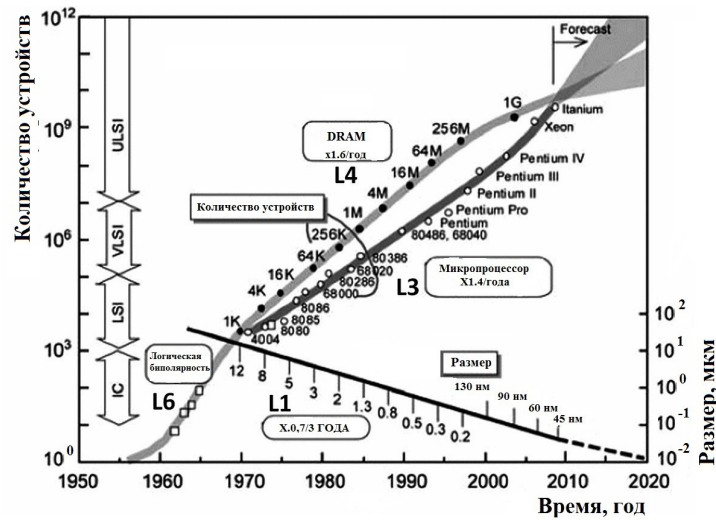


Рисунок 12. – Основные закономерности, определяющие динамику развития современных компьютерных технологий (по данным работы [16]): L1 – снижение проектных норм (правая шкала), L3 – рост количества активных элементов (транзисторов) в микропроцессорах в соответствии с законом Мура 1975 (левая шкала), L4 – рост объемов микросхем динамической оперативной памяти (DRAM) в соответствии с законом Мура 1978, L6 – начальный период быстрого роста степени интеграции микросхем памяти в соответствии с законом Мура 1965

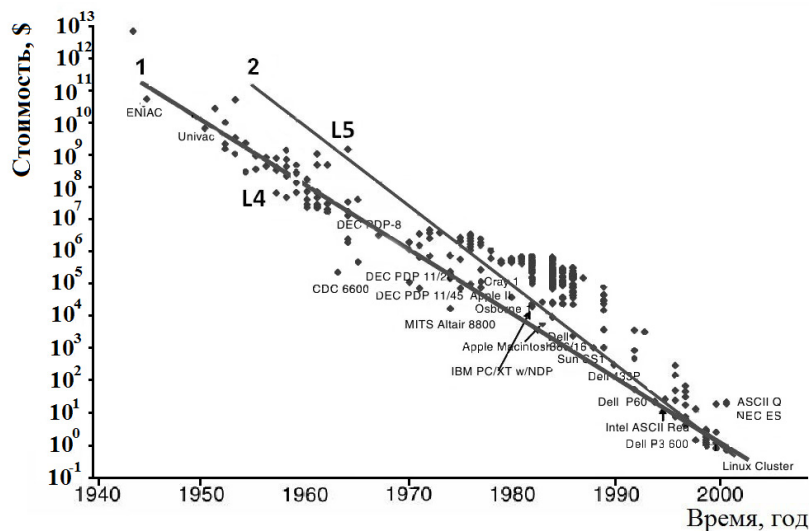


Рисунок 13. – Снижение удельной стоимости (в долларах на один «нормализованный» MIPS – миллион операций в секунду): с учетом статистики, накопленной с 40-х годов, соответствует закономерности L4 (прямая 1), но если не пренебрегать инфляцией доллара (почти на порядок) за более чем 50 лет, то получаем закономерность L5 (прямая 2)

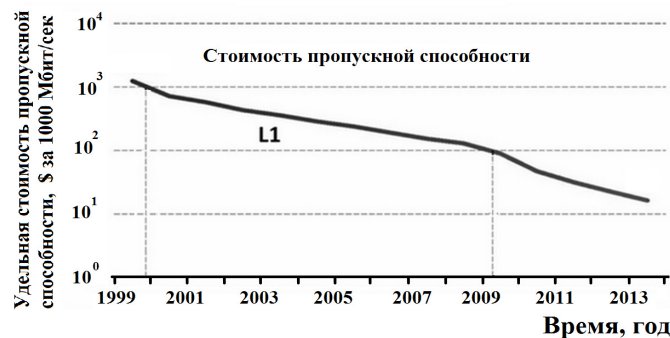


Рисунок 14. – Снижение удельной стоимости пропускной способности глобальной сети (в единицах стоимости за 1000 Мбит в секунду) в период с 1999 года (L=1, Y0=1999, P0=1000 \$); источник [17]



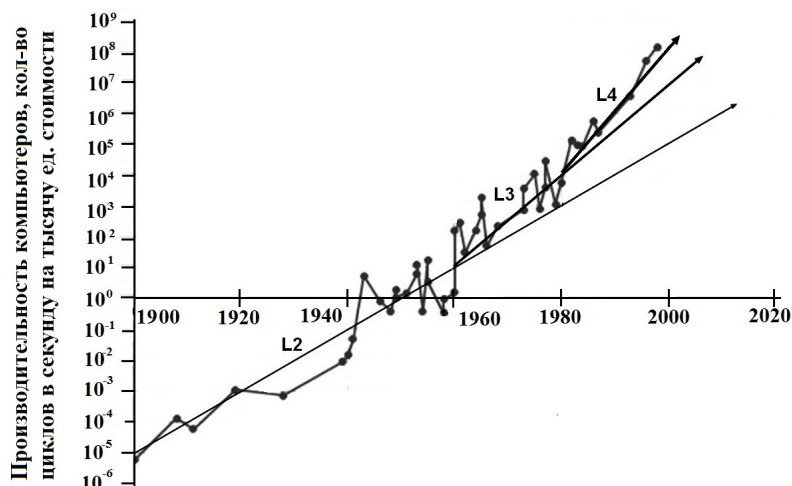


Рисунок 15. – Ускорение экспоненциального роста производительности компьютеров (в количестве циклов в секунду на тысячу единиц стоимости): L2 – относительно медленный рост до начала 1960-х годов; L3 – ускорение роста с началом эпохи интегральных схем в 1960-е годы; L4 – очередное ускорение роста с началом эпохи микропроцессоров 1980-е годы

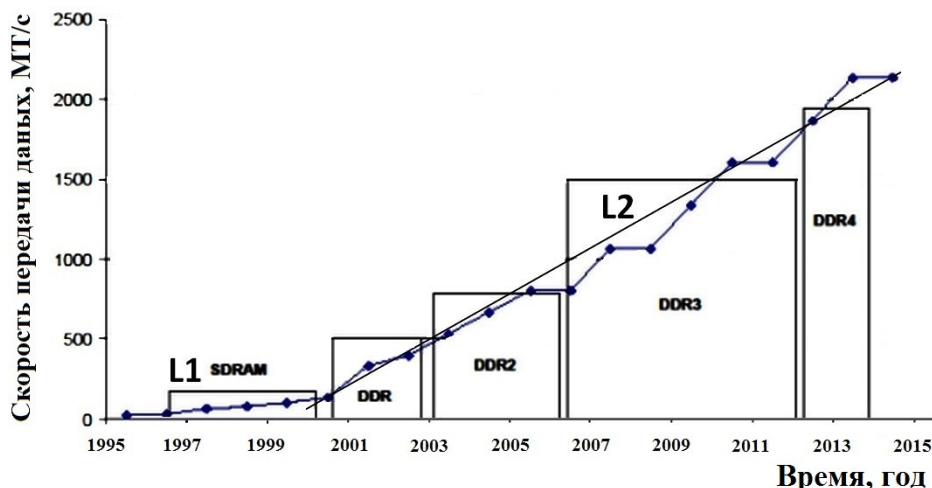


Рисунок 16. – Рост скорости обмена данными с подсистемой динамической оперативной памяти в современных компьютерных системах (МТ/с – мегатранзакций в секунду): до 2000 года наблюдался относительно медленный экспоненциальный рост (L1); после 2000 года экспоненциальный рост соответствует закономерности L2



Рисунок 17. – Опережающий рост производительности процессоров (CPU Performance) в соответствии с закономерностью L4 по сравнению с ростом производительности жестких дисков (HDD Performance) в соответствии с закономерностью L1 (показан относительный рост по сравнению с уровнем 1988 года, принятым за единицу); источник [17]

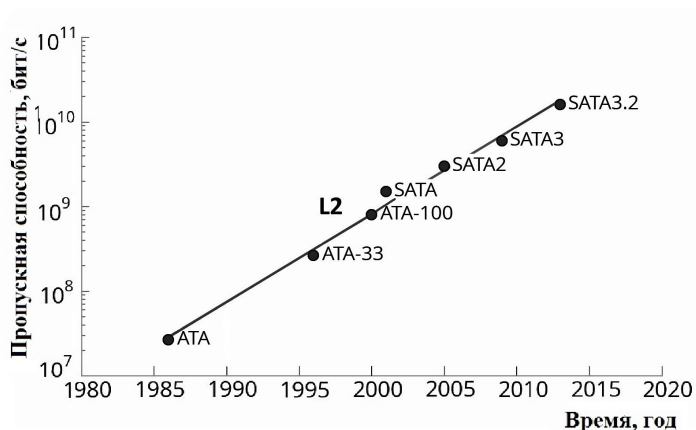


Рисунок 18. – Рост пропускной способности интерфейсов жестких дисков в соответствии с закономерностью L2

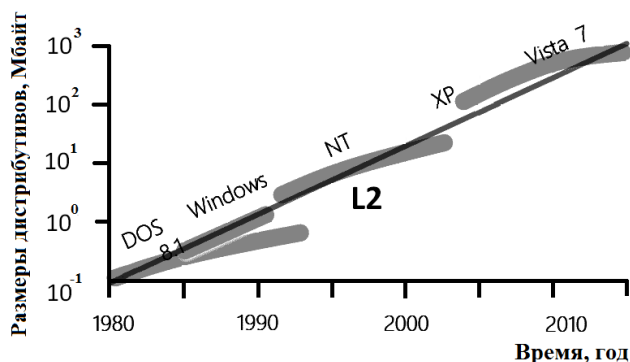


Рисунок 19. – Экспоненциальный рост размеров дистрибутивов операционных систем фирмы Microsoft в соответствии с закономерностью L2 (L=2, Y0=1980, P0=0,1 Мбайт)



Рисунок 20. – Пропорционально экспоненциальному росту объемов программного обеспечения повышается его качество в соответствии с той же закономерностью L2, что в целом позволяет поддерживать надежность программного обеспечения на требуемом уровне

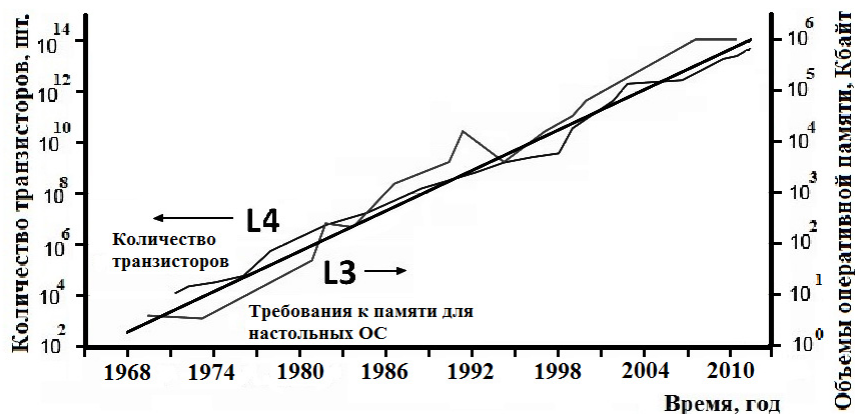


Рисунок 21. – Рост количества транзисторов на кристаллах фирмы Интел (в соответствии с закономерностью L4, левая шкала) происходит опережающими темпами по сравнению с ростом требований к объемам оперативной памяти со стороны операционных систем (L3, правая шкала)

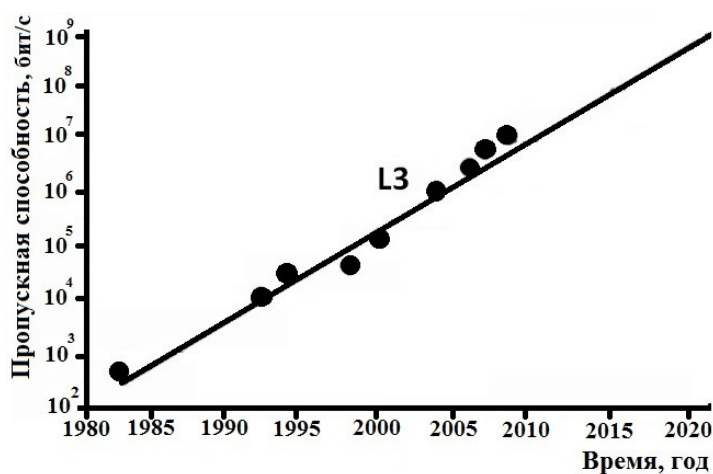


Рисунок 22. – Рост пропускной способности каналов подключения пользователей к Интернет подчиняется закономерности L3, что соответствует так называемому закону Якоба Ниельсона

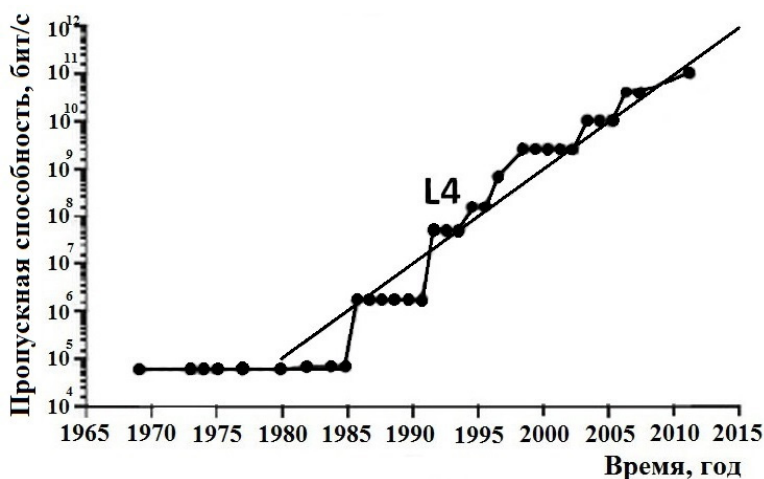


Рисунок 23. – Рост пропускной способности магистральных каналов Интернет с начала 1980-х годов подчиняется закономерности L4, что позволяет обеспечить не только рост пропускной способности каналов подключения пользователей к Интернет (L3), но и рост числа пользователей

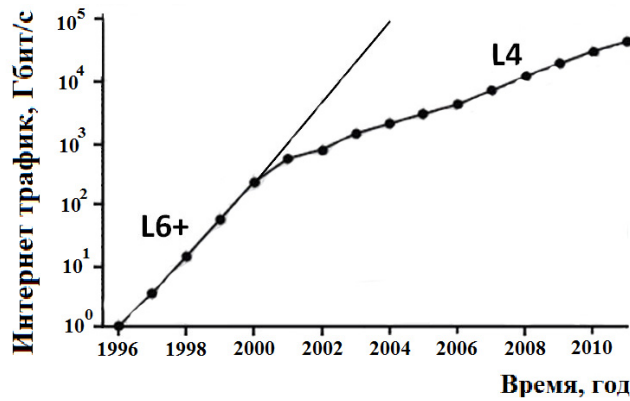


Рисунок 24. – Глобальный рост трафика Интернет до 2000 года несколько превышал темпы, определяемые закономерностью L6, но после 2000 года стал соответствовать темпам роста пропускной способности магистральных каналов Интернет в соответствии с закономерностью L4

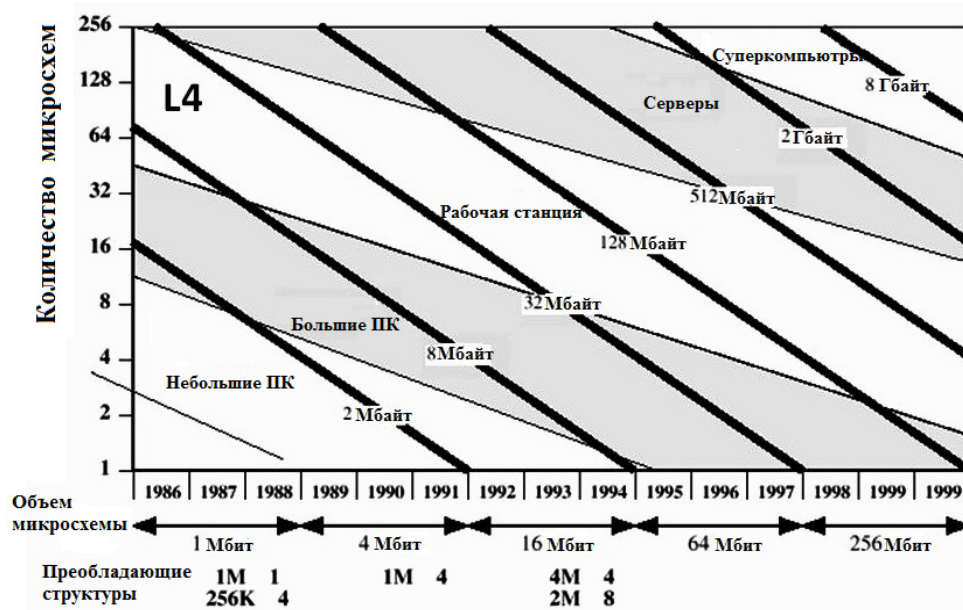


Рисунок 25. – Диаграмма, характеризующая изменения в организации оперативной памяти различных классов компьютеров в процессе роста объемов микросхем памяти в соответствии с закономерностью L4: каждые 3 года объем отдельной микросхемы увеличивается в 4 раза, что позволяет при одном и том же количестве микросхем постоянно увеличивать объем оперативной памяти для каждого класса компьютеров от небольших персональных компьютеров (ПК) до суперкомпьютеров

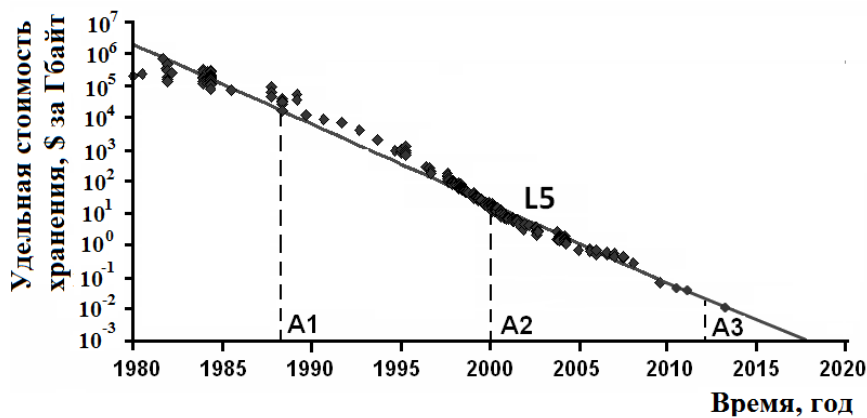


Рисунок 26. – Снижение удельной стоимости хранения (долларов за гигабайт) информации на внешних носителях (жестких дисках) в 1982 – 2020 гг. соответствует закономерности L5

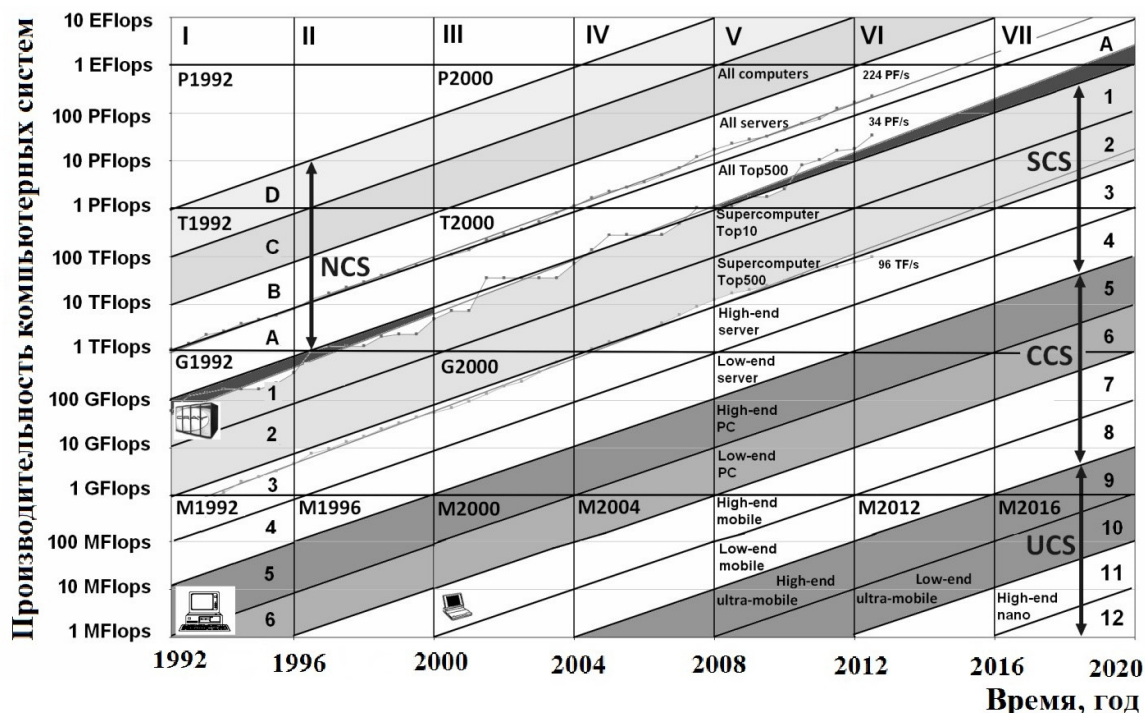


Рисунок 27. – Периодическая система роста производительности (в операциях с плавающей запятой в секунду) различных классов компьютерных систем в период с 1992 года по 2020 в соответствии с закономерностью L5

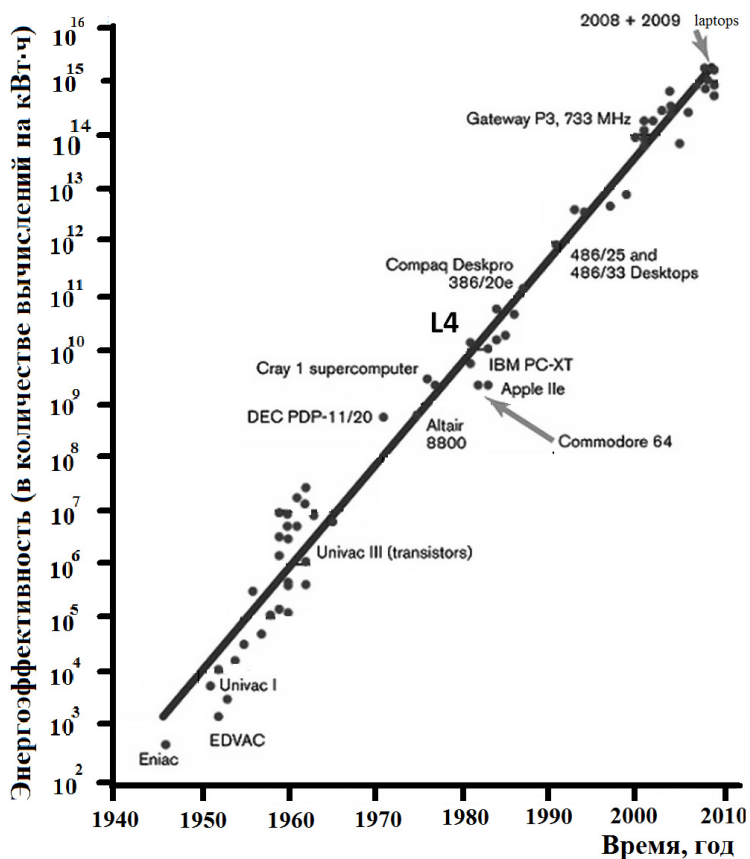


Рисунок 28. – Закон Куми (Коопеу) [18, 19], определяющий рост энергоэффективности, полностью соответствует закономерности L4 ( $L=4$ ,  $Y_0=1945$ ,  $P_0=1000$  кВт·ч)

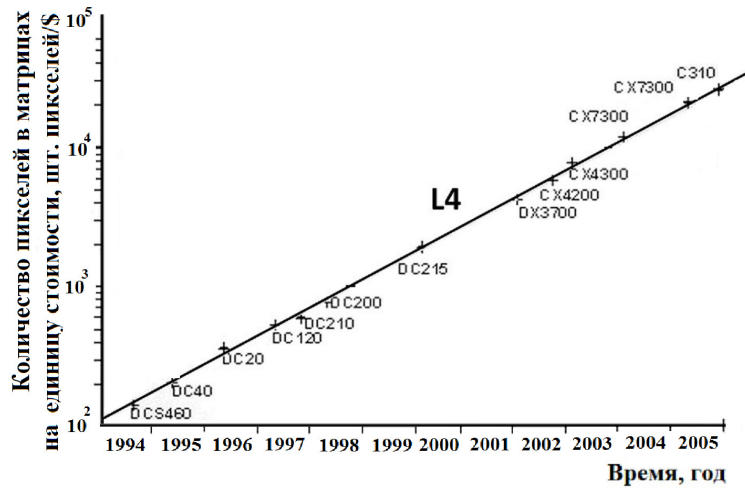


Рисунок 29. – Рост количества пикселей в матрицах фотоаппаратов фирмы Kodak (в расчете на единицу стоимости) также подчиняется закономерности L4

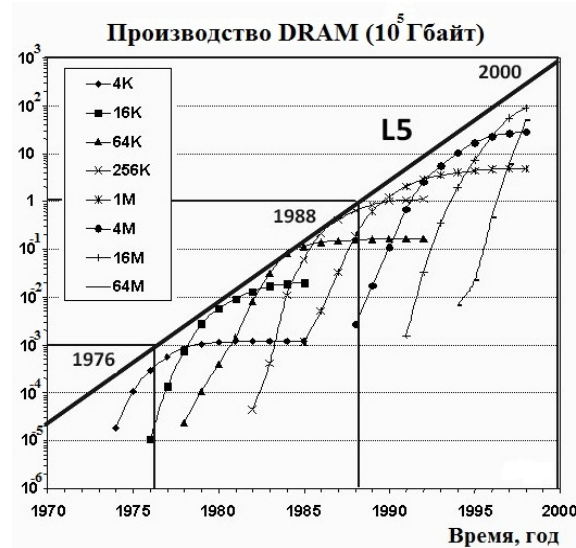


Рисунок 30. – Рост глобального производства динамической оперативной памяти (десятков тысяч Гбайт в год) соответствует закономерности L5; источник: [20]

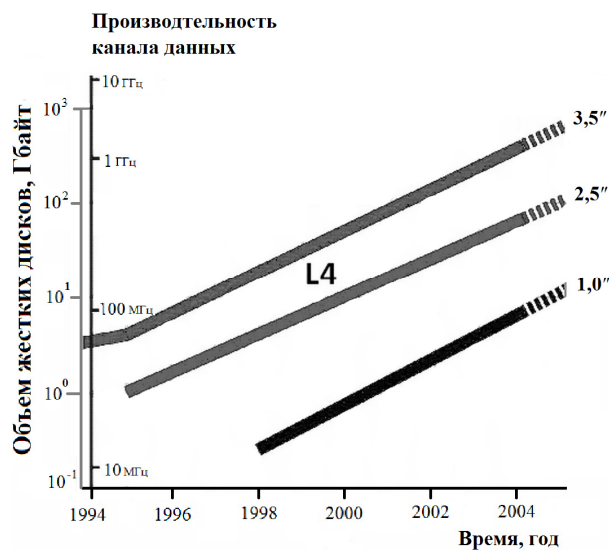


Рисунок 31. – Рост объемов жестких дисков в Гигабайтах для различных формфакторов подчиняется закономерности L4

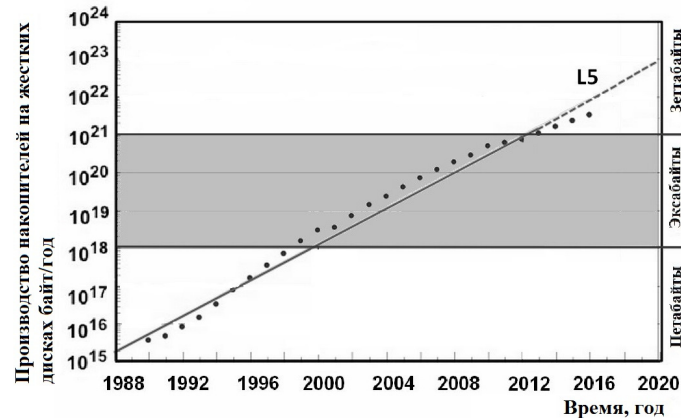


Рисунок 32. – Рост глобального производства накопителей на жестких дисках (байт в год) также соответствует закономерности L5

### Список литературы

1. Аноприенко А.Я. Будущее компьютерных технологий в контексте технической и кодологической эволюции // Вестник Инженерной Академии Украины. Теоретический и научно-практический журнал Инженерной Академии Украины. Выпуск 3 – 4, 2011. – С. 108 – 113.
2. Аноприенко А.Я. Ноокомпьютинг и будущее информационно-компьютерной инфраструктуры // Материалы Международного научного конгресса по развитию информационно-коммуникационных технологий и развития информационного общества в Украине. К., 2011. – С. 12 – 13.
3. Аноприенко А.Я. Компьютерные науки и технологии: следующие 50 лет // Материалы II всеукраинской научно-технической конференции «Информационные управляющие системы и компьютерный мониторинг (ИУС и КМ2011)». Донецк: ДонНТУ, 2011. Т. 1. – С. 7 – 22.
4. Аноприенко А.Я. Пределы информатики // «Информация и рынок». Теоретический и научно-практический журнал. – 1993. – № 2 – 3. – С. 10 – 14.
5. Аверин Г.В. Об основаниях системодинамики // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: ДонНТУ. – 2011, № 1. – С. 6 – 52.
6. Аверин Г.В. О фундаментальных основах системодинамики: опытные факты, методология, приложения // Интеллектуальный анализ информации, ИАИ-2011. – К: НТУ «КПИ», 2011, – С. 152 – 169.
7. Хряпченкова И.Н. Человек в искусственной среде: стратегия социальной жизнедеятельности: автореф. дис. на соиск. учен. степ. д-ра филос. наук. – Нижний Новгород, 2004. – 38 с.
8. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. – pp. 114 – 117.
9. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol. 21, 1975. – pp. 11 – 13.
10. Mead C. and Conway L. Introduction to VLSI Systems. – Palo Alto: California, 1978. – 258 p.
11. Moore G.E. Moore's Law at 40 // Understanding Moore's law: four decades of innovation. – Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 2006. – pp. 67 – 84.
12. Moore G.E. Lithography and the Future of Moore's Law / SPIE, Vol. 2438, 1995. – pp. 2 – 17.
13. Rupp K. and Selberherr S. The Economic Limit to Moore's Law // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Journal, vol. 24, no. 1, February 2011. – 4 p.
14. Feng W. The Importance of Being Low Power in High Performance Computing // Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly, vol. 1, no. 3, August 2005. – pp. 12 – 20.
15. Мурки Т. Закон Мура против нанометров. // iXBT.com: Сайт о высоких технологиях, 2011. – Электр. ресурс. URL: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics.shtml> (10.07.14).
16. Sunami H. Dimension Increase in Metal-Oxide-Semiconductor Memories and Transistors // Advances in Solid State Circuit Technologies. – InTech, 2010. – 446 p.
17. Was Moore's Law Inevitable? // The Technium, 2009. – Электр. ресурс. URL: <http://kk.org/thetechnium/> (17.07.14).
18. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H.

- Assessing trends in the electrical efficiency of computation over time. Final report to Microsoft Corporation and Intel Corporation. – Oakland: Analytics Press, 2009. – 47 p.
19. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H. Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing // IEEE Annals of the History of Computing, vol. 33, Issue 3, July 2011. – pp. 46 – 54.
  20. Victor N.M. and Ausubel J.H. DRAMs as model organisms for study of technological evolution // Technological Forecasting and Social Change, 2002, vol. 69, no. 3. – pp. 243 – 262.
- References (transliteration)**
1. Anoprienko A.J. Budushhee komp'juternyh tehnologij v kontekste tehničkoj i kodologičeskoj jevoljucii [The future of computer technology in the context of technical and code-logical evolution] // Vestnik Inženernoj Akademii Ukrainy. Teoreticheskij i nauchno-praktičeskij žurnal Inženernoj Akademii Ukrainy. Issue 3 – 4, 2011. – pp. 108 – 113.
  2. Anoprienko A.J. Nookomp'jutering i budushhee informacionno-komp'juternoj infrastruktury [Noocomputing and the future of information and computing infrastructure] // Materialy Mezhduna-rodnoĝo nauchnoĝo kongressa po razvitiju informacionno-kommunikacionnyh tehnologij i razvitija informacionnoĝo obshhestva v Ukraine. K., 2011. – pp. 12 – 13.
  3. Anoprienko A.J. Komp'juternye nauki i tehnologii: sledujushhie 50 let [Computer Science and Technology: the next 50 years] // Materialy II vseukrainskoj nauchno-tehničkoj konferencii “Informacionnye upravljajushhie sistemy i komp'juternyj monitoring (IUS i KM2011)”. Doneck: DonNTU, 2011. Vol. 1. – pp. 7 – 22.
  4. Anoprienko A.J. Predely informatiki [Limits of Computer Science] // “Informacija i ryнок” Teoreticheskij i nauchno-praktičeskij žurnal. – 1993. – no. 2 – 3. – pp. 10 – 14.
  5. Averin G.V. Ob osnovanijah sistemodinamiki [The grounds of system dynamics] // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: DonNTU. – 2011, no. 1. pp. 6 – 52.
  6. Averin G.V. O fundamental'nyh osnovah sistemodinamiki: opytne fakty, metodologija, prilozhenija [About fundamentals sistemodinamiki: experimental facts, methodology, application] // Intellektual'nyj analiz informacii, IAI-2011. – K: NTU “KPI”, 2011, – pp. 152 – 169.
  7. Hrijapčenkova I.N. Chelovek v iskusstvennoj srede: strategija social'noj žiznedejatel'nosti [A man in an artificial environment: strategy of social activity]: avtoref. dis. na soisk. učen. step. d-ra filoz. Nauk – Nizhnij Novgorod, 2004. – 38 p.
  8. Moore G.E. Cramming more components onto integrated circuits / Electronics, vol. 38, no. 8, Apr. 1965. – pp. 114 – 117.
  9. Moore G.E. Progress in digital integrated electronics / Proc. of the International Electron Devices Meeting (IEDM'75), vol. 21, 1975. – pp. 11 – 13.
  10. Mead C. and Conway L. Introduction to VLSI Systems. – Palo Alto: California, 1978. – 258 p.
  11. Moore G.E. Moore's Law at 40 // Understanding Moore's law: four decades of innovation. – Philadelphia: Chemical Heritage Foundation, 2006. – pp. 67 – 84.
  12. Moore G.E. Lithography and the Future of Moore's Law / SPIE, Vol. 2438, 1995. – pp. 2 – 17.
  13. Rupp K. and Selberherr S. The Economic Limit to Moore's Law // IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing Journal, vol. 24, no. 1, February 2011. – 4 p.
  14. Feng W. The Importance of Being Low Power in High Performance Computing // Cyberinfrastructure Technology Watch Quarterly, vol. 1, no. 3, August 2005. – pp. 12 – 20.
  15. Murki T. Zakon Mura protiv nanometrov [Moore's law against nanometers] // iXBT.com: Sajt o vysokih tehnologijah, 2011. – Elektr. resurs. URL: <http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics.shtml> (10.07.14).
  16. Sunami H. Dimension Increase in Metal-Oxide-Semiconductor Memories and Transistors // Advances in Solid State Circuit Technologies. – InTech, 2010. – 446 p.
  17. Was Moore's Law Inevitable? // The Technium, 2009. – Электр. ресурс. URL: <http://kk.org/thetechnium/> (17.07.14).
  18. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H. Assessing trends in the electrical efficiency of computation over time. Final report to Microsoft Corporation and Intel Corporation. – Oakland: Analytics Press, 2009. – 47 p.
  19. Koomey J.G., Berard S., Sanchez M. and Won H. Implications of Historical Trends in the Electrical Efficiency of Computing // IEEE Annals of the History of Computing, vol. 33, Issue 3, July 2011. – pp. 46 – 54.
  20. Victor N.M. and Ausubel J.H. DRAMs as model organisms for study of technological evolution // Technological Forecasting and Social Change, 2002, vol. 69, no. 3. – pp. 243 – 262.



**Аноприєнко О.Я. «Системодинаміка ноотехносфери: основні закономірності».** Системодинаміку ноотехносфери можна визначити як науку про закономірності процесів розвитку та зміни у часі глобальної інформаційно-комп'ютерної інфраструктури, а також апаратно-програмних та інформаційних ресурсів і систем, які входять до її складу. У роботі систематизовано й узагальнено емпіричні закономірності, які характеризують системодинаміку ноотехносфери, і запропоновано залежності, що дозволяють в найбільш стислій формі представити основну сукупність відомих на сьогодні в даній області закономірностей. Отримані залежності запропоновано назвати узагальненим законом Мура. Показано, що різноманіття основних закономірностей, які характеризують закон Мура, може бути представлено у вигляді узагальненої залежності, яка характеризує зв'язок спостережуваних параметрів ноотехносфери з часом. Передбачається, що виявлена система закономірностей має прогностичні властивості необхідної точності на довгострокову перспективу.

**Ключові слова:** системодинаміка, ноотехносфера, експоненціальне зростання, закономірності розвитку комп'ютерних систем, узагальнений закон Мура.

**Anopriyenko A.Y. "System dynamics of nootehnosphere: basic laws".** System dynamics of nootehnosphere can be defined as the science of the laws of protsessovrazvitiya and changes over time of the global information and computer infrastructure as well as hardware, software, and information systems and subsystems. Known empirical laws are summarized as generalized Moore's Law. In this paper and summarized empirical regularities that characterize sistemodinamiku nootehnosfery and offered depending allowing in the most concise and succinct provide basic set of presently known laws in this area. These depending asked to name a generalized Moore's Law. It is shown that the diversity of the basic laws describing Moore's law can be written as generalized dependence characterizing the relationship observed parameters nootehnosfery with time. It is assumed that the system of laws has identified prognostic features the required accuracy for the long term.

**Keywords:** systemdynamics, nootehnosphere, exponential growth, development of computer systems, a generalization of Moore's Law.

Стаття поступила в редакцію 22.08.2014  
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Г.В. Авериным

## Общая теория систем: проблема создания формализованных теорий в области гуманитарного знания

Аверин Г.В.

Донецкий национальный технический университет  
averin.gennadiy@gmail.com

*Аверин Г.В. «Общая теория систем: проблема создания формализованных теорий в области гуманитарного знания». Выполнен анализ существующих подходов моделирования систем в естественнонаучном и гуманитарном знании. Различие парадигм этих областей знаний во многом определено степенью формализации изучаемых процессов и явлений. Сформулированы актуальные вопросы, связанные с проблемой моделирования социогуманитарных систем. Предложены принципы создания формализованных теорий в гуманитарном знании, а также реляционно-полевой подход построения таких теорий. Особенностью подхода является использование идеи представления данных опыта в виде гипотетической сплошной среды и применение гипотезы существования эмпирических величин для комплексной оценки состояния систем. Показано также, что используя гипотезы, характеризующие особенности изменения таких величин во времени, можно свести задачи моделирования к решению некоторых уравнений матфизики. Полученные результаты развивают феноменологические методы исследований в теории систем.*

**Ключевые слова:** *общая теория систем, формализованные теории, гуманитарное знание, феноменологические методы.*

### Введение

*Все наше знание  
только вероятно  
Рейхенбах*

В настоящее время существует явное разделение человеческого знания, которое свойственно естественным и гуманитарным наукам. Суть различий затрагивает основания данных наук и определяет процесс формирования научных парадигм этих областей знаний. Тем не менее, следует отметить, что сама граница разделения является относительно условной; многие методы, разработанные в естественных науках, используются в обществоведении. В свою очередь, часть идей и принципов общественных наук вошла в систему мировоззрения естествознания.

Постановка любой аналитической задачи заключается в том, чтобы перевести ее словесное (вербальное) описание в формальное. Естественные науки предполагают обязательную формализацию основных закономерностей, характеризующих природные явления, а также их количественное описание за счет формулировки исходных гипотез, теорий и моделей. Под моделью обычно понимают некоторое упрощенное представление о реальном объекте, которое, отображая или воспроизводя объект исследования, заменяет его и предоставляет о нем новую информацию, которая очень часто не является очевидной.

В свою очередь, общественные науки ориентируются в основном на мысленное

модельное описание основных закономерностей общественных процессов за счет построения гипотетических, образных, описательных, экспертных и подобных им модельных представлений, которые позволяют давать преимущественно качественные характеристики изучаемых явлений. Количественные модели (например, знаковые математические модели) используются в этих науках значительно реже, что указывает на сложности в построении формализованных языков моделирования в данных областях знаний и формулировки на их основе количественных закономерностей.

Создание методологий, методов и формализованных языков моделирования является закономерным процессом развития любой науки, так как это позволяет систематизировать эмпирические знания и лучше понимать сущность наблюдаемых явлений и процессов. Однако процесс моделирования не должен являться самоцелью, построение теоретических моделей следует основывать на опыте и практике, иначе у теорий (даже у теорий переднего края физики) возникают значительные проблемы [1]. Известно, что новые фундаментальные открытия чаще всего устанавливаются экспериментом, опытом и практикой и объясняются теорией.

Методология моделирования природных явлений изначально вышла из физики. Еще в 1884 году в своих «Балтиморских лекциях» У. Томсон отмечал, что понять явление – значит

построить его модель. С течением времени интерес к процессу моделирования стал всеобщим, и в настоящее время нет ни одной науки, ни одной области знаний, где бы не применялись те или иные виды моделей. В каждой науке имеется собственная методология и теория, в свою очередь, разные виды моделей являются предметом этой теории и позволяют в наглядной и упрощенной форме отражать объект исследования и его закономерности.

В области общественных наук в связи с развитием вычислительной техники и различных систем сбора и обработки информации данные наблюдений накапливаются очень быстрыми темпами. Для изучения такой информации исследователи разрабатывают методы анализа данных, которые были бы универсальны по отношению к системам различной природы. В данной области сформировалось целое научное направление, которое ориентировано на применение естественнонаучных методов исследований в гуманитарных науках. Скорее всего, это научное направление, тесно связанное с системным анализом и общей теорией систем, является наиболее перспективным путем к созданию новой парадигмы моделирования. Вполне очевидно, что в рамках одной научной области, охватывающей только естественные или, например, только общественные науки, формирование универсальной теории моделирования систем невозможно.

В 1950 году на заре создания общей теории систем (ОТС) ведущими учеными были сформулированы масштабные общесистемные задачи, решить которые предполагалось в ближайшей перспективе [2, 3]:

- найти системные связи в физических, биологических и социальных явлениях;
- развить собственную методологию теоретического анализа, применимую в науках с различными предметами и объектами исследований;
- разработать таксономию различных классов систем, исходя из существования общесистемных закономерностей в природе и обществе;
- построить модели биологических и общественных систем;
- дать ответ на вопрос о допустимости системных моделей и формализованных законов в истории и т.д.

Шестьдесят пять лет срок достаточно большой для решения поставленных задач, однако, если отвечать на вопрос: «Были ли получены новые фундаментальные открытия в данной области?», то придется дать отрицательный ответ. Нельзя сказать, что в данной области знания нет прогресса. Было разработано множество моделей для различных

природных, биологических и социальных систем, произошла чуть ли не революция в области моделирования систем, связанная с повсеместным применением формализованных методов в самых разных областях знаний, в целом создано впечатление необычайно быстрого научного развития в предметных областях за счет интеграции методов моделирования с информационными технологиями. Тем не менее, поставленные перед ОТС первоначальные задачи не были решены. Для справедливости вопроса следует отметить, что подобная проблема сегодня наблюдается во многих сферах естественнонаучного знания. На фундаментальную науку общество выделяет значительные финансовые ресурсы и стремится получить от ученых существенно больше фундаментальных результатов, нежели создается сегодня.

На существование этой же проблемы в физике указывал еще пятьдесят лет назад академик П.Л. Капица и симптом серьезных нарушений нормального развития науки видел в разрыве связей между теорией и экспериментом [4]. Давно известно, что развитие эмпирической базы научных дисциплин формируется существенно более медленными темпами, чем устремления исследователей в построении теоретических моделей, причем не всегда подтвержденных опытом и практикой.

Поэтому, для того, чтобы получить заметный результат в применении естественнонаучных методов исследований в гуманитарных науках, необходимо вернуться к научным методам, которые обеспечивают тесную связь между теорией и экспериментом. Здесь речь может идти, в первую очередь, об апробированных поколениями ученых феноменологических методах исследований, которые вполне применимы к структурированным массивам данных, характеризующим биологические, социальные и общественные процессы.

### **Постановка проблемы**

Сегодня математизация биологических, общественных и гуманитарных наук не затрагивает их исходных положений, методологий и закономерностей, т.е. оснований данных наук. Если в экономике достаточно широко применяются математические и компьютерные модели, то, к примеру, в философии и истории применение формализованных моделей достаточно редкое явление. Возможность использования математических методов в философии очень часто вызывает сомнения и возражения у многих ученых гуманитариев даже на уровне обсуждения вопроса. Доводом к этому служит то, что философия, как и математика во многом

определяет облик современной науки и является инструментом изучения всеобщих закономерностей в природе и обществе, поэтому методологии этих наук не могут иметь единых методов исследований, кроме некоторых общих логических подходов.

В свою очередь, большинство работ, связанных с использованием математических моделей в исторических исследованиях, основано на статистической обработке данных исторических источников и применении некоторых видов аналитических и имитационных моделей [5, 6]. Последнее время наблюдаются предпосылки к расширению области применения количественных моделей (в том числе имитационных и математических) в истории. Также увеличивается применение методов моделирования в археологии, антропологии, психологии, социологии и лингвистике. Этому способствует накопление массивов эмпирических данных в этих науках.

Различие парадигм естественнонаучного и гуманитарного знания во многом связано со степенью формализации изучаемых процессов и явлений и, как следствие, с формой представления модельных описаний в соответствующих науках. При этом одна из самых актуальных задач современной науки связана с поиском ответа на вопрос: возможна ли высокая степень формализации при описании объектов и явлений в гуманитарных науках? В данной статье делается попытка наметить пути решения некоторых общесистемных задач в области теории систем. Поэтому сформулируем актуальные вопросы и попытаемся получить на них хотя бы предположительные ответы:

- какие научные принципы могут быть использованы для построения общесистемных теорий, применимых как в естественных, так и в гуманитарных науках?

- возможно ли «математизировать» основополагающие области философии или истории, и какие могут быть использованы для этого естественнонаучные методы и модели, а также способы анализа эмпирических данных;

- реально ли модельное описание развития общества за счет обобщения исторических данных и событий и построения моделей общественных процессов на основе формализованных подходов?

Сущность ответов на данные вопросы затрагивает основания многих наук и тесно связана с общими представлениями, которые свойственны всем областям знаний. Поэтому целью данной статьи является поиск общесистемных принципов, которые открывали бы возможности для создания формализованных теорий в области социогуманитарного знания.

### ***Некоторые общие принципы и подходы моделирования систем***

Исходные принципы научного знания (детерминизм явлений; истинность теорий и моделей, подтвержденных практикой; относительность знания) изначально основываются на повсеместном наблюдении событий, которые лежат в основе получения любых данных, фактов и закономерностей объективной реальности [7]. Детерминизм представляет собой учение о всеобщей и закономерной связи явлений и процессов в окружающем мире. Индетерминизм исходит из отсутствия какой-либо связи между явлениями. Оба принципа дают противоположные точки зрения на характер взаимосвязи событий, процессов и явлений во времени. Естественно, что в природе всеобщая связь явлений не может быть выражена простыми случаями и крайностями, должно наблюдаться единство этих противоположных точек зрения.

Тем не менее, до недавнего времени в науке преобладали мнения, что случайность и предопределенность (необходимость), по своей сути понятия противоположные. Философ К. Поппер утверждал, что объективная вероятность не совместима с детерминизмом. В данном вопросе очень много неясностей и крайностей даже на уровне философских воззрений, не говоря уже об уровне модельных описаний, где следует применять ясные и понятные методологические принципы.

Будем исходить из принципов единства и взаимосвязи понятий предопределенности и случайности, детерминированных и вероятностных причинных связей, динамической и статистической закономерности явлений и процессов.

При изучении данной проблемы применительно к процессу моделирования исходим из принципа детерминизма в модельных описаниях. То, что детерминизм органично присущ моделированию является признанным фактом – любая достоверная физическая, математическая или алгоритмическая модель описывает закономерные связи изучаемых явлений и процессов, в основе которых вполне могут лежать как детерминированные, так и вероятностные особенности. Использование стохастических средств в моделях дает возможность ввести элементы неопределенности и тем самым расширить область применения динамических моделей на некоторые классы случайных процессов. Однако модель все равно является детерминированной, так как алгоритм ее построения однозначен. Просто в модель вводятся физические или алгоритмические компоненты (например, генераторы случайных

или псевдослучайных чисел), которые формируют определенную стохастичность.

При таком подходе, модель любой степени формализации описывает (в целом) динамику некоторого процесса или явления, которое происходит закономерно, в результате действия определенных причин. При этом изучение на модели процесса перехода изучаемой системы из одного состояния в другое обеспечивается за счет регистрации характерного множества событий, которые отражают наблюдаемые с течением времени изменения в системе.

В свою очередь, в окружающем нас мире при отображении всего многообразия явлений не может быть крайностей, закономерные связи во времени могут формироваться исходя из существования как детерминированных, так и вероятностных особенностей. Поэтому, следуя воззрениям М. Каца и Э. Нельсона, любое развитие природного или общественного процесса во времени (неважно, детерминированное, детерминировано-вероятностное или явно вероятностное) при анализе в терминах вероятностей будем считать стохастическим процессом [8, 9]. Это позволяет рассматривать оба принципа (детерминизм и индетерминизм), которые определяют характер явлений во времени, во взаимосвязи, причем вероятность, как количественная мера проявления закономерностей, будет указывать на то, какие особенности процессов преобладают в явлении: детерминированные или вероятностные. В зависимости от характера этих особенностей при описании систем выделяют два типа проявления причинной связи, связанных с динамическими (детерминированными) и статистическими (вероятностными) закономерностями. Исторически данная проблема заключается в вопросе соотношения между формализмом и реальностью.

Согласно известным определениям динамическая и статистическая закономерности – это формы проявления закономерной связи между предшествующими и последующими состояниями систем. Динамическая закономерность представляет собой форму причинной связи, при которой данное состояние системы однозначно определяет все ее последующие состояния, в силу чего знание начальных условий дает возможность точно предсказать дальнейшее изменение и развитие системы. Статистическая закономерность – это форма причинной связи, при которой данное состояние системы определяет все ее последующие состояния не однозначно, а лишь с определенной вероятностью, являющейся объективной мерой возможности реализации заложенных в прошлом тенденций изменения и

развития. Так как в основе факта установления динамической или статистической закономерности всегда лежит событие, то различие между этими закономерностями относительно. Это связано с тем, что любое событие в строгом смысле слова всегда случайно, при этом множество достоверных событий (детерминированных событий, происходящих обязательно, или, как еще говорят, происходящих с вероятностью, равной или близкой к единице) будет определять динамическую закономерность, которая свойственна предопределенности. В свою очередь, множество случайных событий (событий, которые могут произойти или не произойти) будет определять статистическую закономерность, которая свойственна случайности.

Случайность и предопределенность событий определяются особенностями и видами процессов или явлений, протекающих в природе и обществе. С другой стороны, случайность и предопределенность событий в большой степени является следствием, связанным с временным диапазоном, в котором наблюдается явление. Например, в пределах средней продолжительности жизни смерть конкретного человека случайна, так как в любой момент может произойти или нет. В свою очередь, в пределах нескольких веков она предопределена, так как произойдет обязательно.

Решение о том, динамические или статистические закономерности преобладают в процессе или явлении, принимается на основе практики. Предположим, что состояние некоторой системы на заданный момент времени было определено. Это значит, что изучаемые параметры или характеристики системы были измерены, оценены или получены в процессе наблюдения или эксперимента. Соответствующие события мы можем считать достоверными, так как на момент анализа состояния системы они уже произошли. Предположим далее, что система постепенно переходит в новое состояние и соответствующие параметры и характеристики этого состояния были спрогнозированы, т.е. предсказаны с помощью применения некоторой модели (например, математической). После этого был проведен опыт по определению тех же величин, причем для нового момента времени соответствующие события также являются достоверными. Если при изучении многих состояний реальной системы величины, наблюдаемые в опыте, с высокой точностью совпадают с их прогнозными значениями, полученными на модели, то считают, что системе присущи детерминированные закономерности и поведение системы хорошо описывается динамической моделью. Если на

основе динамических моделей не удастся описать явление, то считают, что система обладает статистическими закономерностями. Принятие решения о выборе модели достаточной точности длительно вырабатывается практикой, а именно путем перебора множества разных моделей, пока опыт не подтвердит оптимальный вариант выбора. В этом случае формулируются общие представления, которые принимаются научным сообществом.

На данном примере видна определенная условность принятия гипотезы о виде закономерности, так как в основе утверждения всегда лежит модель, отражающая уровень наших знаний о явлении. Все это указывает на тесную связь между статистической и динамической закономерностями, которые определяют характер изменения состояний систем во времени.

Именно поэтому многие известные ученые новую концептуальную парадигму в развитии современной науки видят в синтезе динамических и статистических закономерностей объективной реальности. Если в терминах вероятностей статистическая и динамическая закономерности могут быть сведены к более общей стохастической закономерности, то необходимо определить критерий, который бы отражал это сходство. Следует также сформулировать единое представление о стохастической закономерности, при этом статистическая и динамическая закономерности должны органически вписываться в это представление и являться частными случаями общей закономерности. В свою очередь отметим, что достоверная динамическая модель в наглядной и упрощенной форме отражает основные закономерности процесса или явления. При этом в такой модели доля детерминированных закономерностей полностью преобладает над статистическими закономерностями. Тем не менее, в любом случае существует определенная случайность, которая всегда может вноситься с исходными данными, имеющими ошибки опыта или наблюдения.

Таким образом, общее представление о стохастической закономерности должно охватывать как реальные процессы и явления, так и их модели. Отсюда следует, что вероятностные представления будут присущи как реальности, так и формализму. Исходя из этого, если сформулированная проблема будет решена на уровне формализованных моделей, то она тем самым будет решена и на уровне объективных закономерностей, которые представляются этими моделями.

В данном вопросе будем исходить из известного факта, что динамические модели

хорошо описывают детерминированные процессы в природе и обществе. Другими словами, эти модели, несмотря на упрощенную форму, достоверно отражают поведение целых классов объектов и явлений, которым свойственны детерминированные закономерные связи. Поэтому, установив особенности процесса моделирования при построении таких моделей, можно попытаться сформулировать общие особенности, которые свойственны как динамическим, так и статистическим закономерностям, исходя из факта совершения тех или иных событий.

Сложность данной задачи связана с тем, что в науке пока нет основополагающей систематики (таксономии) наблюдаемых событий, исходя из общепринятых критериев, учитывающих причинно-следственные, временные, статистические и динамические особенности событий. Существующая классификация событий по области наблюдения (экономические, природные, социальные, политические и т.д.) крайне ограничена и однобока, тоже можно сказать и о принятой классификации событий в теории рисков. Теория вероятностей также не дает ответа на этот вопрос, хотя оперирует событиями и их вероятностями. Однако, построение формализованных теорий на основе анализа событий и описания связей между событиями или их характеристическими величинами является реальным путем формулировки теорий в разных предметных областях, т.к. события повсеместно наблюдаются в природе и обществе.

Если исходить из решения задач, поставленных в данной статье, то следует постараться найти общие особенности в формировании характерных событий, которые отражают преимущественно эволюционные процессы в различных системах. Сделаем следующие предположения. Во-первых, так как динамические и статистические закономерности суть более общей стохастической закономерности, то критерий их сходства должен быть определен исходя из вероятностных представлений о возможности осуществления событий. То есть он должен учитывать связь между событиями. Во-вторых, в основе всех динамических и статистических моделей лежит основополагающее понятие математического анализа – понятие функции. Таким образом, изучаемый вопрос связан с использованием вероятностных принципов в процессе представления функциональных зависимостей разных видов и форм.

В простейшем случае понятие функции дается в виде: если величина  $x$  может принимать произвольные значения, и указано какое-либо правило, посредством которого

приводятся в соответствии с этими значениями определенные значения другой величины  $y$ , то говорят, что  $y$  является функцией от  $x$  и эту связь записывают символически следующим образом:  $y = f(x)$ . В свою очередь, определение функции по Дирихле:  $y$  есть функция переменной  $x$ , определенная на отрезке  $[a \leq x \leq b]$ , если всякому значению переменной  $x$ , содержащемуся на этом отрезке, соответствует вполне определенная величина переменной  $y$ , причем совершенно неважно, каким именно способом установлено это соответствие. Современное определение функции в терминах множеств имеет вид: пусть каждому произвольному числу  $x$  из заданного множества  $E$  поставлено в соответствие число  $y$ , обозначаемое  $y = f(x)$ , тогда говорят, что на множестве  $E$  задана функция  $y = f(x)$ .

Если представить задание величины  $x$  как некоторое событие, то исходя из выделенных словосочетаний, в приведенных выше определениях: «произвольные значения», «всякому значению», «произвольному числу», данное событие можно рассматривать как *равновероятное*. Это говорит о том, что распределение величины  $x$ , как вероятностный принцип и исходная предпосылка при построении функциональной зависимости, будет соответствовать равномерному вероятностному закону распределения. Следовательно, *равновероятность* – это основное свойство динамической закономерности при ее общей исходной формулировке в рамках стохастической закономерности. Исходя из этого, в заданном пространстве переменных множество выработанных практикой моделей (тех или иных функциональных зависимостей) можно рассматривать как определенную среду моделирования стохастического процесса, который наблюдается в реальности. Основным свойством данной среды является равновероятный выбор значений исходных независимых переменных и задание множества самых различных функций для моделирования. Качество созданной модели определяется способностью данной среды при выбранном виде функциональной зависимости отображать реальный процесс или явление с заданной точностью. В подобной среде моделирования возможно представление как обычных функциональных зависимостей, так и статистических зависимостей, построенных по опытным данным. Однако, в последнем случае, принцип равновероятности выбора значений исходных переменных чаще всего нарушается, а сами переменные являются уже зависимыми между собой.

Таким образом, мы для систем самой разной природы приходим к идее вероятностного пространства для многих переменных, где элементарным равновероятным событиям выбора значений из исходного множества некоторых независимых величин ставятся в соответствие неравновероятные события для множества других зависимых величин и связь между этими величинами задается путем определения функции на исходном множестве. В этом случае вероятностное пространство представляет собой некоторую совокупность  $(Z, A, W)$ , состоящую из множества  $Z$  (равновероятных элементарных событий), класса  $A$  подмножеств множества  $Z$  (случайных сложных событий наблюдений или опыта) и вероятностной меры  $W$ , которая представляет собой действительную функцию и определяет связь между распределениями на множествах  $Z$  и  $A$ . При этом вероятностная мера  $W$  может быть определена в терминах статистических или динамических закономерностей, так как, исходя из определения функции, совершенно не важно каким образом установлено соответствие между величинами. Если это соответствие выражается в функциональном виде и детерминировано, то можно говорить о существовании динамических закономерностей. Если это соответствие выражается в виде распределений и отражает случайность явления, то следует говорить о статистической закономерности. В свою очередь, если установить соответствие невозможно, то будем говорить об отсутствии связей между величинами. Отсюда следует, что в терминах понятий вероятностного пространства и функции можно сформулировать общую стохастическую закономерность, которая в качестве частных случаев включает как динамическую, так и статистическую закономерности.

Если рассматривать вероятность как меру существования общей закономерности стохастического характера в процессе или явлении, то при отсутствии связей между значениями вероятности характерных событий из множеств  $Z$  и  $A$ , построение достоверных моделей любого вида становится невозможным. С другой стороны, если существует некоторая закономерность (что будет отражаться в наличии связей между вероятностями событий), то возможно построение как качественных, так и количественных моделей.

Из вышесказанного следует, что критерием сходства динамических и статистических закономерностей может выступать вероятность событий, наблюдаемых при возникновении различных процессов и явлений в природе и обществе, а также различные виды вероятностных распределений таких событий.

Следующим важным шагом при формулировке общих принципов является установление требований к математическому представлению среды моделирования для описания стохастических закономерностей. Здесь необходимо отметить, что среда моделирования должна позволять адаптировать формализованные модели под реальные опытные данные на множествах  $Z$  и  $A$ . События опыта чаще всего представляют собой дискретные множества некоторых наблюдаемых характеристических величин. Для того, чтобы строить модели процессов необходимо рассматривать эти множества как ограниченные выборки наблюдений из некоторых генеральных совокупностей всех гипотетически возможных наблюдений. Это позволяет сформировать непрерывное пространство состояний изучаемой системы в виде событий и их характеристических величин не только для множества  $Z$ , но и для множества  $A$ .

Попытаемся сформулировать вариант построения полевой теории систем применительно к общему случаю. Изложение материала будем вести применительно к многомерным сложным системам на основе развития аксиоматического подхода построения термодинамики, предложенного К. Каратеодори [11]. Принцип «адиабатической недостижимости» К. Каратеодори, используемый им при доказательстве существования энтропии, можно рассматривать как следствие существования скалярного поля некоторой физической величины. Из данной идеи формируется подход формализованного описания систем, который не зависит от природы анализируемых систем. В результате на основе логики термодинамики можно предложить феноменологические методы описания данных опыта для различных классов систем. При этом данные опыта должны быть структурированы в виде, удобном для представления вероятностного пространства совокупности  $(Z, A, W)$ .

### **Реляционно-полевой подход при создании формализованных теорий**

Будем представлять некоторую систему определенной природы в виде совокупности объектов одного класса, например, веществ, изделий, особей, граждан, стран и т.д. Все объекты системы имеют определенное количество характерных свойств, которые количественно определяются измеряемыми или наблюдаемыми параметрами  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . Каждый объект совершает некоторый естественный процесс, в связи с чем его параметры изменяются во времени  $z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t)$ . Периодически (с шагом,

например, год, месяц, час, секунда и т.д.) осуществляется наблюдение за всеми объектами системы. В результате формируется массив таблично-временных данных, в которых каждая таблица имеет структуру «объекты – параметры», а множество таблиц упорядочено во времени. Далее предполагаем существование для изучаемой системы обширных массивов таких данных, которые накоплены в процессе длительного наблюдения за поведением системы. Сегодня подобные структурированные количественные данные существуют для систем самой разной природы как в естественных, так и в гуманитарных науках.

Для формулировки общих подходов моделирования будем пользоваться материалами работ [10, 12], поэтому основные результаты изложим тезисно. Для того, чтобы показать возможности разработки формализованных теорий в предметных областях сделаем следующие достаточно общие предположения.

На первом этапе формулируем понятие состояния системы. Под *состоянием* любой системы подразумеваем совокупность ее наблюдаемых свойств в виде параметров  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , которые формируются под действием условий окружающей среды в конкретный момент времени.

Образуем  $n$ -мерное пространство состояний  $\Omega_n\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , тогда точки этого пространства соответствуют  $n$ -мерным наборам значений всех переменных  $(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Состояние объектов системы в  $n$ -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться многомерной точкой  $M = M(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , процесс изменения состояния системы – многомерной кривой, описываемой точкой  $M$  в этом пространстве.

Введем понятие эмпирической меры состояния системы  $W$ . Сегодня в философии согласно известного определения мера – это философская категория, отражающая единство качественных и количественных характеристик объекта или системы. Очень часто мера трактуется как диапазон или область количественных изменений, которые могут происходить при сохранении данного качества объекта. Будем рассматривать меру как некоторую функцию пространства состояний, отражающую единство качественной и количественной определенности системы. В общем случае будем также считать, что общая мера может количественно характеризоваться некоторой совокупностью эмпирических мер  $W_i$ , которые определяются в опыте на основе процедур измерений, оценок или расчетов и представляют собой комплексные величины.



Каждая эмпирическая мера  $W_i$  количественно отражает некоторый качественный аспект и характеризует состояния системы в целом, исходя из отношений и связей, которые свойственны этой системе. В качестве эмпирических мер могут выступать различные комплексные величины, например, количество теплоты, температура, вероятность наиболее характерных событий, стоимость объектов, различные индексы, в виде экспертных оценок, и т.д. Считаем, что эти величины однозначно характеризуют состояния системы, зависят от атрибутивных параметров свойств  $z_1, z_2, \dots, z_n$  и не могут быть одним из параметров свойств этой системы.

Введение эмпирической меры позволяет установить функциональную связь в пространстве  $\Omega_n$  между основными характерными величинами и свойствами системы. Таким образом, мы считаем, что состояние системы в каждой точке  $M$  в заданный момент времени характеризуется не только совокупностью параметров свойств, но и значениями эмпирических мер состояния системы.

Предположим непрерывность области  $\Omega_n$ . Это означает, что в пространстве состояний  $\Omega_n$  существует бесконечное множество состояний для некоторой генеральной совокупности объектов системы и точки состояний  $M(z_1, z_2, \dots, z_n)$  непрерывно заполняют это пространство. Будем также считать, что опытные точки  $M_i(z_1, z_2, \dots, z_n)$  из имеющегося массива таблично-временных данных являются ограниченной выборкой наблюдений из данной генеральной совокупности.

Исходя из сказанного выше, каждое состояние системы характеризуется  $n$  независимыми параметрами  $z_1, z_2, \dots, z_n$  в пространстве состояний  $\Omega_n$  и представляет собой многомерную точку  $M(z_1, z_2, \dots, z_n)$ . Каждой точке  $M$  в пространстве  $\Omega_n$  ставится в соответствие эмпирическая мера  $W = W(M)$ , при этом отмечаем, что этих величин может быть несколько.

В результате получаем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} W_1 &= W_1(z_1, z_2, \dots, z_n); \\ W_2 &= W_2(z_1, z_2, \dots, z_n); \\ &\dots\dots\dots \\ W_p &= W_p(z_1, z_2, \dots, z_n), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $p$  – количество эмпирических мер.

В связи с тем, что все сказанное далее справедливо для каждого соотношения (1), то индекс в эмпирической мере  $W$  будем опускать.

Таким образом, основная гипотеза разрабатываемой теории связана с возможностью создания для таблично-временных данных опыта или наблюдения феноменологических моделей процессов, отличающихся многомерным полем представлением пространства состояний  $\Omega_n$ , а также существованием скалярных полей эмпирических мер  $W$ .

Для построения общей модели предположим, что в области  $\Omega_n$  можно задать функцию  $\theta(M) = \theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , на основе которой будем создавать формализованную модель. Данная функция позволит сформировать еще одно скалярное поле, называемое ранее средой моделирования.

Также, как и в работах [10, 12, 13], для любого процесса  $l$  вблизи произвольной точки  $M$  постулируем связь вида  $dW = c_l \cdot d\theta$ , где  $c_l$  – величины, которые являются функциями процесса. Все это приводит к специальному виду уравнений Пфаффа, которые интегрируемы для отдельных классов функций  $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$  и определенных видов феноменологических величин  $c_l$ :

$$dW = c_1 \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_1} \right) dz_1 + \dots + c_n \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_n} \right) dz_n. \quad (2)$$

Во многих случаях для данного уравнения может быть сформулирован принцип существования энтропии и найден общий потенциал состояния системы [10].

Энтропия является характеристической функцией пространства состояний системы. В параметрическом представлении энтропия является длиной дуги векторной линии некоторого поля направлений, порождаемого скалярным полем эмпирической меры состояния системы  $W$  [10]. Также в многомерном пространстве  $\Omega_n$  может существовать общий интеграл (потенциал) вида  $U(z_1, z_2, \dots, z_n) = C$ , который представляет собой поверхность, ортогональную векторным линиям энтропии.

В общем случае среда моделирования в области  $\Omega_n$  может быть представлена в виде различных функциональных зависимостей относительно атрибутивных параметров  $z_1, z_2, \dots, z_n$ : мультипликативными, степенными, аддитивными, экспертными или иными зависимостями, входящими в классы однородных или мультипликативных функций. В работе [10] установлено, что при этих

условиях среда моделирования  $\theta$  в пространстве  $\Omega_n$  позволяет использовать квазилинейные многомерные уравнения в частных производных первого порядка, которые тесно связаны с уравнениями Пфаффа вида (2). Например, для случая среды моделирования следующего вида

$$\theta = \frac{z_1 \cdot z_2 \cdot \dots \cdot z_n}{z_{10} \cdot z_{20} \cdot \dots \cdot z_{n0}} \quad (3)$$

энтропия  $s$  и потенциал  $U$  состояния системы, определяются как:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln\left(\frac{z_1}{z_{10}}\right) + \dots + c_n \cdot \ln\left(\frac{z_n}{z_{n0}}\right), \quad (4)$$

$$U - U_0 = \frac{(z_1 - z_{10})^2}{c_1} + \dots + \frac{(z_n - z_{n0})^2}{c_n}, \quad (5)$$

здесь  $z_{10}, z_{20}, \dots, z_{n0}$  – параметры некоторого опорного состояния. В частном случае, для функций  $\theta$  вида (3) получаем все результаты классической термодинамики, в том числе и известное уравнение второго закона термодинамики  $ds = dW/\theta$ , где величина  $\theta$  является интегрирующим делителем [10].

В качестве среды моделирования могут использоваться различные функциональные зависимости из класса однородных функций, например, многомерная геометрическая вероятность, степенная мультипликативная функция относительно параметров  $z_1, z_2, \dots, z_n$ ,

индекс  $\theta = \sum_{k=1}^n z_k^2$ , исходя из геометрических

представлений однородности пространства, и др.

Энтропия  $s$  и потенциал  $U$  являются функциями состояния системы при справедливости условия существования скалярного поля эмпирической меры  $W$ . Изменение данных функций зависит только от начального и конечного состояния и не зависит от пути перехода системы между этими состояниями. При справедливости предложенных выше гипотез, для любой системы может быть сформулирован закон, который по своей сущности является многомерным аналогом «закона сохранения энергии».

Отличительной особенностью данного подхода является то, что исходные гипотезы могут быть приняты или отвергнуты на основе обработки данных опыта, представленных в структурированном виде относительно параметров свойств системы. Для этого адекватность выбранных сред моделирования может оцениваться по точности приближения опытных данных теоретическими зависимостями и возможности определения величин  $c_l$ .

## Дифференциальные уравнения для выбора сред моделирования

Проблема моделирования систем связана с опытными данными и средами моделирования, которые позволяют адекватно описать эти данные. Перебор различных видов функций  $\theta$ , определение величин  $c_l$  и оценка качества полученных зависимостей приводит к значительному объему вычислительных работ, особенно когда имеется много опытных данных. Обработка таких данных для получения феноменологических моделей может проводиться с учетом различных гипотез, которые определяют закономерности формирования эмпирической меры в пространстве состояний. Это возможно путем применения методов теории сплошных сред.

Эмпирическая мера, также как и параметры свойств, изменяется с течением времени, т.е. справедливо соотношение  $W(t) = W(z_1(t), z_2(t), \dots, z_n(t))$ . Исходя из гипотезы скалярного представления эмпирической меры, в окрестности каждой точки  $M$  пространства  $\Omega_n$  существует множество значений изменения величины  $W$ , зависящих от вектора направления процесса  $l$ .

Учитывая принятый ранее постулат о связи изменений величин  $W$  и  $\theta$  вида  $dW = c_l \cdot d\theta$ , примем гипотезу, что для любого процесса  $l$  в произвольной точке  $M$  существует связь между скалярными полями этих величин вида:

$$dW = grad_l W(M) = c(M) \cdot grad_l \theta(M), \quad (6)$$

где  $c(M) = c(z_1, z_2, \dots, z_n)$  – коэффициент пропорциональности как функция точки пространства  $\Omega_n$ , который определяет феноменологическую связь между величинами.

Если рассмотреть замкнутую поверхность  $\sigma$  многомерного объема  $v$ , выделенного в области  $\Omega_n$ , то за время  $dt$  через элемент поверхности  $d\sigma$  поток вектора  $grad W(M)$  будет равен:

$$dW = dt \cdot \iint_{(\sigma)} c \cdot grad \theta d\sigma. \quad (7)$$

Для величины  $W$  можно выдвинуть разные гипотезы об ее изменении во времени, которые будут связаны с сущностью этой величины. Например, предположим, что она подчиняется закону сохранения, тогда применяя балансировый метод в пространстве  $\Omega_n$ , получим

$$dW = dt \cdot \iiint_{(v)} \beta \frac{\partial \theta}{\partial t} dv = dt \cdot \iint_{(\sigma)} c \cdot grad \theta d\sigma, \quad (8)$$

где  $\beta(z_1, z_2, \dots, z_n)$  – некоторая функция пропорциональности.

Применяя к уравнению (8) формулу Остроградского, получим уравнение параболического типа для среды моделирования:

$$\beta \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \operatorname{div}(c \cdot \operatorname{grad} \theta) \quad \text{или} \quad (9)$$

$$\beta \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z_1} \left( c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z_1} \right) + \dots + \frac{\partial}{\partial z_n} \left( c \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z_n} \right). \quad (10)$$

Данное дифференциальное уравнение аналогично нестационарному уравнению конвективной диффузии при его обобщении на  $n$ -мерный случай.

Дифференциальное уравнение (10) и данные опыта или наблюдения в виде таблично-временных данных позволят проверить исходные гипотезы и определить множества феноменологических величин  $c(M)$  и  $\beta(M)$ . Эта задача сводится к решению обратных краевых задач для уравнения параболического типа и восстановлению искомым величин по опытным данным, которые собраны при наблюдении за процессами изменения параметров системы во времени.

Аналогичным образом, используя различные гипотезы по отношению к процессу изменения эмпирической меры во времени, можно приходить к различным краевым задачам математической физики и осуществлять проверку адекватности теоретических моделей по отношению к опытным данным для систем различной природы.

### Выводы

Таким образом, предложенные принципы и методы моделирования систем позволяют применить объективный подход при создании формализованных теорий в области гуманитарного знания.

В современном понимании объективный подход предполагает использование методов, которые не зависят от воли и желаний субъекта, обеспечивают формализацию научной задачи в области предмета исследования и применяют адекватные (чаще всего количественные) модели для описания объективных закономерностей реальности. Важным является также формирование обширной эмпирической базы, существование феноменологических описаний явлений и процессов и использование инструментов и средств для опытной проверки научных фактов и апробации их на практике.

Не во всех науках и сферах человеческой деятельности удастся применить объективные методы, однако в научном сообществе растет понимание этой необходимости. Именно поэтому в целом ряде областей знаний последнее время много внимания уделяется созданию

универсальных методов моделирования. На повестке дня стоит разработка общей методологии моделирования процессов различной природы, т.е. создание единой системы теорий разных областей знаний.

В данной статье показано, что приняв гипотезу о существовании эмпирической меры, можно гипотетически построить феноменологическую теорию для системы любой природы, для которой имеются данные наблюдений или опыта, представленные в виде обширных массивов количественной информации. Однако, проверка справедливости сформулированной теории связана с необходимостью анализа опытных данных и подбором наиболее адекватных сред моделирования. Применяя различные гипотезы, характеризующие особенности изменения эмпирической меры во времени можно также свести исходную задачу к решению различных уравнений математической физики.

Поэтому, как видно из данной статьи, можно предложить различные формализованные модели и теории как для естественнонаучных, так и гуманитарных областей знаний. Особенностью подхода является переход к идее представления данных опыта в виде сплошной среды и использование гипотезы существования величин для комплексной оценки состояния систем.

Предложенные методы построения формализованных теорий имеют свою область применения. В первую очередь, применение данного подхода ограничивается системами разных классов, для которых существуют эмпирические меры для оценки состояний систем и могут быть сформулированы описания, отличающиеся полевым представлением пространства состояний.

Кроме этого, данные методы могут быть реализованы только по отношению к определенным массивам опытных данных. Такие данные чаще всего могут быть получены при наблюдении эволюционных процессов развития различных систем, которым свойственны более или менее медленные, постепенные изменения в состоянии систем. Следует отметить, что такие процессы очень часто наблюдаются во многих биологических, экологических и социальных системах.

Научная значимость предложенных методов связана с возможностью построения формализованных моделей для систем различной природы. В ряде опубликованных ранее статей, а также статей этого сборника показана возможность реализации предложенных методов при решении задач комплексной оценки развития стран мира и анализа загрязнения воздуха в городах, а также в других областях [10, 12 – 16].

**Список литературы**

1. Смолин Ли. Неприятности с физикой: взлет теории струн, упадок науки и что за этим следует / Перевод с англ. Penguin Book, London, 2007. – 226 с.
2. Ludwig von Bertalanffy. The Theory of Open Systems in Physics and Biology // Science 13 January, 1950, 111: 23 – 29 [DOI: 10.1126/science.111.2872.23].
3. Берталанфи Л. Общая теория систем. Критический обзор // General Systems, Vol. VIII, 1962. – С. 1 – 20.
4. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. – М: Наука, 1981. – 495 с.
5. Hanneman R. and Hollingsworth J.R. Modeling and Simulation in Historical Inquiry // Historical Methods. Summer 1984. Vol. 17, no 3.
6. Hanneman R. Computer-assisted theory building. Modeling dynamic social systems. – SAGE. N.Y., 1988.
7. Марк А. О случайных и детерминированных событиях. – Электр. ресурс. URL: [http://samlib.ru/alesker\\_m/sluch\\_determ.Shtml#2n](http://samlib.ru/alesker_m/sluch_determ.Shtml#2n) (24.05.14).
8. Кас М. & Logan J. Fluctuation Phenomena, eds. E.W. Montroll & J.L. Lebowitz, North-Holland, Amsterdam, 1976.
9. Nelson E. Quantum Fluctuations. – Princeton: Princeton University Press, 1985.
10. Аверин Г.В. Системодинамика. – Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с. – Электр. ресурс. URL: <http://www.chronos.msu.ru/ru/rrules/item/sistemodinamika-2> (10.06.14).
11. Каратеодори К. Об основах термодинамики. – В кн.: Развитие современной физики: Пер. с нем. – М.: Наука, 1964. – С. 188 – 222.
12. Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Взаимосвязь термодинамической и информационной энтропии при описании состояний идеального газа // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: Друк-инфо, 2013. – №1 (4) – 2 (5). – С. 46 – 55. – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (13.06.14).
13. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины // Геотехническая механика. Днепропетровск. – 2013. – Выпуск 112. – С. 257 – 270. – Электр. ресурс. URL: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru/2013-god/vypusk-112> (10.08.14).
14. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. Построение уравнений состояний сложных токсикологических систем // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: ДонНТУ, 2011. – № 1. – С. 46 – 55. – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (21.04.14).
15. Zviahintseva A.V. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: Друк-инфо, 2014. – № 1 (6) – 2 (7). – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org>.
16. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Модели данных для отдельных проблемно-ориентированных баз данных // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: Друк-инфо, 2014. – № 1 (6) – 2 (7). – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org>.

**References (transliteration)**

1. Smolin Li. Neprijatnosti s fizikoj: vzlet teorii strun, upadok nauki i chto za jetim sleduet [Trouble with Physics: The Rise of string theory, the decadence in science and what it should be] / Perevod s angl. Penguin Book, London, 2007. – 226 p.
2. Ludwig von Bertalanffy. The Theory of Open Systems in Physics and Biology // Science 13 January, 1950, 111: 23 – 29 [DOI: 10.1126/science.111.2872.23].
3. Bertalanfi L. Obshhaja teorija sistem. Kriticheskij obzor [The general theory of systems. A critical review] // General Systems, Vol. VIII, 1962. – pp. 1 – 20.
4. Kapica P.L. Jeksperiment, teorija, praktika [Experiment, Theory, Practice]. – М: Nauka, 1981. – 495 p.
5. Hanneman R. and Hollingsworth J.R. Modeling and Simulation in Historical Inquiry // Historical Methods. Summer 1984. Vol. 17, no 3.
6. Hanneman R. Computer-assisted theory building. Modeling dynamic social systems. – SAGE. N.Y., 1988.
7. Mark A. O sluchajnyh i determinirovanyh sobytijah [Random and deterministic events]. – Elektr. resurs. URL: [http://samlib.ru/alesker\\_m/sluch\\_determ.Shtml#2n](http://samlib.ru/alesker_m/sluch_determ.Shtml#2n) (24.05.14).
8. Кас М. & Logan J. Fluctuation Phenomena, eds. E.W. Montroll & J.L. Lebowitz, North-Holland, Amsterdam, 1976.
9. Nelson E. Quantum Fluctuations. – Princeton: Princeton University Press, 1985.
10. Averin G.V. Sistemodinamika [Systemdynamics]. – Doneck: Donbass, 2014. – 405 p. – Elektr. resurs. URL: <http://www.chronos.msu.ru/ru/rrules/item/sistemodinamika-2> (10.06.14).
11. Karateodori K. Ob osnovah termodinamiki [On the bases of thermodynamics]. – V kn.: Razvitie sovremennoj fiziki: Per. s nem. – М.: Nauka, 1964. – pp. 188 – 222.
12. Averin G.V., Zvjaginceva A.V., Vzaimosvjaz' termodinamicheskoi i informacionnoj jentropii pri opisani sostojanij ideal'nogo gaza [The relationship of the thermodynamic entropy and information in the description of the ideal gas] // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii

- v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: Druk-info, 2013. – no. 1 (4) – 2 (5). – pp. 46 – 55. – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org>. (13.06.14).
13. Zvjaginceva A.V., Averin G.V. Primenenie metodov intellektual'nogo analiza dannyh pri ocenke razvitiya Ukrainy [The use of data mining techniques in the evaluation of the development of Ukraine] // Geotekhnicheskaja mehanika. Dnepropetrovsk. – 2013. – Issue 112. – pp. 257 – 270. – Elektr. resurs. URL: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru/2013-god/vypusk-112> (10.06.14).
14. Zvjaginceva A.V., Averin G.V. Postroenie uravnenij sostojanij slozhnyh toksikologicheskikh sistem [Construction of the complex equations of state poison control systems] // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: DonNTU, 2011. – no. 1. – pp. 46 – 55. – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (21.04.14).
15. Zviahintseva A.V. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: Druk-info, 2014. – no. 1 (6) – 2 (7). – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org>.
16. Averin G.V., Zvjaginceva A.V. Modeli dannyh dlja otдел'nyh problemno-orientirovannyh baz dannyh // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: Druk-info, 2014. – no. 1 (6) – 2 (7). – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org>.

**Аверін Г.В. «Загальна теорія систем: проблема створення формалізованих теорій в галузі гуманітарного знання».** Виконано аналіз існуючих підходів до моделювання систем в природознавчому та гуманітарному знанні. Відмінність парадигм цих областей знань багато в чому визначена ступенем формалізації досліджуваних процесів і явищ. Сформульовано актуальні питання, які пов'язані з проблемою моделювання соціогуманітарних систем. Запропоновано принципи створення формалізованих теорій в гуманітарному знанні, а також реляційно-польовий підхід побудови таких теорій. Особливістю підходу є використання ідей представлення даних досвіду у вигляді гіпотетичного суцільного середовища та застосування гіпотези існування емпіричних величин для комплексної оцінки стану систем. Показано також, що використовуючи гіпотези, які характеризують особливості зміни таких величин у часі, можна звести задачі моделювання до розв'язання деяких рівнянь матфізики. Отримані результати розвивають феноменологічні методи досліджень у теорії систем.

**Ключові слова:** загальна теорія систем, формалізовані теорії, гуманітарне знання, феноменологічні методи.

**Averin G.V. “General systems theory: the problem of creating formalized theories in the domain of humanitarian knowledge”.** The analyses of existing approaches for modeling systems in natural and humanitarian sciences was carried out. The differences of paradigms from these domains are largely defined by the formalization degree of the processes and events under investigation. The paper formulates urgent questions related to the problem of social and humanitarian systems modeling. It also proposes principles for creating formalized theories in humanitarian knowledge as well as relational-field approach to the building of those systems. The distinctive feature of the proposed approach is the use of idea of representing experimental data as hypothetically solid medium and applying the existence of empirical quantities hypothesis for complex system assessment. It is also shown that modeling tasks could be reduced to the solving of certain mathematical physics equations by using the hypothesis that characterize change peculiarities of those quantities in time. The obtained results develop phenomenological research methods in the theory of systems.

**Keywords:** general systems theory, formalized theories, humanitarian knowledge, phenomenological methods.

Статья поступила в редакцию 18.06.2014

Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Каргиным А.А.

## Harmonic balance method and global analysis of dynamical systems

Belovodskiy V.N., Smirnov A.N.  
Donetsk National Technical University  
v.belovodskiy@gmail.com, city\_17@inbox.ru

*Belovodskiy V.N., Smirnov A.N. "Harmonic balance method and global analysis of dynamical systems". One of the main problems in the global analysis of oscillatory systems is the finding of all its periodic motions for given correlations of the parameters and priori considerations give reason to believe that for systems of differential equations with polynomial nonlinearity the use of the harmonic balance method (HBM) for this purpose seems to be very attractive. Indeed, the HBM enables us to reduce the finding of stationary motions of such systems to the solving of systems of polynomial equations, the number of solutions of which, presumably, can be set using the theory of Newton polyhedra. And, then, with the help of the interval approaches or methods of continuation, which are currently being developed within the framework of tropical geometry, you can determine the whole set of solutions of polynomial equations and thus, the entire range of motions of the dynamical system.*

*In this paper, this hypothesis is being tested for the differential equation with cubic nonlinearity and harmonic exciting force. We consider two versions of HBM, – trigonometric one and complex exponential form. On their basis for the differential equation with cubic nonlinearity the construction of polynomial equations is fulfilled and in accordance with the theorem of Bernstein, attempt to estimate the number of solutions of the obtained system has been undertaken. Then, with use of interval bisection method solutions of the system of polynomial equations in a given part of phase space are determined, comparative evaluation of the complexity of the considered versions of HBM is conducted, advantages and disadvantages of the described approach are marked.*

**Keywords:** harmonic balance method, dynamical system, global analysis, Duffing equation, Newton polyhedron, interval bisection method.

### Introduction

The following considerations are the impetus of this research.

On the one hand it is obvious, that the successful performance of global analysis of dynamical systems is based on the finding of all solutions of the corresponding differential systems of equations. And traditionally it is being done with use of multistart methods by trying a certain volume of initial conditions. But, unfortunately, even for great number of initial points such procedure is not exhaustive. On the other hand the HBM gives an opportunity to reduce the finding of solutions of differential equations to the solving of systems of polynomial ones, for which there is the Bernstein's theorem describing the number of solutions through the mixed volumes of Newton polytopes [1]. And based on this, the following scheme of the implementation of the global analysis of dynamical systems seems to be very attractive. At first, by preserving the sufficient number of terms in the Fourier decompositions, we reduce the original system of differential equations to a system of polynomial ones. Then, using the theory of Newton polyhedra we determine the number of solutions of the resulting system. And, further, applying, one or the other method of the global search, we are guaranteed to determine the entire

range of solutions and, thus, theoretically evidential global analysis of dynamical systems is carried out.

It should be noted that at present, perhaps, the methods of continuation and various modifications of the multistart method are dominant in the global analysis of dynamical systems [2, 3], though the first of them are still in the development stage, and the latter is not exhaustive. Along with this under computational mathematics during the last decades there is being developed an interval analysis, which is increasingly beginning to use to the global analysis of equations and systems. And some authors believe that namely interval approaches are able to provide reliable analysis of nonlinear systems [4].

Below these hypotheses are being tested on the example of the Duffing equation in the area of the principal resonance.

### The model under consideration

So, here we consider the Duffing equation

$$\ddot{x} + b\dot{x} + x + \gamma x^3 = P \cos \omega t \quad (1)$$

and using HBM find its solutions in the area of the principal resonance. There are two main versions of HBM, – complex and trigonometric. In the first case, the solution is sought in the form

$$x(t) = \sum_{n=-N}^N c_n e^{inn\omega t}, \quad (2)$$

where  $N$  is the number of harmonics taken into account, in the second, – in the form

$$x = \sum_{n=0}^N (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (3)$$

or 
$$x = \sum_{n=0}^N Am_n \cos(n\omega t - \varphi_n).$$

The connection between the coefficients of these expansions are described by the following relationships:

$$Am_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} = 2\sqrt{c_n c_{-n}},$$

$$\varphi_n = \arccos \frac{c_n + c_{-n}}{2\sqrt{c_n c_{-n}}} \text{ or } \varphi_n = -\arccos \frac{c_n + c_{-n}}{2\sqrt{c_n c_{-n}}},$$

if  $(\Im c_{-n} = 0 \wedge \Re c_{-n} < 0) \vee \Im c_{-n} < 0$ ,

$$\varphi_n \in [-\pi, \pi), \text{ and } c_n = \frac{A_n - iB_n}{2}, c_{-n} = \frac{A_n + iB_n}{2}.$$

In each of these approaches solving of the differential equation (1), ultimately, reduces to the solving of a polynomial system of equations, however, in the first case, – to the system with complex coefficients, in the second case, – to the system with real ones. Consider these options in more detail.

### Comparison and selection of the form of the HBM

Here, we restrict ourselves by the analysis of the harmonic solutions of the equation (1), i.e. in expansions (2), (3) and suppose that  $N = 1$  and  $A_0 = B_0 = C_0 = 0$ . Substitute, now, each of these expansions into equation (1), perform algebraic transformations and after comparison of the respective harmonics we obtain a system of equations to determine the coefficients:

– in the case (2), –

$$\begin{cases} (1 - \omega^2 + ib\omega)c_1 + 3\gamma c_1^2 c_{-1} = \frac{1}{2}P \\ 3\gamma c_1 c_{-1}^2 + (1 - \omega^2 - ib\omega)c_{-1} = \frac{1}{2}P \end{cases} \quad (4)$$

– in the case (3), –

$$\begin{cases} (1 - \omega^2)A_1 + b\omega B_1 + \frac{3}{4}\gamma A_1(A_1^2 + B_1^2) = P \\ -b\omega A_1 + (1 - \omega^2)B_1 + \frac{3}{4}\gamma B_1(A_1^2 + B_1^2) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Note that the solutions of the equation (1) correspond to a self-adjoint solutions of the system (4), i.e., those for which  $c_{-1} = \bar{c}_1$ . Given this fact, along with (4) we also consider the equation

$$(1 - \omega^2 + ib\omega)c_1 + 3\gamma c_1^2 \bar{c}_1 = \frac{1}{2}P, \quad (6)$$

which is a shortened version of this system which doesn't contain, unlike it, the extra solutions. To

assess the comparative computational complexity of the considered forms HBM the construction of amplitude-frequency characteristics (AFC) for system (1) (Fig. 1) was carried out in Matlab, version 8.5 (R2015a), by solving the systems (4), (5) and (6) for the parameters of equation (1):  $b = 0.1, \gamma = 0.5, P = 1$  and  $\omega = [0.01, 3.0]$ , with step  $\Delta\omega = 0.01$ . When solving these systems as the initial conditions for the next value of  $\omega$  the set  $c_1, c_{-1}$  (or  $A_1, B_1$ ) has been taken, respectively, which was obtained for its previous value. Computational experiments were conducted with a computer having processor Intel Pentium Dual Core 2.2 GHz and memory 4GB. The results are presented in Table 1 and they demonstrate that the least time consuming corresponds to a trigonometric version of HBM, despite a few more number of calls to the functions describing the system of equations, compared with the complex version of HBM.

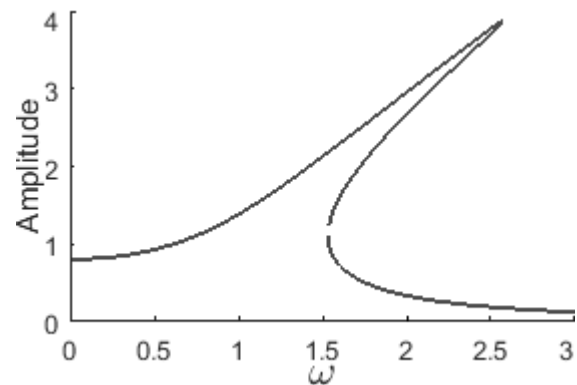


Figure 1. – AFC for the equation (1)

### Estimation of the number of solutions of the system

Taking in mind the described experiments, further we restrict ourselves by the trigonometric version of HBM and consider the system (5).

Note that the estimation of the total number of solutions of the nonlinear system in a given area or in a given interval, in itself, is quite interesting and important. For algebraic equations such instruments are known. They are, in particular, and the Fundamental Theorem of Algebra, and Shturm's Theorem, and Budan's and Fourier's procedures, etc., which allow you to set the number of real and complex roots and implement their separation [5]. For systems of polynomial equations the range of such possibilities is more narrow, although there are also some tools for estimating the number of solutions and they are based on the theory of Newton polytopes [1]. Thus, in particular, according to Bernstein's theorem, the number of non-trivial solutions of the system with generic coefficients is equal to the mixed volume of such polyhedra constructed for polynomial equations.

Table 1. – The results of the run-time

	Trigonometric version of HBM, system (5)	Complex version of HBM, system (4)	Shortened version of HBM, system (6)
Total work time, (s)	5.877	6.338	13.997
Average time of one solving of system of equations, (s)	0.0107	0.0110	0.2495
Average time of one calling of system of equations, (s)	$0.4738 \cdot 10^{-4}$	$0.7276 \cdot 10^{-4}$	$0.5586 \cdot 10^{-4}$
Total number of calls to the function describing system of equations	6775	6473	22379

We return to system (5). The computation of the mixed volume of Newton polytopes, carried out with use of the program MixedVol [7], gave 9 solutions. Although from the theory of vibrating systems it is known that the Duffing system in the area of the primary resonance has no more than three regimes, – two stable and one unstable. Taking in mind that system (5) has no trivial solution perform the following transformation. Namely, to the first equation multiplied by  $(-B_1)$  we add the second one multiplied by  $A_1$  and as the result we obtain

$$\begin{cases} A_1^2 + B_1^2 = PB_1 / b\omega \\ -b\omega A_1 + (1 - \omega^2)B_1 + \frac{3}{4}\gamma B_1(A_1^2 + B_1^2) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

The mixed volume of the Newton polyhedra for the system (7) is already six. Finally, if we substitute the ratio from the first equation into the second of system (7), we get

$$\begin{cases} A_1^2 + B_1^2 = PB_1 / b\omega \\ -b\omega A_1 + (1 - \omega^2)B_1 + \frac{3}{4}\gamma PB_1^2 / b\omega = 0 \end{cases} \quad (8)$$

And for this system the mixed volume of Newton polyhedra is already four.

Thus, for equivalent, essentially, systems (5), (7) and (8) the number of solutions determined with help of the Bernstein theorem turns out different. What's the deal?

To clarify the situation let us turn to the simple examples.

Example 1. Consider

$$\begin{cases} x^3 + xy^2 - 2 = 0 \\ x^2y + y^3 - 2 = 0 \end{cases}$$

Program MixedVol gives for this system nine solutions. However, subtracting the second equation from the first one and considering, further, two cases

$$\begin{cases} x - y = 0 \\ x^2y + y^3 - 2 = 0 \end{cases} \quad \text{and} \quad \begin{cases} x^2 + y^2 = 0 \\ y(x^2 + y^2) - 2 = 0 \end{cases}$$

i.e., essentially, performing identical transformations, we'll come to a conclusion that the original system has only three solutions.

Example 2. Consider

$$\begin{cases} x^2 - y^2 + 1 = 0 \\ x^2 + y^2 + 1 = 0 \end{cases}$$

Adding the second equation to the first one we have

$$\begin{cases} x^2 + 1 = 0 \\ x^2 + y^2 + 1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x^2 + 1 = 0 \\ y^2 = 0 \end{cases} \Rightarrow$$

$$\begin{cases} x_{1,2} = \pm i \\ y_{1,2} = 0 \end{cases} \Rightarrow (\pm i, 0) \text{ u } (\pm i, 0),$$

i.e. two pairs of multiple solutions, the mixed volume is equal to 4.

At last,

Example 3. The system

$$\begin{cases} x^2 + y^2 - 1 = 0 \\ x^2 + y^2 - 1 = 0 \end{cases}$$

has an infinite number of solutions, while the mixed volume of Newton polytopes equals 4.

Thus, summing up the performed analysis, the following can be noted. The theory of Newton polytopes is applicable to nondegenerate systems, does not account the relations between the equations of the system and., because of this, it gives only an upper estimate for the number of solutions. For these reasons, the results obtained with its use cannot serve as a control in the formation of a plurality of the solutions of the given system.

### Interval solving of system

It seems that the interval method of bisection can become to be a method that allows to find all solutions of the system. This method essentially generalizes the dichotomy method for the case of a system of equations and, conceptually, its approach is as follows. Consider a system of two equations

$$\begin{cases} f(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

and suppose you want to find all solutions of this system in a rectangular area  $D = X \times Y$ , where  $X = [a, b]$ ,  $Y = [c, d]$ ,  $a \leq b, c \leq d$ . At the first step the region  $D$ , along one of the measurements, is divided equally into two parts and in each part the smallest and the largest values of the functions  $f$



and  $g$  are determined. If in some of it the found values have equal signs, i.e.  $\min f \cdot \max f > 0$  or  $\min g \cdot \max g > 0$ , then in this part, this function takes values of the same sign and doesn't become zero. Consequently, in this part of the rectangle  $D$  system (9) has no solution, then this part is discarded and the remaining part is divided in half again. The procedure of successive division continues until each of the sides of the remaining parties becomes less certain  $\delta$ , where  $\delta/2$  is the given accuracy of the approximate solution. Then, the midpoints of the remaining sections are accepted as solutions of the system of the equations.

Another variant of this approach can be implemented using interval computations. Namely, instead of the original functions  $f(x, y)$ ,  $g(x, y)$  there are considered interval functions  $\mathbf{f}(X, Y)$ ,  $\mathbf{g}(X, Y)$  which can be obtained by replacing of the original variables in the given function by the intervals  $X, Y$  and the coefficients in it are presented by "point" intervals. The functions thus defined are called the natural interval extensions of the original functions. Operations over intervals in it are carried out according to the rules of interval arithmetic [6] and as a result an interval estimation of the values of the given functions is obtained. According to the fundamental theorem of interval arithmetic the range of values of the initial function is contained in its interval estimation that is  $\text{ran}(f(x, y)) \subseteq \mathbf{f}(X, Y)$ . Further actions are similar to those described above. Namely, the interval estimates  $\mathbf{f}(X, Y)$ ,  $\mathbf{g}(X, Y)$  are determined. If each of them contains zero, i.e.  $0 \in \mathbf{f}(X, Y)$  and  $0 \in \mathbf{g}(X, Y)$ , then the system (9) can have a solution in the domain  $X \times Y$  and by dividing one of the intervals in half the domain is divided into two parts. In each of the obtained parts the new interval estimates are determined, the part, in which, at least, one of the interval estimates doesn't contain zero, is discarded and the procedure continues as long as the size of the remaining part or parts containing zero becomes less than the preassigned small  $\delta$ . If desired, the obtained solutions can be clarified further by one of the usual methods for solving of nonlinear equations.

It should be noted that this procedure becomes less laborious and more certain, if  $\text{ran}(f(x, y)) = \mathbf{f}(X, Y)$  exactly. And for some classes of functions [4, 6], in particular, for polynomials, presented in the form

$$p(x, a^{(0)}, \dots, a^{(m)}) = \dots((a^{(m)}x + a^{(m-1)})^{n_{m-1}} + a^{(m-2)}) + \dots + a^{(1)n} + a^{(0)}$$

in which exponentiation is computed according to the rule  $X^k = [\min_{x \in X} x^k, \max_{x \in X} x^k]$  this requirement is fulfilled. In order to bring equations of the system

(8) to this kind it is sufficient to select there the perfect squares and present them in the form

$$\begin{cases} a_1 A_1 + c_1 (B_1 + \frac{b_1}{2c_1})^2 - \frac{b_1^2}{4c_1} = 0 \\ A_1^2 + (B_1 + \frac{d_1}{2})^2 - \frac{d_1^2}{4} = 0 \end{cases}, \quad (10)$$

where  $a_1 = -b\omega$ ,  $b_1 = 1 - \omega^2$ ,  $c_1 = \frac{3\gamma P}{4b\omega}$ ,  $d_1 = -\frac{P}{b\omega}$ .

The described methodology has been implemented by us in Matlab and the subsequent computational experiments were performed for the parameters of the equation  $b = 0.1$ ,  $\gamma = 0.5$ ,  $P = 1$  and  $\omega = 2$ . Figure 1 shows that the system at this point has three solutions

Figure 2 illustrates the procedure of successive division. In fairness, we note that for the purpose of clarifying the existence of a root in the area under the condition

$$\begin{cases} 0 \in \mathbf{f}(X_n, Y_m) \\ 0 \in \mathbf{g}(X_n, Y_m) \end{cases}$$

an additional test procedure was added to the program, which contains criteria for the check whether the point of intersection of curves  $f(x, y) = 0$ ,  $g(x, y) = 0$  lies in this plot. The matter is that the interval estimates contain zero in those cases also when the curves corresponding to the equations are contained in the parallelepiped, but do not intersect. This feature leads to the preservation of false parallelepipeds of the next generations and, perhaps, even to their accumulation. In order to avoid such situations an additional criterion was included into the algorithm, which performs the verification of the intersection of the curves in the considered part of the parallelepiped by replacing sections of the curves by the segments [8].

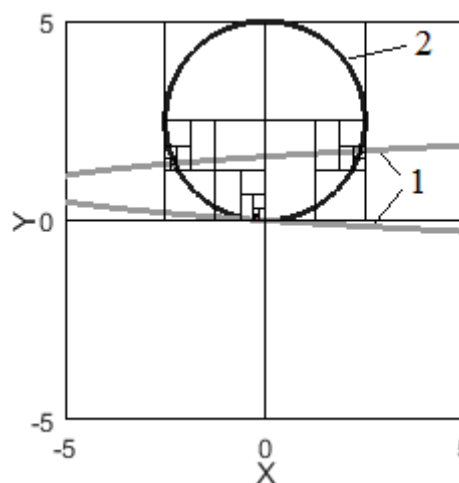


Figure 2. – Illustration of use of bisection method to the system (10): 1 – curve of the first equation of (10); 2 – curve of the second equation of (10)

In addition, given that the system (5) has no

trivial solutions, in order to exclude the search of the zero solution when implementing interval method, the zero point has been removed from the originally specified area of search (Figure 3) and the solving of the system (9) was carried out, which had been adapted to perform interval computations. The solving of the "trigonometric" system (5) was carried out in Matlab with the help of the function *fsolve*. The final results are as follows.

Interval bisection method. For the value of  $\delta = 0.001$  the elapsed time was  $T = 2.206s$  and there was found the next set of interval solutions:

$$- A_1 = [-0.3367; -0.3361], B_1 = [0.0226; 0.0233];$$

$$- A_2 = [-2.2604; -2.2597], B_2 = [1.4315; 1.4321];$$

$$- A_3 = [2.3831; 2.3837], B_3 = [1.7453; 1.7459].$$

When  $\delta = 0.01$  then time to find solutions amounted to  $2.132s$ , when  $\delta = 0.1$ , –  $1.822s$ .

Procedure *fsolve*: Volume of initial conditions in the domain  $D = \{(A_1, B_1) : -5 \leq A_1, B_1 \leq 5\}$  (Figure 2) was fixed and amounted to 25 sample points, elapsed time  $T = 0.874s$ , the found solutions were: the first one, –  $A_1 = -0.3366$  and  $B_1 = 0.0228$ , the second one, –  $A_2 = -2.2602$  and  $B_2 = 1.4316$ , the third one, –  $A_3 = 2.3835$  and  $B_3 = 1.7456$ .

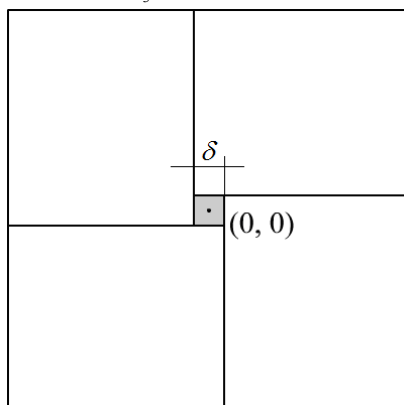


Figure 3. – Exclusion of the zero-point

Thus, interval methodology of calculations for the considered example turned out to be quite workable, although noticeably slower, compared with the multistart method. However, its undoubted advantages include a comprehensive conclusion on the number of roots, whereas when iterating the initial conditions there are no such certainty.

### Conclusion

In the paper there was illustrated the possibility of using the interval approach to the analysis of simple dynamical systems on the example of Duffing equation in the zone of the principal resonance. The results are quite encouraging and indicate the desirability of further research in this direction and subsequent transition to the analysis of combinational resonances of the

dynamical systems with one and several degrees of freedom. And according to their results, we hope, the role and place of the interval approach to the problems of global analysis can be established more specifically.

### References

1. Sturmfels B. Solving Systems of Polynomial Equations, Amer.Math.Soc., CBMS Regional Conferences Series, no. 97, Providence, Rhode Island, 2002. – 160 p.
2. Орлянская И.В. Современные подходы к построению методов глобальной оптимизации // Электронный журнал «Исследовано в России», т. 5, 2002, С. 2097 – 2108.
3. Rahimian S.K., Jalali F., Seader J.D. and White R.E. A new homotopy for seeking all roots of a nonlinear equation // Computers and Chemical Engineering. 35 (2011), pp. 403 – 411.
4. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск, ин-т вычислительных технологий СО РАН, изд-во «XYZ», 2013. – 606 с.
5. Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. Т. 2, М.: Физматгиз, 1959. – 620 с.
6. Alefeld G. and Herzberger J. Introduction to Interval Computation. Buch., Academic Press, ISBN 978-0-12-049820-8, 1984. – 352 p.
7. Li T.Y. and Li X., Finding mixed cells in the mixed volume computation // Found. Comput. Math. 1 (2001), pp. 161 – 181.
8. Смирнов А.Н., Беловодский В.Н. Некоторые подходы к интервальному решению конечных систем уравнений // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». Красноармійськ: ДонНТУ. № 1, С. 99 – 106.

### References (transliteration)

1. Sturmfels B. Solving Systems of Polynomial Equations, Amer.Math.Soc., CBMS Regional Conferences Series, no. 97, Providence, Rhode Island, 2002. – 160 p.
2. Orlyanskaya I.V. Sovremennyye podkhody k postroyeniyu metodov global'noy optimizatsii. [Modern approaches to building a global optimization methods] // Elektronnyy zhurnal "Issledovano v Rossii", t. 5, 2002, pp. 2097 – 2108.
3. Rahimian S.K., Jalali F., Seader J.D. and White R.E. A new homotopy for seeking all roots of a nonlinear equation // Computers and Chemical Engineering. 35 (2011), pp. 403 – 411.
4. Sharyy S.P. Konechnomernyy interval'nyy analiz. [The finite-dimensional interval analysis]. Novosibirsk, in-t vychislitel'nykh tekhnologiy SO RAN, izd-vo "XYZ", 2013. – 606 p.
5. Berezin I.S. and Zhidkov N.P. Metody

- vychisleniy. [Methods of calculations] T. 2, M.: Fizmatgiz, 1959. – 620 p.
6. Alefeld G. and Herzberger J. Introduction to Interval Computation. Buch., Academic Press, ISBN 978-0-12-049820-8, 1984. – 352 p.
  7. Li T.Y. and Li X., Finding mixed cells in the mixed volume computation // Found. Comput. Math. 1 (2001), pp. 161 – 181.
  8. Smirnov A.N. and Belovodskiy V.N.

Nekotorye podkhody k interval'nomu resheniju konechnykh sistem uravnenij [Some approaches to solving a finite interval systems of equations] // Naukovі pratsі Donets'kogo natsional'nogo tekhnichnogo unіversitetu. Seriya: "Іnformatika, kibernetika ta obchislyval'na tekhnika". Krasnoarmijs'k: DonNTU. no. 1, pp. 99 – 106.

**Беловодский В.Н., Смирнов А.Н. «Метод гармонического баланса и глобальный анализ динамических систем».** Одной из основных проблем при глобальном анализе колебательных систем является задача нахождения всех ее периодических режимов при данных соотношениях параметров и априорные соображения дают основания предполагать, что для систем дифференциальных уравнений с полиномиальной нелинейностью использование метода гармонического баланса (МГБ) для этих целей представляется весьма привлекательным. Действительно, МГБ позволяет свести поиск стационарных движений таких систем к решению систем полиномиальных уравнений, число решений которых, предположительно, может быть установлено с использованием теории многогранников Ньютона. А, далее, с помощью интервальных подходов или методов гомотопии, которые в настоящее время развиваются в рамках тропической геометрии, определить все множество решений полиномиальных уравнений и, тем самым, весь спектр движений динамической системы.

В данной работе эта гипотеза апробируется на дифференциальном уравнении с кубической нелинейностью и гармонической вынуждающей силой. Рассматриваются две версии метода гармонического баланса, – тригонометрическая и комплексно-показательная. На их основе для дифференциального уравнения с кубической нелинейностью проводится построение полиномиальных уравнений и, в соответствии с теоремой Бернштейна, предпринимается попытка оценить число решений полученных систем. Затем, с использованием интервального метода бисекции определяются решения системы полиномиальных уравнений в заданной части фазового пространства, проводятся оценки сравнительной трудоемкости рассматриваемых версий гармонического баланса, отмечаются достоинства и недостатки описываемого подхода.

**Ключевые слова:** метод гармонического баланса, динамическая система, глобальный анализ, уравнение Дуффинга, многогранник Ньютона, интервальный метод бисекции.

**Беловодський В.М., Смирнов О.М. «Метод гармонічного балансу та глобальний аналіз динамічних систем».** Однією із основних проблем при глобальному аналізі коливальних систем є задача знаходження всіх їхніх періодичних режимів при даних співвідношеннях параметрів і априорні міркування дають підстави припускати, що для систем диференціальних рівнянь з поліноміальною нелінійністю використання методу гармонічного балансу (МГБ) для цих цілей представляється вельми привабливим. Дійсно, МГБ дозволяє звести пошук стаціонарних рухів таких систем до рішення систем поліноміальних рівнянь, число рішень яких, імовірно, може бути встановлено з використанням теорії багатогранників Ньютона. А далі, за допомогою інтервальних підходів або методів гомотопії, які нині розвиваються в рамках тропічної геометрії, визначити всю множину рішень поліноміальних рівнянь, і тим самим, весь спектр рухів динамічної системи.

В цій роботі ця гіпотеза апробується на диференціальному рівнянні із кубічною нелінійністю та гармонічною змушуючою силою. Розглядаються дві версії методу гармонічного балансу, – тригонометрична та комплексно-показова. На їхній основі для диференціального рівняння з кубічною нелінійністю проводиться побудова поліноміальних рівнянь і, відповідно до теореми Бернштейна, робиться спроба оцінити число рішень отриманих систем. Далі, з використанням інтервального методу бісекцій знаходяться рішення системи поліноміальних рівнянь в заданій частині фазового простору, наводяться оцінки порівняльної трудомісткості розглянутих версій гармонічного балансу, відзначаються переваги та недоліки підходу, який описується.

**Ключові слова:** метод гармонічного балансу, динамічна система, глобальний аналіз, рівняння Дуффінга, багатогранник Ньютона, інтервальний метод бісекції.

Статья поступила в редакцию 24.06.2014

Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Авериным Г.В.

## ***Раздел 2***

### ***Системный анализ, моделирование и прогнозирование***

## Моделирование нейроморфных систем на переключательном уровне

Андрюхин А.И.

Донецкий национальный технический университет

alexandruckin@ramber.ru

**Андрюхин А.И.** «Моделирование нейроморфных систем на переключательном уровне». В работе выполнен обзор основных аппаратных и программных моделей реализации нейроморфных чипов. Рассмотрена известная модель Ходжкина-Хаксли и ее модификации. Даны примеры расчета моделей Морриса-Лекара, Фиц Хью-Нагумо, Хиндмарш-Розе. Показана возможность применения логического многозначного моделирования на переключательном уровне для схем пороговой логики. Это позволяет выполнять моделирование и тестирование реализаций нейроморфных систем в современных КМОП-технологиях.

**Ключевые слова:** нейрон, пороговая логика, многозначное моделирование, переключательный уровень.

### Введение

В настоящее время аналоговые СБИС считаются идеальным решением реализации сенсорных систем восприятия на базе твердотельной электроники. В случае успеха человечество научится создавать вживляемые кремниевые сетчатки для слепых и звуковые процессоры для глухих, а также дешевые и эффективные визуальные, звуковые и обонятельные чипы для роботов [1 – 4].

Аналоговые схемы играют важную роль в разработке современных электронных технологий. Даже в наш век цифровых компьютерных решений, аналоговые схемы до сих пор преобладают в области связи, энергетики, автоматического контроля, аудио и видео электроники благодаря их способности обрабатывать сигналы в реальном времени.

Создание нейроморфных микрочипов представляет собой отображение (морфинг) нервных связей на кремниевые электронные цепи. Обычно разделяют реализацию биологических и формальных нейронных систем.

Наиболее известный шаг при аппаратной реализации биологических нейронных систем связан с именами Миши Маховальд и известного специалиста по микроэлектронной технологии Карвера Мида (Carver Mead).

Целью исследования является оценка возможностей использования моделирования искусственных нейронных сетей (ИНС, нейроморфных чипов) на переключательном уровне. Это позволит более точно и эффективно выполнять проектирование и диагностирование ИНС.

Задачей исследования является оценка возможностей моделирования и тестирования на переключательном уровне нейроморфных систем на базе элементов пороговой логики.

### Искусственные нейронные сети

На рисунках 1 и 2 представлены уровни исследований для биологических и кремниевых структур согласно [5].

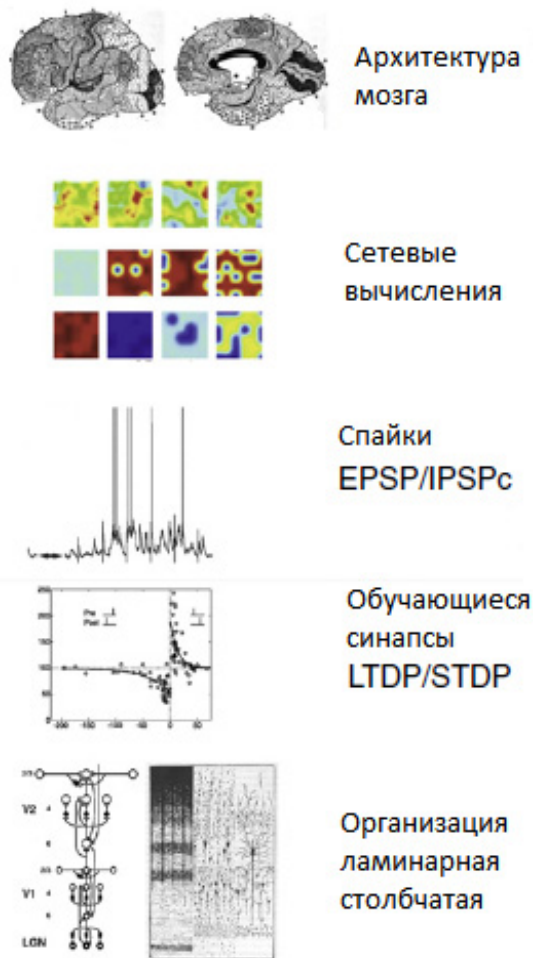


Рисунок 1. – Уровни исследований биологических нейронных структур

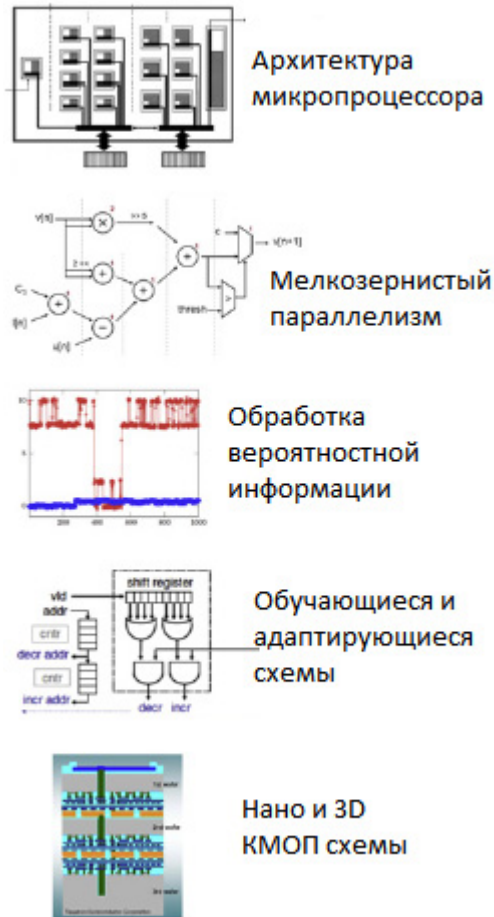


Рисунок 2. – Уровни исследований кремниевых нейрочипов

Заметим, что верхние три уровня на обоих рисунках можно определить как абстрактно-вычислительные, а последние два как физические.

**Клеточные нейронные сети**

Методы, связанные с цифровыми вычислениями подошли к серьезной границе скорости из-за своей последовательной структуры. Для преодоления этой проблемы была предложена модель «нейронной сети», основанной на некоторых аспектах нейробиологии и адаптированная к интегральным схемам. Её ключевыми чертами являются асинхронные параллельные вычисления, непрерывная динамика и глобальное взаимодействие элементов сети.

Рассмотрим архитектуру клеточной нейронной сети [6, 7]. Базовой частью клеточной нейронной сети является ячейка. Она содержит линейные и нелинейные элементы цепи. Обычно это линейный конденсатор, линейное сопротивление, линейный и нелинейный контролируемый источник, и независимый источник. Структура клеточной нейронной сети схожа с применяемой в клеточных автоматах. Любая ячейка клеточной нейронной сети соединена

только с соседними ячейками. Граничащие ячейки могут непосредственно взаимодействовать друг с другом. Ячейки, отстоящие друг от друга на некотором расстоянии, могут косвенно взаимодействовать в связи с эффектом распространения непрерывных сигналов в клеточной нейронной сети. Пример двумерной клеточной нейронной сети приведен на рисунке 3.

У клеточной нейронной сети  $M \times N$  есть  $M \times N$  ячеек, распределенных по  $M$  строкам и  $N$  колонкам. Ячейка, расположенная на  $i$ -й строке и  $j$ -й колонке обозначается  $C(i,j)$ , как на рисунке 3.

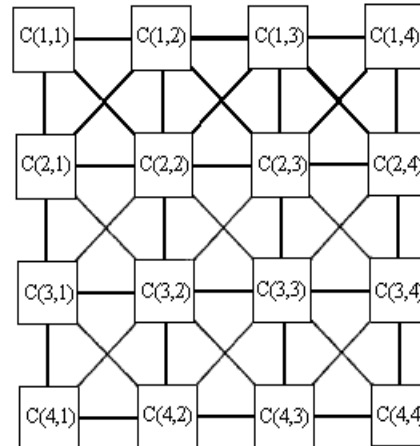


Рисунок 3. – Двумерная клеточная нейронная сеть

В клеточной нейронной сети R-соседство ячейки  $C(i,j)$  определяется по формуле:

$$N_r(i,j) = \{C(k,l) \mid (\max\{|k-i|, |l-j|\}) \leq r, 1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N\},$$

где  $r$  – целое, положительное число.

Из этой формулы легко можно увидеть свойство симметричности, следующего вида. Если  $C(i,j) \in N_r(k,l)$ , то  $C(k,l) \in N_r(i,j)$ . для всех  $C(i,j), C(k,l)$  принадлежащих клеточной нейронной сети. На рисунке 4 показаны ячейки, граничащие с  $C(i,j)$ -й ячейкой (расположенной в центре и отмеченной штриховкой) с  $r=1, 2$  и 3.

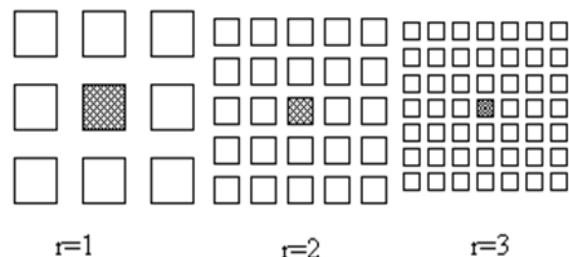


Рисунок 4. – Соседи для  $C(i,j)$  ячейки, определенные для  $r=1, r=2, r=3$

Стандартный пример ячейки клеточной нейронной сети  $C(i,j)$  приведен на рисунке 5, где  $u(x, y)$  – индексы входного (состояние, выходного) сигналов соответственно.

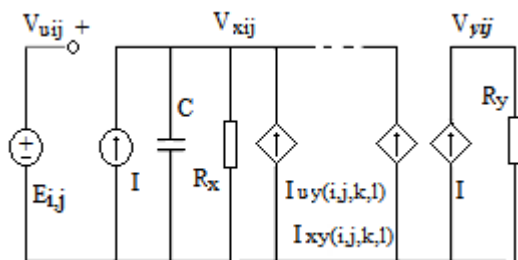


Рисунок 5. – Пример схемы ячейки клеточной нейронной сети

Узловое напряжение  $V_{xij}$  ячейки  $C(i,j)$  называется состоянием ячейки. В начальном состоянии его амплитуда меньше либо равна единице. Узловое напряжение  $V_{uj}$  ячейки  $C(i,j)$  называется входным сигналом. В начальном состоянии его амплитуда также меньше либо равна единице. Узловое напряжение  $V_{yj}$  ячейки  $C(i,j)$  – выходной сигнал ячейки [6].

В каждой ячейке  $C(i,j)$  есть независимый источник напряжения  $E_{ij}$ , один независимый источник тока  $I$ , один линейный конденсатор  $C$ , два линейных резистора  $R_x$ ,  $R_y$  и в большинстве случаев  $2m$  источников тока, контролируемых напряжением. Они связаны с соседними ячейками через контроллер входного напряжения  $V_{uj}$  и откликом выходного напряжения  $V_{yj}$  соседних ячеек  $C(k,l)$ , где  $m$  – эквивалентно количеству соседних ячеек. В частности,  $I_{xy}(i,j,k,l)$  и  $I_{yx}(i,j,k,l)$  – это линейные напряжения, контролируемые источником тока с такими характеристиками  $I_{xy}(i,j,k,l) = A(i,j,k,l)u_{ykl}$  и  $I_{yx}(i,j,k,l) = B(i,j,k,l)u_{xkl}$  для всех  $C(k,l), \in N_r(i,j)$ . Единственный нелинейный элемент в каждой ячейке – это кусочно-линейный контролируемый напряжением источник тока  $I_{yx} = 1/R_y f(V_{xij})$ , где функция  $f$  приведена на рисунке 6 (известная модель Чуа [6]).

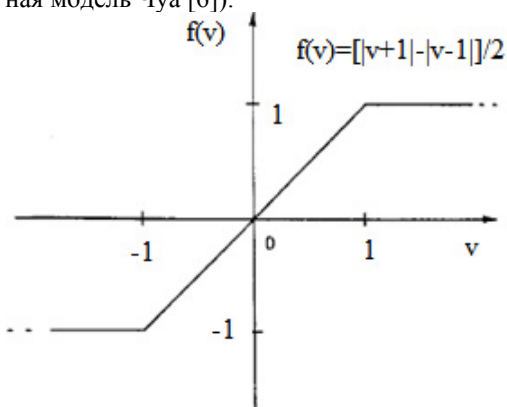


Рисунок 6. – Характеристика нелинейного источника тока

### Биологические нейронные системы

Миша Маховальд и известный специалист по микроэлектронной технологии Карвер

Мид (Carver Mead) впервые попытались изготовить глазную сетчатку из кремния в Калифорнийском технологическом институте. Они воспроизвели на основе нейрочипов три из пяти ее слоев. Другие исследователи моделировали (морфировали) остальные части зрительной и слуховой систем.

В 2001 г. Карим Заглул изготовил все пять слоев сетчатки и смоделировал визуальные сообщения, посылаемые мозгу ганглионарными клетками, т.е. выходными нейронами сетчатки.

Его кремниевый чип сетчатки, Visio1, воспроизводит реакцию основных четырех типов ганглионарных клеток сетчатки, которые вырабатывают сигналы и вместе составляют 90 % оптического нерва.

На рисунке 7 приведен визуальный чип.

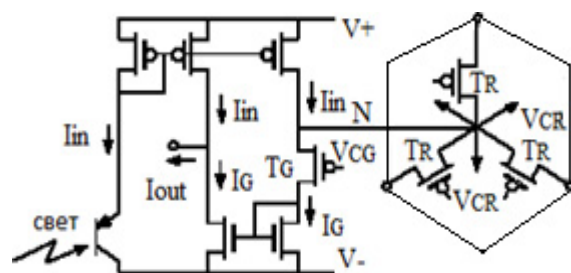


Рисунок 7. – Ячейка искусственной сетчатки

Чип имитирует процесс, в котором активированные напряжением ионные каналы заставляют ганглионарные клетки (и нейроны в остальной части мозга) вырабатывать нервные импульсы.

Для аналоговой реализации центральной нервной системы важен механизм генерации нервного импульса, т.е. функционирование клеточной мембраны, которая поддерживает постоянный состав цитоплазмы внутри клетки и обеспечивает проведение нервных импульсов.

Нервный импульс (спайк-spike) – процесс распространения возбуждения по аксону от тела клетки (аксонного холмика) до окончания аксона. Импульсы по волокну передаются в виде скачков потенциала внутриклеточной среды по отношению к внешней среде, окружающей клетку.

Для описания этих процессов используют классическую модель электрогенеза нервной клетки Ходжкина-Хаксли или ее более простые модификации Морриса-Лекара, Фиц Хью-Нагумо, Хиндмарш-Розе и др. [8, 9].

Модель Morris-Lecar (приводится ниже на рисунке 8) описывает такие свойства нейрона, как генерация спайков и режим невосприимчивости к внешнему воздействию с помощью параметров:  $v$  – трансмембранный потенциал нейрона,  $w$  – активность калийного тока,  $I$  – внешний ток и др.

$$gCa = 1.1$$

```

gK = 2
gL = 0.5
vCa = 1
vK = -0.7
vL = -0.5
ep = 0.02
It[t_] := 0.23*Abs[Sin[1*t]]
mb[v_] := (1 + Tanh[(v[t] + 1)/0.15])/2
wb[v_] := (1 + Tanh[v[t]/0.3])/2
tb[v_] := 1/Cosh[v[t]/0.6]
Iion[v_, w_] := gCa*mb[v] +
gK*w[t]*(vK - v[t]) + gL*(vL - v[t])
NDSolve[{v'[t] == Iion[v, w] + It[t],
w'[t] == ep*(wb[v] - w[t])/tb[v], v[0] ==
0, w[0] == 0}, {v, w}, {t,
0, 40.5}, MaxSteps -> Infinity]
Plot[{Evaluate[v[t] /. %], Evaluate[w[t] /.
%]}, {t, 0, 40.5}]
    
```

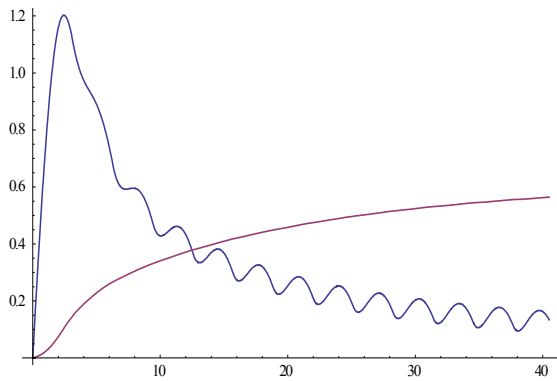


Рисунок 8. – Программа в Math 9 и результаты моделирования в модифицированной модели Морриса-Лекара

Приведем только результаты моделирования в некоторых других моделях на рисунках 9 и 10.

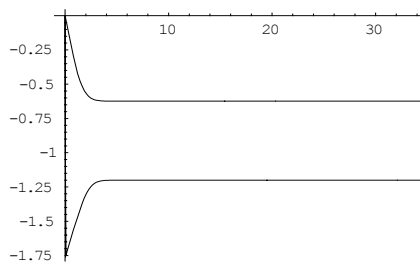


Рисунок 9. – Результаты моделирования в модели Фиц Хью-Нагумо

Заметим, что модель Хиндмарш-Розе (Hindmarsh-Rose) является феноменологической моделью динамики мембранного потенциала нейрона и она является, по сути, законом Кирхгофа, записанным для потенциала клеточной мембраны.

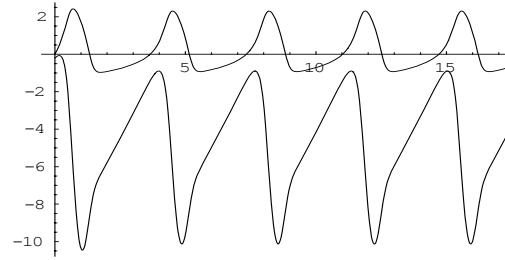


Рисунок 10. – Результаты моделирования в модели Хиндмарш-Розе (2- мерная)

На рисунке 11 центральное место занимает схема клеточной мембраны.

Результаты моделирования по модели Ходжкина-Хаксли приведены в [8, 9].

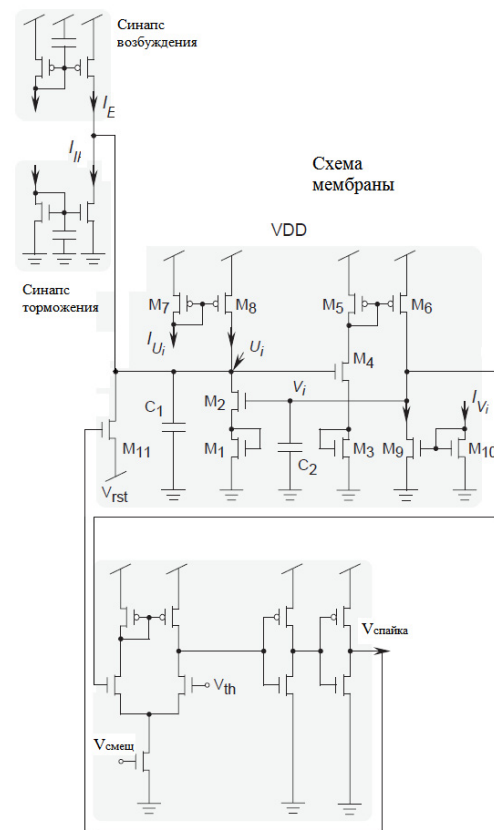


Рисунок 11. – Реализация клеточной мембраны на МОП-структурах

### Нейроморфные реализации механизма адаптации

Модель Ходжкина-Хаксли является простой моделью, описывающей импульсные свойства аксона кальмара, имеющего два активных ионных канала (натриевый и калийный) [8, 9]. Модификация этой модели шла в таких направлениях, как увеличение и учет различных видов ионных каналов, анализ структуры отростков аксонов и дендритов и т.п.



В настоящее время одним из основных направлений является нейроморфная реализация механизма нервной адаптации.

Первоначально эффект нервной адаптации наблюдался, когда нейроны показывали изменение своих импульсных свойств в присутствии постоянных стимулов. Первоначально считалось, что этот процесс обуславливается одной временной константой экспоненциальной зависимости и легко объясняется просто «адаптацией» канала.

Однако экспериментальные данные показывают, что процесс нервной адаптации имеет разные временные константы, зависящие от истории входных стимулов. Более того, зависимости имеют скорее степенной вид, нежели экспоненциальный и предлагались различные объяснения этим фактам [10, 11].

На рисунке 12 представлена электронная схема механизма нервной адаптации аксона кальмара с двумя активными каналами, которая предложена в [12]. Рассматривая ее МОП-реализацию (в частности, заменяя резисторы на нагрузочные транзистры), можно применять для ее качественного анализа и моделирования методики из [4].

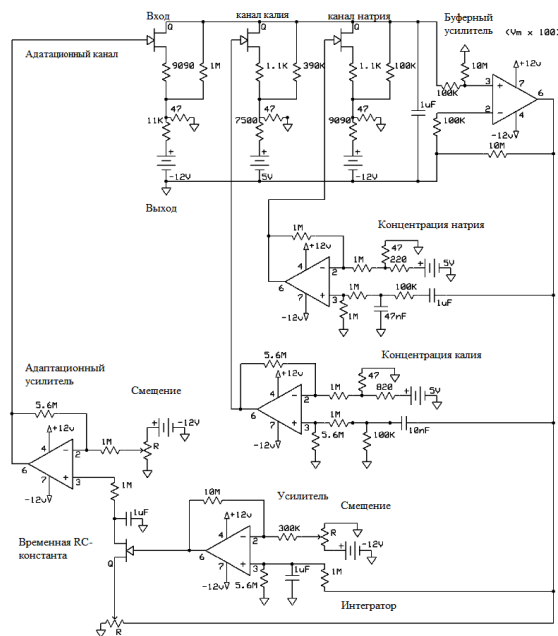


Рисунок 12. – Реализация механизма нервной адаптации

Согласно современным представлениям, такие функции человеческого мозга, как сознание, распознавание и многие другие, объясняются синхронным поведением нейронов определенных структур. С другой стороны, движениями живого существа управляют специальные нервные подсистемы — центральные генераторы ритма (ЦГ). Хотя ЦГ может быть автономной подсистемой, его ритм и фаза должны быть

синхронизированы с состоянием двигательной системы, что осуществляется на основе сенсорной обратной связи. Поэтому большое внимание уделяется синхронизации в нейронных структурах.

### Пороговая логика

При реализации формальных нейронных систем широко используют тот факт, что многие булевы функции можно представить пороговыми функциями. Известно, пороговая функция (*TLF*) – это булева функция  $Y(x) = \text{sgn}(\sum \omega_i x_i - \theta)$ , где  $\omega_i$  – веса аргументов  $x_i$ ,  $\theta$  – порог,  $x = (x_1, \dots, x_n)$ . Более того, важность использования *TL* связана с доказательством того, что некоторые виды булевых функции могут быть реализованы с использованием *TL* сетей, которые требуют меньше вентилях при меньшем количестве ступеней схемной реализации в сравнении с реализациями, основанными на традиционных булевых вентилях. Это ясно при рассмотрении следующего простого примера  $x_1 \& (x_2 \vee x_3) = \text{sgn}(2x_1 + x_2 + x_3 - 3)$  или  $x_1 \vee (x_2 \wedge x_3) = \text{sgn}(2x_1 + x_2 + x_3 - 1.5)$  [4, 5].

Наиболее известные представления булевых функций пороговыми функциями:

$$\begin{aligned} \text{OR}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \text{sgn}(-1 + x_1 + x_2 + \dots + x_n), \\ \text{AND}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \text{sgn}(-n + x_1 + x_2 + \dots + x_n), \\ \text{NAND}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \text{sgn}(n - 1 - x_1 - x_2 - \dots - x_n), \\ \text{MAJ}(x_1, x_2, \dots, x_n) &= \text{sgn}(\lceil n/2 \rceil + x_1 + x_2 + \dots + x_n). \end{aligned}$$

Однако легко показывается, что функция  $\text{XOR}(x_1, x_2)$  не представима функцией вида  $\text{sgn}(w_0 + w_1 x_1 + w_2 x_2)$ , т.е. не является пороговой (ЛРБФ-линейно разделяемая булева функция) функцией. Эта функция является единственной (и ее отрицание) булевой функцией от двух переменных из 16, которая не может быть реализована однослойной ИНС. Этот отрицательный результат был одной из причин угасания внимания к нейронным сетям в 60-е годы.

Заметим, что функция  $\text{XOR}$ , являющаяся элементарным распознавателем самых простых сигналов или объектов, реализуется достаточно сложной нейронной сетью. Известно, что операция распознавания является базовой операцией для интеллектуальных систем. Формальный нейрон, который описывается пороговой функцией, является базовым элементом ИНС. Используя ИНС, мы пытаемся построить системы искусственного разума, и естественно предположить, что базовый элемент может выполнять операцию распознавания. Но распознавание является эмерджентным свойством систем, которые могут быть построены на пороговых элементах, как и память для базового элемента памяти. Последний элемент легко реализуется двумя нейронами с обратными связями. Второе объяснение связано с неэквивалентностью биологического и формального нейронов.

Заметим, что в настоящее время нет полной ясности о числе линейно разделимых (или неразделимых) булевых функций от  $n$  переменных при  $n > 8$  [14].

**Моделирование схем пороговой логики**

В [14] рассматривается известная классификация пороговых функций, основой которой является их разбиение по количеству порогов и ограничениям на значения весов входов, представленная на рисунке 13 (здесь LT-threshold logic(пороговая логика), LTM- threshold logic many (пороговая логика со многими входами) и т.д. при реализации соответствующих функций).

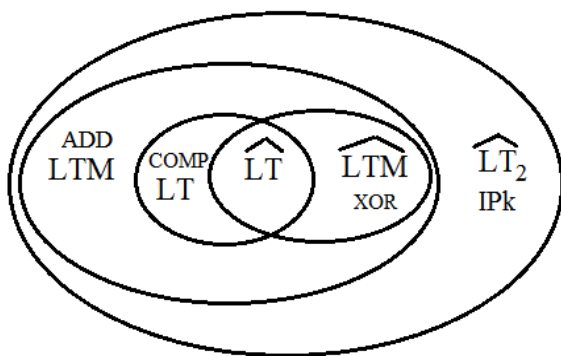


Рисунок 13. – Классификация пороговых функций

На рисунке 14 представлен один из возможных вариантов реализации любой пороговой функции на полевых транзисторах с плавающим затвором, но в настоящее время это с требуемой точностью трудно выполнить [4].

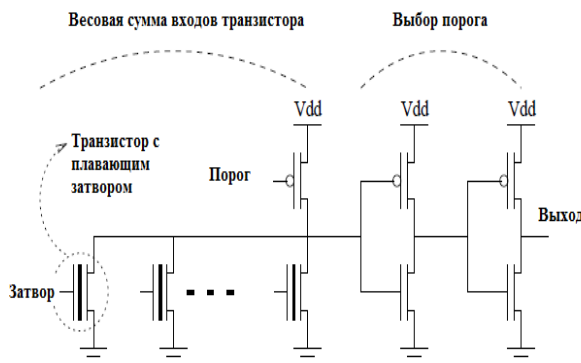


Рисунок 14. – Универсальная реализация пороговых функций

Согласно этой классификации, мы можем использовать моделирование на переключательном уровне для всех видов пороговых функций. Например, выше было упомянуто, что булева функция  $F=x_1 \vee (x_2 \wedge x_3)$  может быть представлена как  $F=sng(2x_1+x_2+x_3-1.5)$ .

Схема, реализующая  $F=x_1 \vee (x_2 \wedge x_3)$ , показана на рисунке 15. Далее, приведен рисунок 16 с таблицей результатов моделирования этой схемы. В приведенной таблице столбец 6 показывает результат булевой функции, столбцы 3, 4, 5 соответствуют аргументам  $x_1, x_2$  и  $x_3$ .

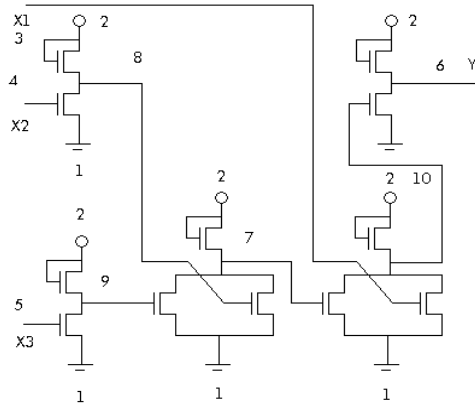


Рисунок 15. – Реализации  $F=sng(2x_1+x_2+x_3-1.5)$

Номер набора	Число итераций	Узел 3	Узел 4	Узел 5	Узел 6	Узел 7	Узел 8	Узел 9	Узел 10
1	5	D0	D0	D0	D0	D0	W1	W1	W1
2	2	D0	D0	D1	D0	D0	W1	D0	W1
3	2	D0	D1	D0	D0	D0	D0	W1	W1
4	5	D0	D1	D1	W1	W1	D0	D0	D0
5	3	D1	D0	D0	W1	D0	W1	W1	D0
6	2	D1	D0	D1	W1	D0	W1	D0	D0
7	2	D1	D1	D0	W1	D0	D0	W1	D0
8	3	D1	D1	D1	W1	W1	D0	D0	D0

Рисунок 16. – Результаты моделирования схемы, представленной на рисунке 15

**Выводы**

В работе выполнен обзор основных аппаратных и программных моделей реализации нейроморфных чипов для обработки различной информации. Были представлены модели как биологических, так и формальных нейронных систем.

Рассмотрены модель Хаксли-Ходжкина и ее модификации, клеточные нейронные сети и схемы пороговой логики.

Показана возможность применения логического многозначного моделирования на переключательном уровне для нейроморфных систем и в частности схем пороговой логики.

Таким образом, использование описания схем на переключательном уровне позволяет выполнять моделирование и тестирование аппаратных реализаций нейроморфных систем в различных МОП и КМОП-технологиях.

### Список литературы

1. Liu S.-C., Kramer J., Indiveri G., Delbruck T., and Douglas R. Analog VLSI: Circuits and Principles, MIT Press, 2002.
2. Valeriu Beiu, Senior Member, IEEE, José M. Quintana and María J. Avedillo. VLSI Implementations of Threshold Logic – A Comprehensive Survey // IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 14, no 5, September 2003, pp. 1217 – 1243.
3. Андрюхин А.И. Оценка вариаций параметров нейроморфных сетей // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Проблеми моделювання та автоматизації проектування», № 1(10) – 2(11), 2012. – С. 122 – 131.
4. Андрюхин А.И. Моделирование и диагностирование дискретных устройств на переключательном уровне: монография. Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 257 с.
5. Cassidy A.S., Georgiou J., Andreou A.G. Design of silicon brains in the nano-CMOS era: Spiking neurons, learning synapses and neural architecture optimization // Neural Networks 45 (2013), pp. 4 – 26.
6. Chua L. and Yang L. “Cellular Neural Networks: Theory,” IEEE Trans. on Circuits and Systems, 35(10): 1257 – 1272, 1988.
7. Leon O. Chua, Valery I. Sbitnev and Sook Yoon. A nonlinear dynamics perspective of Wolfram’s new kind of science. Part II: Universal neuron // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 13, no 9 (2003), pp. 2377 – 2491.
8. Hodgkin A., Huxley A. (1952) A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. Journal of Physiology 177, pp. 500 – 544.
9. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks // Ed.by M.A. Arbib, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
10. Gilboa G., Chen R., Brenner N. History-Dependent Multiple-Time-Scale Dynamics in a Single-Neuron Model // The Journal of Neuroscience, 2005, 25(28), pp. 6479 – 6489.
11. Drew P.J., Abbott L.F. Models and properties of power-law adaptation in neural systems // Journal of neurophysiology, 2006, 96(2), pp. 826 – 833.
12. Roy G. A simple electronic analog of the squid axon membrane // IEEE Trans Biomed Eng., 1972, 19(1), pp. 60 – 63.
13. Izhikevich, Eugene M. Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting // Massachusetts Institute of Technology, 2007.
14. Bohossian V. Neural logic: Theory and implementation. Ph.D. dissertation, Cal Tech, 1998. Available [www.paradise.caltech.edu/papers/vincent\\_thesis.ps](http://www.paradise.caltech.edu/papers/vincent_thesis.ps).
15. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с.

### References (transliteration)

1. Liu S.-C., Kramer J., Indiveri G., Delbruck T., and Douglas R. Analog VLSI: Circuits and Principles, MIT Press, 2002.
2. Valeriu Beiu, Senior Member, IEEE, José M. Quintana and María J. Avedillo. VLSI Implementations of Threshold Logic – A Comprehensive Survey // IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 14, no 5, September 2003, pp. 1217 – 1243.
3. Andrjuhin A.I. Ocenka variacij parametrov nejromorfnyh setej [Evaluation of parameter variations neyromorfnyh networks] // Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicznego universitetu, serija: “Problemi modeljuvan-nja ta avtomatizacii proektuvannja”, no 1(10) – 2(11), 2012. – pp. 122 – 131.
4. Andrjuhin A.I. Modelirovanie i diagnostirovanie diskretnyh ustrojstv na perekljuchatel'nom urovne: monografija [Modelling and diagnosis of discrete devices on the switching level: monograph]. Doneck: GVUZ “Don-NTU”, 2012. – 257 p.
5. Cassidy A.S., Georgiou J. and Andreou A.G.. Design of silicon brains in the nano-CMOS era: Spiking neurons, learning synapses and neural architecture optimization // Neural Networks 45 (2013), pp. 4 – 26.
6. Chua L. and Yang L. “Cellular Neural Networks: Theory,” IEEE Trans. on Circuits and Systems, 35(10): 1257 – 1272, 1988.
7. Leon O. Chua and Valery I. Sbitnev and Sook Yoon. A nonlinear dynamics perspective of Wolfram’s new kind of science. Part II: Universal neuron // International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 13, no 9 (2003), pp. 2377 – 2491.
8. Hodgkin A. and Huxley A. (1952) A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. Journal of Physiology 177, pp. 500 – 544.
9. The Handbook of Brain Theory and Neural Networks // Ed.by M.A. Arbib, Massachusetts Institute of Technology, 2003.
10. Gilboa G., Chen R., Brenner N. History-Dependent Multiple-Time-Scale Dynamics in a Single-Neuron Model // The Journal of Neuroscience, 2005, 25(28), pp. 6479 – 6489.

11. Drew P.J. and Abbott L.F. Models and properties of power-law adaptation in neural systems // *Journal of neurophysiology*, 2006, 96(2), pp. 826 – 833.
12. Roy G. A simple electronic analog of the squid axon membrane // *IEEE Trans Biomed Eng.*, 1972, 19(1), pp. 60 – 63.
13. Izhikevich, Eugene M. Dynamical systems in neuroscience: the geometry of excitability and bursting // *Massachusetts Institute of Technology*, 2007.
14. Bohossian V. Neural logic: Theory and implementation. Ph.D. dissertation, Cal Tech, 1998. Available [www.paradise.caltech.edu/papers/vincent\\_thesis.ps](http://www.paradise.caltech.edu/papers/vincent_thesis.ps).
15. Osovskij S. Nejronnye seti dlja obrabotki informacii [Neural network for processing information] Per. s pol'skogo I.D. Rudinskogo. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 344 p.

*Андрюхін О.І. «Моделювання нейроморфних систем на перемикаючому рівні». У роботі виконано огляд основних апаратних і програмних моделей реалізації нейроморфних чіпів. Розглянуто відому модель Ходжкіна-Хакслі та її модифікації. Наведено приклади розрахунку моделей Морріса-Лекара, Фіц Хью-Нагумо, Хіндмарш-Розе. Показана можливість застосування логічного багатозначного моделювання на перемикаючому рівні для схем порогової логіки. Це дозволяє виконувати моделювання та тестування реалізацій нейроморфних систем в сучасних КМОП-технологіях.*

**Ключові слова:** *нейрон, порогова логіка, багатозначне моделювання, перемикаючий рівень.*

*Andruckin A.I. “Switch-level modeling of neuromorphic systems”. The paper gives an overview of the major hardware and software implementation models neuromorphic chips. Design framework for neuromorphic architectures in the nano-CMOS era was presented. Our approach to the design of spiking neurons and STDP learning circuits relies on parallel computational structures where neurons are abstracted as digital arithmetic logic units and communication processors. Model as a biological neural systems and formal neural systems were presented. Known model Hodgkin- Huxley and its modifications were considered. Examples of calculation model Morris-Lecar, Hindmarsh-Rose and Fitzhugh-Nagumo were performed in the system Math 9. Cellular neural networks, and a specific example L. Chua were considered. Hardware implementation of formal neural systems (threshold logic) was presented. MOS implementation of neuronal adaptation is not very biologically plausible, but simulations of adaptation suggest other possible mechanisms that may be easily implemented in a other neuromorphic circuit. Basic threshold functions (definition and classification, basic properties and universal implementation) were presented. The possibility of a multi-valued logic simulation on the switching threshold level for logic circuits has been considered. Theoretical and practical aspects of the method were given. A specific example of the application of the switch-level simulation was given for threshold logic circuits.*

*The results, in addition to the theory of the creation of neuromorphic systems may be used in the technical logical identification and diagnosis systems.*

**Keywords:** *neuron, threshold logic, multivalued simulation, switching level.*

*Статья поступила в редакцию 20.07.2014*

*Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Ф.В. Недопекиным*

УДК 621.396.9

## Нейро-нечеткое прогнозирование длительности ожидания подтверждений в телекоммуникационной сети

Польщикова К.А.

Белгородский государственный университет  
polshchikov@bsu.edu.ru

*Польщикова К.А. «Нейро-нечеткое прогнозирование длительности ожидания подтверждений в телекоммуникационной сети». Статья посвящена разработке системы, предназначенной для прогнозирования длительности ожидания подтверждений в телекоммуникационной сети. На вход системы подаются значения длительности ожидания подтверждений на три предыдущих пакета, отправленных источником данных. Система базируется на применении четырехслойной нечеткой нейронной сети, функционирующей на основе восьми нечетких правил. Представлена функциональная схема системы. Для настройки системы сформированы обучающие данные, полученные путем измерения длительности ожидания подтверждений на пакеты заданного потока данных в реальной телекоммуникационной сети. Многочисленные имитационные эксперименты, выполненные в программной среде Matlab, показали приемлемую точность прогнозирования длительности ожидания подтверждений с помощью синтезированной нейро-нечеткой системы. Предложенная система может быть использована для оценки загруженности телекоммуникационной сети, а также для управления интенсивностью отправки данных и повторных передач.*

**Ключевые слова:** нейро-нечеткая система, длительность ожидания подтверждений, прогнозирование, телекоммуникационная сеть.

### Введение

В телекоммуникационных сетях с коммутацией пакетов для обеспечения достоверной доставки информации применяется квитирование, т.е. передача подтверждений (квитанций) на пакеты данных, которые были успешно доставлены адресату [1]. Длительность ожидания этих подтверждений является важным параметром, значения которого характеризуют загруженность сети, а результаты их прогнозирования могут быть использованы для управления интенсивностью отправки данных и повторных передач [2 – 7]. Анализ литературы показал, что вопросам получения качественного прогноза этой величины уделяется мало внимания. Поэтому разработка системы, предназначенной для прогнозирования длительности ожидания подтверждений в телекоммуникационной сети является актуальной научно-технической задачей.

### Синтез системы

Успешно осуществлять экстраполяцию тех или иных случайных функций позволяет применение нейро-нечеткой системы, сочетающей в себе преимущества нечеткой логики и искусственной нейронной сети [8 – 13].

Синтезируемая нечеткая нейронная сеть предназначена для определения величины  $\tilde{\tau}$  – прогнозируемой длительности ожидания подтверждения на пакет, отправляемый

источником данных. На вход разрабатываемой системы подаются величины  $\tau_x$ ,  $\tau_y$ , и  $\tau_z$ , т.е. значения длительности ожидания подтверждений на три предыдущих пакета, отправленных источником данных.

Исследования показали, что достаточную точность прогнозирования длительности ожидания подтверждения обеспечивает применение нечеткой нейронной сети со следующими параметрами: алгоритм нечеткого вывода – Сугено 0-го порядка [14], количество функций принадлежности для каждой входной величины – 2, форма функций принадлежности для каждой входной величины – треугольная, алгоритм обучения нейронов – обратного распространения ошибки [15, 16].

Функционирование синтезируемой системы основано на применении базы нечетких правил следующего вида:

$$\text{Если}(\tau_x = X_1) \text{ и } (\tau_y = Y_1) \text{ и } (\tau_z = Z_1), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_1), \quad (1)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_1) \text{ и } (\tau_y = Y_1) \text{ и } (\tau_z = Z_2), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_2), \quad (2)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_1) \text{ и } (\tau_y = Y_2) \text{ и } (\tau_z = Z_1), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_3), \quad (3)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_1) \text{ и } (\tau_y = Y_2) \text{ и } (\tau_z = Z_2), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_4), \quad (4)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_2) \text{ и } (\tau_y = Y_1) \text{ и } (\tau_z = Z_1), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_5), \quad (5)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_2) \text{ и } (\tau_y = Y_1) \text{ и } (\tau_z = Z_2), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_6), \quad (6)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_2) \text{ и } (\tau_y = Y_2) \text{ и } (\tau_z = Z_1), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_7), \quad (7)$$

$$\text{Если}(\tau_x = X_2) \text{ и } (\tau_y = Y_2) \text{ и } (\tau_z = Z_2), \text{ то } (\tilde{\tau} = H_8), \quad (8)$$

где  $X_1$  – терм номер 1 входной величины  $\tau_x$ ;  $X_2$  – терм номер 2 входной величины  $\tau_x$ ;  $Y_1$  – терм номер 1 входной величины  $\tau_y$ ;  $Y_2$  – терм номер 2 входной величины  $\tau_y$ ;  $Z_1$  – терм номер 1 входной величины  $\tau_z$ ;  $Z_2$  – терм номер 2 входной величины  $\tau_z$ ;  $H_1, H_2, \dots, H_8$  – значения индивидуальных выводов нечетких правил.

Вид и параметры функций принадлежности для каждой входной величины показаны на рисунках 1 – 3.

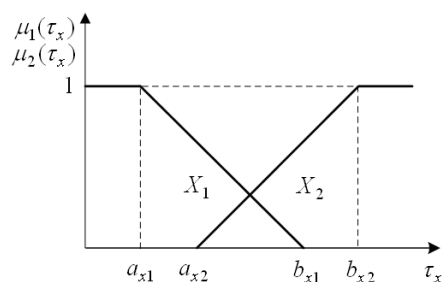


Рисунок 1. – Вид и параметры функций принадлежности для величины  $\tau_x$

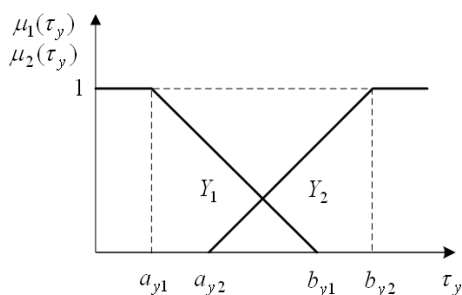


Рисунок 2. – Вид и параметры функций принадлежности для величины  $\tau_y$

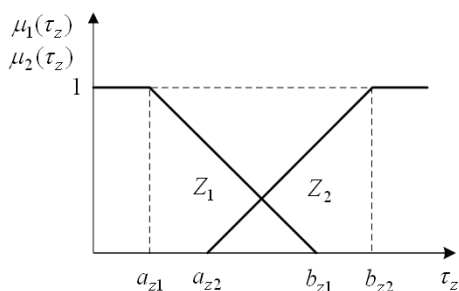


Рисунок 3. – Вид и параметры функций принадлежности для величины  $\tau_z$

Система прогнозирования длительности ожидания подтверждений состоит из четырех нейронных слоев (рис. 4).

С помощью первого слоя нейронов выполняется процедура физификации, т.е. вычисляются значения функций принадлежности для каждой входной величины:

$$\mu_1(\tau_x) = \begin{cases} 1, & \tau_x < a_{x1}; \\ \frac{b_{x1} - \tau_x}{b_{x1} - a_{x1}}, & a_{x1} \leq \tau_x < b_{x1}; \\ 0, & \tau_x \geq b_{x1}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_2(\tau_x) = \begin{cases} 0, & \tau_x < a_{x2}; \\ \frac{\tau_x - a_{x2}}{b_{x2} - a_{x2}}, & a_{x2} \leq \tau_x < b_{x2}; \\ 1, & \tau_x \geq b_{x2}; \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_1(\tau_y) = \begin{cases} 1, & \tau_y < a_{y1}; \\ \frac{b_{y1} - \tau_y}{b_{y1} - a_{y1}}, & a_{y1} \leq \tau_y < b_{y1}; \\ 0, & \tau_y \geq b_{y1}; \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_2(\tau_y) = \begin{cases} 0, & \tau_y < a_{y2}; \\ \frac{\tau_y - a_{y2}}{b_{y2} - a_{y2}}, & a_{y2} \leq \tau_y < b_{y2}; \\ 1, & \tau_y \geq b_{y2}; \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_1(\tau_z) = \begin{cases} 1, & \tau_z < a_{z1}; \\ \frac{b_{z1} - \tau_z}{b_{z1} - a_{z1}}, & a_{z1} \leq \tau_z < b_{z1}; \\ 0, & \tau_z \geq b_{z1}; \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_2(\tau_z) = \begin{cases} 0, & \tau_z < a_{z2}; \\ \frac{\tau_z - a_{z2}}{b_{z2} - a_{z2}}, & a_{z2} \leq \tau_z < b_{z2}; \\ 1, & \tau_z \geq b_{z2}. \end{cases} \quad (14)$$

Вторым слоем нейронов осуществляется процедура агрегирования, в результате которой определяется степень истинности каждого нечеткого правила:

$$G_1 = \mu_1(\tau_x) \wedge \mu_1(\tau_y) \wedge \mu_1(\tau_z); \quad (15)$$

$$G_2 = \mu_1(\tau_x) \wedge \mu_1(\tau_y) \wedge \mu_2(\tau_z); \quad (16)$$

$$G_3 = \mu_1(\tau_x) \wedge \mu_2(\tau_y) \wedge \mu_1(\tau_z); \quad (17)$$

$$G_4 = \mu_1(\tau_x) \wedge \mu_2(\tau_y) \wedge \mu_2(\tau_z); \quad (18)$$

$$G_5 = \mu_2(\tau_x) \wedge \mu_1(\tau_y) \wedge \mu_1(\tau_z); \quad (19)$$

$$G_6 = \mu_2(\tau_x) \wedge \mu_1(\tau_y) \wedge \mu_2(\tau_z); \quad (20)$$

$$G_7 = \mu_2(\tau_x) \wedge \mu_2(\tau_y) \wedge \mu_1(\tau_z); \quad (21)$$

$$G_8 = \mu_1(\tau_x) \wedge \mu_2(\tau_y) \wedge \mu_2(\tau_z). \quad (22)$$

Третьим слоем нейронов выполняется активизация, а также часть процедуры дефаззификации – вычисляются сумма результатов агрегирования и взвешенная сумма результатов агрегирования  $\sum_{r=1}^8 H_r G_r$ .

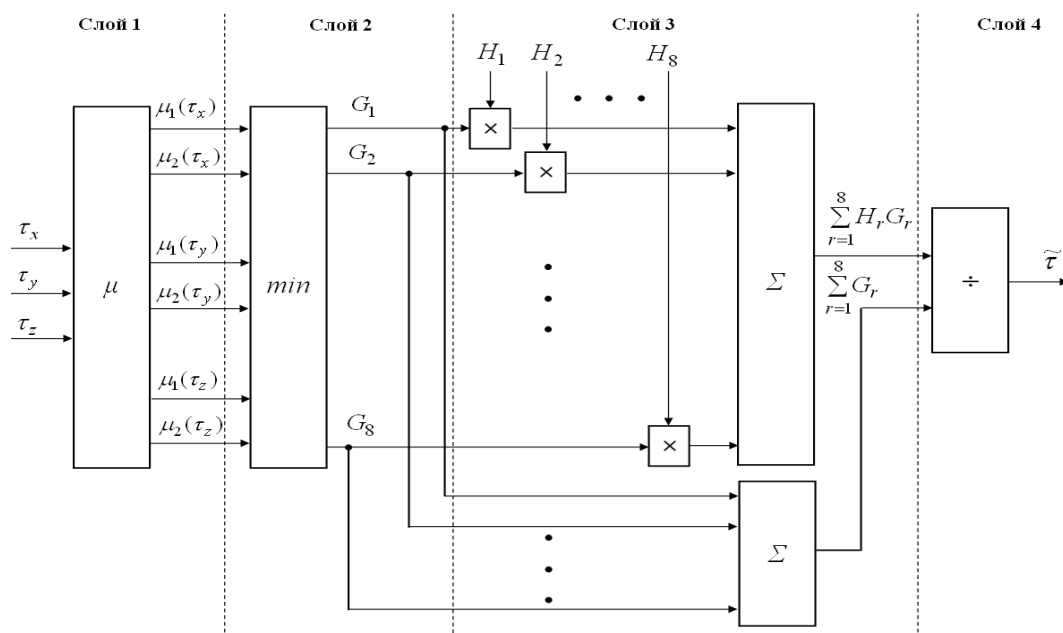


Рисунок 4. – Функциональная схема системы прогнозирования длительности ожидания подтверждений

С помощью четвертого слоя выполняется заключительная часть процедуры дефаззификации, состоящая в вычислении искомого значения выходной переменной  $\tilde{\tau}$  по формуле:

$$\tilde{\tau} = \frac{\sum_{r=1}^8 H_r G_r}{\sum_{r=1}^8 G_r}. \quad (23)$$

Для получения значений коэффициентов  $a_{x1}, a_{x2}, b_{x1}, b_{x2}, a_{y1}, a_{y2}, b_{y1}, b_{y2}, a_{z1}, a_{z2}, b_{z1}$ , и  $b_{z2}$  необходимо настроить веса нейронов первого слоя, а для получения значений  $H_1, H_2, \dots, H_8$  требуется настроить веса нейронов третьего слоя.

### Настройка системы

С целью настройки нечеткой нейронной сети сформирована обучающая матрица следующего вида:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & \tau_3 & \tau_4 \\ \tau_2 & \tau_3 & \tau_4 & \tau_5 \\ \dots & & & \\ \tau_i & \tau_{i+1} & \tau_{i+2} & \tau_{i+3} \\ \dots & & & \\ \tau_{I-3} & \tau_{I-2} & \tau_{I-1} & \tau_I \end{bmatrix}, \quad (24)$$

где  $\tau_i$  – длительность ожидания подтверждения на пакет номер  $i$ .

При получении матрицы (24) в течение  $I=750$  циклов наблюдения в реальной телекоммуникационной сети осуществлялось

измерение длительности ожидания подтверждений на пакеты заданного потока данных. Настройка нейро-нечеткой системы проводилась в программной среде Matlab с использованием 8 циклов обучения. В таблице 1 представлены результаты обучения нейронов первого слоя, а в таблице 2 содержатся результаты обучения нейронов третьего слоя.

Таблица 1. – Результаты обучения нейронов первого слоя

Параметр	$a_{x1}$	$a_{x2}$	$b_{x1}$	$b_{x2}$	$a_{y1}$	$a_{y2}$
Значение	3,75	26,74	3,63	28,3	3,75	27,57
Параметр	$b_{y1}$	$b_{y2}$	$a_{z1}$	$a_{z2}$	$b_{z1}$	$b_{z2}$
Значение	3,535	27,87	3,594	27,87	3,508	27,9

Таблица 2. – Результаты обучения нейронов третьего слоя

Параметр	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$H_4$
Значение	3,8	-6,0	7,2	8,7
Параметр	$H_5$	$H_6$	$H_7$	$H_8$
Значение	31,4	20,8	27,8	26,3

В результате проведения в среде Matlab многочисленных имитационных экспериментов установлено, что точность определения величины  $\tilde{\tau}$  с помощью синтезированной нейро-нечеткой системы находится в пределах 96,2 % – 98,1 %.

**Выводы**

Таким образом, синтезирована нейро-нечеткая система, предназначенная для прогнозирования длительности ожидания подтверждений на пакеты данных. Система состоит из 4-ех нейронных слоев, выполняющих процедуры нечеткого вывода (фаззификацию, агрегирование, активизацию и дефаззификацию). Для настройки весов нейронов используются обучающие данные, отражающие динамику изменения длительности ожидания подтверждений в реальной телекоммуникационной сети. Предложенная система может быть использована для оценки загруженности сети, а также для управления интенсивностью отправки данных и повторных передач.

**Список литературы**

1. Postel J. Transmission control protocol. RFC 793. – Электр. ресурс. URL: <http://www.faqs.org/rfcs/rfc793.html> (21.07.14).
2. Paxton V., Allman M. Computing TCP's Retransmission Timer. RFC 2988. – Электр. ресурс. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2988.txt> (07.06.14).
3. Polschikov K., Kubrakova K., Odaruschenko O. Methods and Technologies Analysis of The Real-Time Traffic Transmission Requests Servicing // World Applied Programming. – Vol. 3, Issue 9. – 2013. – pp. 446 – 450.
4. Рвачева Н.В., Польщиков К.А., Волошко С.В. Метод выбора межсегментного интервала в транспортном протоколе телекоммуникационной сети // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 2 (4). – С. 72 – 82.
5. Польщиков К.А. Метод нейро-нечеткого управления интенсивностью повторных передач в телекоммуникационной сети // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2013. – Вып. 2. – С. 32 – 41.
6. Polschikov K.O. Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 23rd International Crimean Conference. – 2013. – pp. 517 – 518.
7. Польщиков К.А. Метод нейро-нечеткого управления интенсивностью отправки данных узлами-источниками в мобильной радиосети специального назначения // Наука і техника повітряних сил України. – 2012. – № 3 (9). – С. 118 – 122.
8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
9. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 143 с.
10. Польщиков К.А. Обобщенные модели нейро-нечетких систем управления интенсивностью потоков данных в мобильной радиосети // Science and Education a New Dimension. – Budapest, 2013. – Vol. 8. – pp. 133 – 137.

11. Польщиков К.А., Здоренко Ю.Н. Усовершенствованный метод нейро-нечеткого управления отбрасыванием пакетов в транзитных маршрутизаторах телекоммуникационной сети // Проблемы телекоммуникаций. – 2014. – № 2 (14). – С. 76 – 90.
12. Польщиков К.А., Кубракова Е.Н., Краснобаев В.А. Модель нейро-нечеткого прогнозирования средней интенсивности поступления запросов на передачу потоков реального времени по каналу телекоммуникационной сети // Системы обработки информации. – 2014. – № 2 (118). – С. 193 – 197.
13. Польщиков К.А., Здоренко Ю.Н., Сокол Г.В. Методика нейро-нечеткого прогнозирования потерь пакетов при перегрузке компьютерной сети // Научный вестник ДГМА. – 2011. – №2 (8Е). – С. 77 – 86.
14. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, no 1, 1985, pp. 116 – 132.
15. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Internal Representations by Error Propagation // Parallel Distributed Processing. Cambridge: MIT-Press, 1986. Vol. 1. pp. 318 – 362.
16. Рутковская Д., Пилюньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

**References (transliteration)**

1. Postel J. Transmission control protocol. RFC 793. – Elektr. resurs. URL: <http://www.faqs.org/rfcs/rfc793.html> (21.07.14).
2. Paxton V., Allman M. Computing TCP's Retransmission Timer. RFC 2988. – Elektr. resurs. URL: <http://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2988.txt> (07.06.14).
3. Polschikov K., Kubrakova K., Odaruschenko O. Methods and Technologies Analysis of The Real-Time Traffic Transmission Requests Servicing // World Applied Programming. – Vol. 3, Issue 9. – 2013. – pp. 446 – 450.
4. Rvacheva N.V., Pol'shhikov K.O., Voloshko S.V. Metod vybora mezhssegmentnogo intervala v transportnom protokole telekommunikacionnoi seti [Method of selecting the inter-segment interval in the transport protocol telecommunication network]. Problemy telekommunikacij, 2011, Issue 2, pp. 72 – 82 (In Russ).
5. Pol'shhikov K.O. Metod nejro-nechetkogo upravlenija intensivnost'ju povtornyh peredach v telekommunikacionnoj seti [Method of neuro-fuzzy control the intensity of retransmissions in a telecommunications network] // Informacionnye tehnologii i telekommunikacij, 2013, Issue 2, pp. 32 – 41 (In Russ).
6. Polschikov K.O. Synthesis of neuro-fuzzy systems of data flows intensity control in mobile ad-hoc network // Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 23rd International Crimean Conference. – 2013. – pp. 517 – 518.



7. Pol'shnikov K.O. Metod nejro-nechetkogo upravlenija intensivnost'ju otpravki dannyh uzlami-istochnikami v mobil'noj radioseti special'nogo naznachenija [Method of neuro-fuzzy control the intensity of sending data source nodes in a mobile radio network for special purposes]. Nauka i tehnika povitrjanih sil Ukraïni, 2012, no 3(9), pp. 118 – 122 (In Russ).
8. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH [Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzyTECH]. SPb: BHV-Peterburg, 2003, 736 p. (In Russ).
9. Uskov A.A., Kuz'min A.V. Intellektual'nye tehnologii upravlenija. Iskusstvennye nejronnye seti i nechetkaja logika [Intelligent control technology. Artificial neural networks and fuzzy logic]. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom, 2004, 143 p. (In Russ).
10. Pol'shnikov K.O. Obobshennye modeli nejro-nechetkih sistem upravlenija intensivnost'ju potokov dannyh v mobil'noj radioseti [Generalized model of neuro-fuzzy systems control the intensity of the data streams in a mobile radio network] // Science and Education a New Dimension, 2013. – Vol. 8, pp. 133 – 137 (In Russ).
11. Pol'shnikov K.O., Zdorenko Y.N. Uovershenstvovannyj metod nejro-nechetkogo upravlenija otrasyvaniem paketov v tranzitnyh marshrutizatorah telekommunikacionnoj seti [Improved method for neuro-fuzzy control by dropping packets in transit telecommunications network routers] // Problemy telekommunikacij, 2014. – no 2(14), pp. 76 – 90 (In Russ).
12. Pol'shnikov K.O., Kubrakova E.N., Krasnobaev V.A. Model' nejro-nechetkogo prognozirovanija srednej intensivnosti postuplenija zaprosov na peredachu potokov real'nogo vremeni po kanalu telekommunikacionnoj seti [Model neuro-fuzzy prediction of medium intensity receipt of requests for streaming real-time in telecommunications network canal]. Sistemi obrobki informacii, 2014. – no 2, pp. 193 – 197 (In Russ).
13. Pol'shnikov K.O., Zdorenko Y.N., Sokol G.V. Metodika nejro-nechetkogo prognozirovanija poter' paketov pri peregruzke komp'juternoj seti [Methods of neuro-fuzzy foresight packet loss overload computer network] // Nauchnyj vestnik DGMA. – 2011. – no 2(8E). – pp. 77 – 86 (In Russ).
14. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. 15, no 1, 1985, pp. 116 – 132.
15. Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. Learning Internal Representations by Error Propagation // Parallel Distributed Processing. Cambridge: MIT Press, 1986, vol 1, pp. 318 – 362.
16. Rutkovskaja D., Pilin'skij M., Rutkovskij L. Neironnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2006, 452 p. (In Russ).

**Польщиков К.О. «Нейро-нечіткє прогнозування тривалості очікування підтверджень в телекомунікаційній мережі».** Стаття присвячена розробці системи, призначеної для прогнозування тривалості очікування підтверджень в телекомунікаційній мережі. На вхід системи подаються значення тривалості очікування підтверджень на три попередніх пакета, відправлених джерелом даних. Система базується на застосуванні чотиришарової нечіткої нейронної мережі, що функціонує на основі восьми нечітких правил. Представлено функціональну схему системи. Для налаштування системи сформовані навчальні дані, отримані шляхом вимірювання тривалості очікування підтверджень на пакети заданого потоку даних в реальній телекомунікаційній мережі. Численні імітаційні експерименти показали прийнятну точність прогнозування тривалості очікування підтверджень за допомогою синтезованої нейро-нечіткої системи. Запропонована система може бути використана для оцінки завантаженості телекомунікаційної мережі, а також для управління інтенсивністю відправлення даних і повторних передач.

**Ключові слова:** нейро-нечітка система, тривалість очікування підтверджень, прогнозування, телекомунікаційна мережа.

**Polschikov K.O. “Neuro-fuzzy prediction of confirmations waiting time in telecommunication network”.** Article is devoted to the development of a system for predicting of confirmations waiting time in the telecommunication network. The input of the values of the waiting time served on three previous acknowledgment packet sent data source. The system is based on the use of four-fuzzy neural network functioning on the basis of eight fuzzy rules. The functional diagram of the system is submitted. To configure the system formed training data obtained by measuring the waiting time on the packets acknowledgments predetermined data stream in real telecommunication network. Numerous simulation experiments performed in the software environment Matlab, showed an acceptable waiting time prediction accuracy using the synthesized evidence of neuro-fuzzy systems. The proposed system can be used to estimate the congestion telecommunications network, as well as to control the intensity data and sending retransmissions.

**Keywords:** neuro-fuzzy system, waiting time confirmations, prediction, telecommunication network.

Статья поступила в редакцию 20.07.2014  
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Каргиным А.А.

## Метод координатной функции Фока, интегральные соотношения между спиновыми и зарядовыми плотностями, их свойства

Климко Г.Т.

Донецкий национальный технический университет  
gtklimko@mail.ru

**Климко Г.Т. «Метод координатной функции Фока, интегральные соотношения между спиновыми и зарядовыми плотностями, их свойства».** Следующее из метода координатной функции Фока общее интегральное соотношение между её редуцированными матрицами плотности (РМП) различного порядка, полученное в предыдущей статье, применено для вывода интегральных соотношений между спиновыми и зарядовыми плотностями. Эти соотношения найдены решением предложенной системы уравнений в базе РМП координатных функций Фока. Предыдущий результат применен, чтобы частичные свёртки зарядовых плотностей с транспозициями разложить по базису указанных РМП. Особенностью найденных соотношений является наличие неоднозначности в их записи. Доказана их тождественность. Все выводы проведены только с плотностями, зависящими от пространственных координат. Развитый подход дополнил методы квантовой механики без спина новым способом получения спиновых распределений. Для вычисленных значений свёрток двух-, трёх- и четырёхчастичных матриц зарядовой плотности с транспозициями, действующими на них с одной стороны, обсужден физический смысл. Результаты точные. Уместно применять их для проверки и корректности построения зарядовых плотностей и принадлежности приближённой модельной функции чистому спиновому состоянию.

**Ключевые слова:** квантовая механика без спина, зарядовые и спиновые плотности, интегральные соотношения.

### Введение

Скрытые возможности и координатной [1], и производящей [2] функций Фока, обобщённой в [3] на редуцированные матрицы плотности порядка  $p$  (РМП- $p$ ), изучались в [3 – 11].

Производящая функция Фока для РМП- $p$  между состояниями  $\Psi_{sM'}$  и  $\Psi_{sM}$  со спином,  $s', s$ , и проекцией,  $-s' \leq M' \leq s', -s \leq M \leq s$ , соответственно, даёт общую связь её пространственной компоненты,  $L_{s,v,\mu,t}^{(p)}$ ,  $\mu = M' - M$ , стоящей при допустимом спиновом множителе, с главными её компонентами  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$ , (17) в [11]. Компонента  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$  для функций Фока  $\Phi_{s'}$  и  $\Phi_s$  равна:

$$L_{s,v,\tau}^{(p)} \left( \{i\}_\tau * \{j\}_{p-\tau} \left| \{i'\}_{\tau'} * \{j'\}_{p-\tau'} \right. \right) = L_{s,v,\tau}^{(p)} = \frac{\sqrt{(n+s')!(n-s')!(n+s)!(n-s)!}}{p!(n+s'-\tau)(n-p-s'+\tau)!} \times \quad (1)$$

$$Sp_r^{2n-p} \left( \Phi_{s'} \left( \dots \{i\}_\tau \left| \{j\}_{p-\tau} \dots \right. \right) \Phi_s^* \left( \dots \{i'\}_{\tau'} \left| \{j'\}_{p-\tau'} \dots \right. \right) \right).$$

Здесь  $v = s' - s = \tau - \tau'$ , и пространственные не штрихованные и штрихованные координаты частиц, стоящие до и после черты в функциях  $\Phi_{s'}$  и  $\Phi_s$ , указаны их номерами:  $\{i\}_\tau \cup \{j\}_{p-\tau} = \{1, 2, \dots, p\}$  и  $\{i'\}_{\tau'} \cup \{j'\}_{p-\tau'} = \{1', 2', \dots, p'\}$ , как в [11].

Другой результат [11] – это общее интегральное соотношение (ОИС), следующее из условий циклической симметрии  $\Phi_{s'}$  и  $\Phi_s$ . Оно свёртку РМП- $q$ , определяемой (1), но с  $q$  вместо  $p$ , по координатам  $q - p = (k+l+u+u')$  частиц,

когда часть из них,  $\{k\}$  и  $\{l\}$ , расположена в  $\Phi_{s'}$  и в  $\Phi_s$  одинаково,  $\{k\}$  – до и  $\{l\}$  – после черты, а интегрируемые переменные других частиц,  $\{u\}$  и  $\{u'\}$ , расположены в них не одинаково – по разные стороны от черты, выражает через РМП  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$  (1), у которых  $\tau$  и  $\tau' = \tau - v$  частиц из наборов  $\{\{i\} \cup \{j\}\}_p$  и  $\{\{i'\} \cup \{j'\}\}_{p'}$  стоят в  $\Phi_{s'}$  и  $\Phi_s$  до черты, и возможные значения  $\tau$  в них ограничены,  $\max\{0, v, \rho - u'\} \leq \tau \leq \min\{\rho, \rho' + v\}$ . Антисимметрию  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$  для наборов  $\{i\}_\rho$  и  $\{i'\}_{\rho'}$  в правой части ОИС, формулы (35) в [11], восстанавливают антисимметризаторы  $\hat{A}_\rho$  и  $\hat{A}'_{\rho'}$ . В левой части ОИС её имеет интегрируемая РМП- $q$ :

$$L_{s,v,t}^{(q)}[u,u'] = L_{s,v,t}^{(q)}[u,u'] \left( \{k\}\{u\}\{i\}_\rho * \{j\}_{p-\rho} \{u'\}\{l\} \right) \left| \{k\}\{u'\}\{i'\}_{\rho'} * \{j'\}_{p-\rho'} \{u\}\{l\} \right) = \frac{\sqrt{(n+s')!(n-s')!}}{q!(n+s'-t)!} \times \quad (2)$$

$$\frac{\sqrt{(n+s)!(n-s)!}}{(n-q-s'+t)!} Sp_r^{N-q} \left( \Phi_{s'} \left( \{k\}\{u\}\{i\}_\rho \left| \{j\}_{p-\rho} \{u'\}\{l\} \right. \right) \times \Phi_s^* \left( \{k\}\{u'\}\{i'\}_{\rho'} \left| \{j'\}_{p-\rho'} \{u\}\{l\} \right. \right) \right).$$

В (2) числа  $t = k + u + \rho$  и  $t' = k + u' + \rho'$  заменяют  $\tau$  и  $\tau'$  из (1),  $v = \tau - \tau' = t - t'$ , а в обозначении совокупностей интегрируемых переменных  $\{k\}$ ,  $\{l\}$ ,  $\{u\}$  и  $\{u'\}$  в скобках указан их размер.

Если  $u = u' = 0$  и  $k + l = q - p$ , ОИС даёт обычную свёртку (21) из [11] для РМП- $q$  функций Фока, а при  $\{u\} \neq \emptyset$  и/или  $\{u'\} \neq \emptyset$  – нетривиальное интегральное соотношение (НИС).

Эта работа продолжает статью [11].

Здесь предложен способ получения связей тензорных пространственных компонент РМП- $p$ ,  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)0}$ , со свёртками от пространственных компонент РМП- $q$  для тех же состояний, но большей частичности,  $q > p$ , того же или другого ранга, среди которых могут быть и только зарядовые плотности. При  $p \geq 2$  обнаружена множественность форм их записи. Установлена причина этого. Показано, что все они эквивалентны.

Это задача «квантовой механики без спина» [12], которая решена здесь методом координатной функции Фока [1 – 11]. В нём из функций Фока строят и спиновые плотности  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)0}$  с  $\omega \neq 0$ , и зарядовую плотность,  $R_{sM}^{(p)}$  с  $\omega = 0$ :

$$R_{sM}^{(p)}(l, \dots, p|l', \dots, p') = R_{(\gamma)0}^{(p)0} = \sum_{\tau} (p!)^{-1} \cdot \binom{p}{\tau} \cdot \sum_{Q \in \pi_p} \hat{Q} \cdot L_{s,0,\tau}^{(p)}(l, \dots, \tau^* \dots, p|l', \dots, \tau'^* \dots, p') \cdot \hat{Q}^+ \quad (3)$$

Она не зависит от  $M$  (в уравнении (19) согласно [11] величина  $\binom{p}{\tau}$  отсутствует).

Ранее с помощью метода Фока получены разложения [3, 5] по матрицам Матсена-Пошусты [13] для одно- и двухчастичных зарядовых,  $\rho_s$  и  $R_s = R$ , спин-орбитальной  $D_{ss} = D$ , спин-спиновой  $F_{ss} = F$  и спиновой  $d_{ss} = d$  плотностей. Они замещают вычисления сумм с одно и двух частичными генеалогическими коэффициентами для симметрической группы.

### Частные случаи нетривиальных интегральных соотношений

При  $p = 2$ ,  $s' = s$ ,  $u = u'$ ,  $\rho = \rho' = 1, 2$ , ОИС (35) из [11] для РМП функций Фока  $\Phi_{s'}$  и  $\Phi_s$  воспроизводят вспомогательные интегральные соотношения (5.6) – (5.8) из [4]. Полная свёртка в (2) с  $q = 2n$ ,  $s' = s$  и  $u = u'$ , когда функции отличаются  $u$  транспозициями, даёт тождества

$$Sp_r^{2n} \left\{ L_{s,0,0}^{(2n)}[u,u] \right\} = \binom{n+s}{u}^{-1}, \quad u \leq n-s. \quad (4)$$

Если  $\langle \Phi_s | \Phi_s \rangle = 1$ , они гарантируют нормировку функций  $\Phi_{sM}$ , (7) в [11], для всех  $M$ ,  $-s < M < s$ :

$$\langle \Phi_{sM} | \Phi_{sM} \rangle = \binom{n-M}{n-s} \cdot \binom{n+s}{n+M} \cdot \binom{2s}{s+M}^{-1} \times \langle \hat{A}_{n-M} \Phi_s | \hat{A}_{n-M} \Phi_s \rangle = 1. \quad (5)$$

Такое значение (5) получим, если учтем разложение (3) из [11] для  $\hat{A}_{n-M} = \left( \hat{A}_{n-M} \right)^2$ , в (5) действующих на координаты  $n - s$  последних частиц, ИС (4) и тождество (17.26) из [14]:

$$\sum_{u=0}^{\min\{n-s, s-M\}} (-1)^u \binom{n+s-u}{n-s-u} \cdot \binom{s-M}{u} = \binom{n+M}{n-s}, \quad (5')$$

$$\langle \Phi_s | \hat{A}_{n-M} \Phi_s \rangle = \binom{n-M}{n-s}^{-1} \cdot \sum_{u=0}^{\min\{n-s, s-M\}} (-1)^u \times \binom{n-s}{u} \cdot \binom{s-M}{u} \cdot \binom{n+s}{u}^{-1} = \binom{n-M}{n-s}^{-1} \cdot \binom{n+s}{n+M}^{-1} \cdot \binom{2s}{s+M}.$$

Следующие частные случаи ОИС, связывающие свёртки (2) с (1), применены ниже.

Для  $q = 3$ ,  $p = 2$ ,  $k = l = 0$ ,  $[u, u'] = [1, 0]$  или [0.1] ОИС переходит в равенства:

$$Sp_3 \left\{ L_{s,0,1}^{(3)}[1,0] \right\} = Sp_3 \left\{ L_{s,0,1}^{(3)}[0,1] \right\} = -\frac{1}{3} L_{s,0,0}^{(2)}; \quad (6)$$

$$Sp_3 \left\{ L_{s,0,2}^{(3)}[1,0] \right\} = -\frac{2}{3} L_{s,0,1}^{(2)} \hat{A}_{1'2'}; \quad (6')$$

$$Sp_3 \left\{ L_{s,0,2}^{(3)}[0,1] \right\} = -\frac{2}{3} \hat{A}_{12} L_{s,0,1}^{(2)}. \quad (6'')$$

Антисимметризаторы  $\hat{A}_{12}$  и  $\hat{A}_{1'2'}$  действуют соответственно на не штрихованные и штрихованные пространственные координаты частиц.

В случаях с  $q = 4$  и  $p = 2$ , при ненулевом значении  $u$  и/или  $u'$ , для свёртки  $L_{s,v,l}^{(4)}[u,u']$  по координатам третьей и четвёртой частиц, когда  $k = 0$ ,  $l = 1$  и  $s' = s$ , из ОИС следуют:

$$Sp_{34} \left\{ L_{s,0,1}^{(4)}[1,0] \right\} = Sp_{34} \left\{ L_{s,0,1}^{(4)}[0,1] \right\} = -\frac{n-s-2}{12} L_{s,0,0}^{(2)}; \quad (7)$$

$$Sp_{34} \left\{ L_{s,0,2}^{(4)}[2,0] \right\} = Sp_{34} \left\{ L_{s,0,2}^{(4)}[0,2] \right\} = \frac{1}{6} L_{s,0,0}^{(2)}; \quad (7')$$

$$Sp_{34} \left\{ L_{s,0,2}^{(4)}[1,1] \right\} = \frac{1}{12} \left[ (n-s-1) L_{s,0,1}^{(2)} - L_{s,0,0}^{(2)} \right],$$

а для  $k = 1$  и  $l = 0$  оно же даёт тождества:

$$Sp_{34} \left\{ L_{s,0,3}^{(4)}[1,0] \right\} = -\frac{n+s-2}{6} L_{s,0,1}^{(2)} \hat{A}_{1'2'}; \quad (7'')$$

$$Sp_{34} \left\{ L_{s,0,3}^{(4)}[0,1] \right\} = -\frac{n+s-2}{6} \hat{A}_{12} L_{s,0,1}^{(2)}. \quad (7''')$$

### Нетривиальные интегральные соотношения для тензорных компонент

Преобразования от РМП- $p$  функций Фока  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$  (1) к тензорным компонентам РМП  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)\mu}$ , как в (18) из [11], обратимые. То есть РМП- $p$   $L_{s,v,\tau}^{(p)}$  также однозначно разложимы по компонентам  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)\nu}$ , с  $\mu = \nu$ , той же частичности.

Так, для всех компонент РМП-1 [3 – 5]:

$$L_{s,0,1}^{(1)} = l_+ = \frac{\rho_s + s d_{ss}}{2}; \quad L_{s,0,0}^{(1)} = l_- = \frac{\rho_s + s d_{ss}}{2}; \quad (8)$$

$$L_{s,-1,0}^{(1)} = l^{(-1)} = \sqrt{2s(2s-1)} \cdot d_{s-1,s}.$$

Здесь  $\rho_s = R_s^{(1)}$  и  $d_s$  – зарядовая и спиновая плотности. С учётом симметрии диагональных по спину тензорных компонент РМП-2

$$R' = 'R, \quad (\text{или } R = 'R), \quad (9)$$

$$D + 'D + D' + 'D' = 0, \quad (9')$$

$$F = -'F = -F' = 'F', \quad (9'')$$

для них верны равенства:

$$\begin{aligned} L_{s,0,2}^{(2)} &= L_+ = \frac{R - R' + s(2s-1)F}{6} - \frac{s(D' + 'D)}{4}; \\ L_{s,0,0}^{(1)} &= L_- = \frac{R - R' + s(2s-1)F}{6} + \frac{s(D' + 'D)}{4}; \\ L_{s,0,1}^{(2)} &= \frac{1}{2}K = \frac{2R + R' - s(2s-1)F}{6} + \frac{s(D - 'D')}{4}. \end{aligned} \quad (10)$$

Штрихи слева и/или справа от  $R, D$  и  $F$  обозначают перестановки их штрихованных и/или нештрихованных координат. Из (9) – (9'') следует, что зарядовая плотность бисимметрична, спин-орбитальную плотность нельзя симметризовать одновременно по нештрихованным и штрихованным переменным, спин-спиновая плотность антисимметрична в обоих наборах переменных. Множитель  $1/2$  при  $K$  в (10) согласован с (3).

Из ОИС, связывающего  $L_{s,v,t}^{(q)[u,u']}$  с  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$ , и таких равенств, как (3), (8) – (10), следуют ИС между тензорными компонентами РМП различного ранга и частичности. Процедура их вывода: под знаком свёртки по координатам  $q - p$  частиц плотности  $R_{(\gamma)\omega}^{(q)v}$  разложим по  $L_{s,v,\tau}^{(q)}$ , для интегралов с ними применить ОИС [11], и затем от РМП  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$  вернёмся к  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)v}$ . Всё это выполнимо. Ряд уравнений, связывающих комбинации свёрток от  $R_{(\gamma)\omega}^{(q)v}$  с  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)v}$ , в базисе  $L_{s,v,\tau}^{(p)}$ , который является общим для их левых и правых частей, будет итогом таких преобразований.

Связь каждой компоненты РМП- $p$  с комбинацией нетривиальных свёрток даст решение системы таких линейных уравнений. В частности, решение для  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)v}$  будет зависеть только от зарядовых плотностей (3), если тензорные компоненты с  $q > p$  в каждой свёртке по координатам  $q - p$  частиц для любого уравнения системы имеют ранг  $\omega' \equiv 0$ . Это задача «квантовой механики без спина»? Разрешима ли она её же методами (без явного учёта спина)? Однозначна ли запись получаемых в ней результатов? Физическая причина для математической неоднозначности решений обсуждается ниже.

В [6] алгеброй спинов показана возможность из зарядовых плотностей большей частичности  $R_s^{(q)}$  получать  $R_{(1^{p-\omega} \dots)}^{(p)0}$ , где  $q = p + \omega$ .

Любая  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)0}$  определяется из главной компоненты того же ранга,  $R_{(1^{p-\omega} \dots)}^{(p)0}$ , перестановками её координат только внутри «наборов» из штрихованных или нештрихованных координат. В общем виде это доказано в [15].

Неоднозначность записи интегрального соотношения (ИС) с  $R_{(\gamma)\omega}^{(p)0}$  в [6] не обсуждалась. А у неё есть причины. Перестановочная симметрия пространственных компонент РМП- $p$

ограничена принципом Паули. Он эквивалентен «характеру симметрии и антисимметрии» Хунда [16] для шредингеровской функции, как и применению в «квантовой механике без спина» [12, 14] двухстолбцовых схем Юнга. Вследствие этого пространственные тензорные компоненты, как и функции Фока, нельзя ни симметризовать по координатам более, чем двух электронов, ни антисимметризовать по координатам более, чем  $n + s$  частиц.

Это порождает, в частности, линейные зависимости между двух частичными плотностями, получаемыми свёрткой из тензорных компонент большей частичности. Так, симметризованная по всем нештрихованным (или штрихованным) координатам частиц зарядовая плотность  $R_{(1^3)0}^{(3)0}$ , как и её свёртка по координатам любой частицы, уже равна нулю.

$$Sp_3 \left\{ \sum_{P \in \pi_3} \bar{P} \cdot R_{(1^3)0}^{(3)0} = \sum_{P \in \pi_3} R_{(1^3)0}^{(3)0} \cdot \bar{P}' \equiv 0 \right\}. \quad (11)$$

Учитывая в (11) бисимметричность зарядовой плотности  $R_{(1^3)0}^{(3)0}$  (3) и её редукцию:

$$R(1,2|1',2') = \frac{3}{N-2} Sp_3 \left\{ \sum_{P \in \pi_3} R_{(1^3)0}^{(3)0}(1,2,3|1',2',3) \right\}, \quad (12)$$

для нетривиальной свёртки с плотностью  $R_{(1^3)0}^{(3)0}$

$$\begin{aligned} Q &= Sp_3 \left\{ \bar{P}_{23} R_{(1^3)0}^{(3)0}(1,2,3|1',2',3) \right\} = \\ &Sp_3 \left\{ R_{(1^3)0}^{(3)0}(1,2,3|1',3,2') \right\} = Q(1,2|1',2'), \end{aligned} \quad (13)$$

получаем следующую зависимость

$$\frac{N-2}{3} \cdot (R + R') + Q + 'Q + Q' + 'Q' = 0. \quad (14)$$

Штрихи обозначают перестановки переменных, как в (10),  $N=2n$  – число частиц в системе.

Тождество (14) станет тривиальным, если перейти в нём к РМП (1) для функций Фока. Такой переход для  $Q$  (13) следует из ИС (6), (6') после учёта (3) для  $R_s^{(3)}$ . Он имеет вид:

$$\begin{aligned} Q(1,2|1',2') &= -\frac{n+s-2}{3} L_+ - \frac{n-s-3}{6} K - \\ &-\frac{1}{6} (K' + 'K) - \frac{n+s-1}{6} 'K' - \frac{n-s-4}{3} L_-. \end{aligned} \quad (15)$$

Аналогичные связи для  $R, D, F$  известны [4]:

$$\begin{aligned} R &= L_+ + \frac{1}{2} (K + 'K') + L_-; \\ D &= \frac{1}{s} \left[ L_+ + \frac{1}{2} (K - 'K') - L_- \right]; \\ F &= \frac{1}{s(2s-1)} \left[ L_+ - \frac{1}{2} (K - K' - 'K + 'K') + L_- \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Свёртки зарядовой плотности  $R_s^{(4)} \equiv R_{(1^4)_0}^{(4)0}$  (3) по координатам частиц 3 и 4, отличающиеся «односторонними» транспозициями, действующими на них, дополняют плотности  $R_s^{(2)}$  и  $Q$ :

$$\begin{aligned} V(1,2|1',2') &= Sp_{3,4} \left\{ R_{(1^4)_0}^{(4)0}(1,2,4,3|1',2',3,4) \right\}; \\ W(1,2|1',2') &= Sp_{3,4} \left\{ R_{(1^4)_0}^{(4)0}(3,4,1,2|1',2',3,4) \right\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Учёт в правой части первой свёртки формулы (3), НИС (7) с  $\rho = \rho'$ , и редукции (21) [11] дают для  $V$  разложение, сводящееся к линейной комбинации  $R$  и  $R'$ . Плотность  $W$  не зависит от  $R$  и  $Q$ . Это видно, например, из действия  $\hat{P}^r$  на РМП-4 в спин-орбитальном пространстве:

$$\hat{P}^r \Gamma^{(4)}(x_1, \dots, x_4 | x'_1, \dots, x'_4) = \sum_{(\gamma)\omega} \hat{P}^r R_{(\gamma)\omega}^{(4)\mu} \hat{T}_{(\gamma)\omega}^{(4)\mu}. \quad (18)$$

Здесь  $\hat{T}_{(\gamma)\omega}^{(p)\mu}$  – спиновый тензор,  $x = (r, \sigma)$ . Действие  $\hat{P}^r = \hat{P}_{3,4}^r$  или  $\hat{P}^r = \hat{P}_{1,3}^r \hat{P}_{2,4}^r$  переносится в (18) на спиновые координаты частиц и свёртка по координатам частиц 3 и 4 ведёт к РМП-2:

$$\begin{aligned} \Gamma^{(2)} &= Sp_{3,4}^{r,\sigma} \left\{ \hat{P}^r \Gamma^{(4)}(x_1, \dots, x_4 | x'_1, \dots, x'_4) \right\} = \\ &= Sp_{3,4}^{r,\sigma} \left\{ \sum_{(\gamma)\omega} (\mp 1) R_{(\gamma)\omega}^{(4)\mu} \cdot \hat{P}^\sigma \hat{T}_{(\gamma)\omega}^{(4)\mu} \right\}. \end{aligned} \quad (18')$$

Знак зависит от чётности перестановки.

Транспозиции, переставляющие спины, зависят от произведений спиновых тензоров:

$$\hat{P}_{3,4}^\sigma = -\frac{1}{2} \left[ 1 + 4 \sum_{\mu=-1}^1 \hat{t}_1^\mu(\sigma_3) \cdot \hat{t}_1^{\mu+}(\sigma_4) \right]. \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \hat{P}_{1,3}^\sigma \cdot \hat{P}_{2,4}^\sigma &= \frac{1}{4} \left[ 1 + 4 \sum_{\mu=-1}^1 \hat{t}_1^\mu(\sigma_1) \cdot \hat{t}_1^{\mu+}(\sigma_3) \right] \times \\ &\times \left[ 1 + 4 \sum_{\mu=-1}^1 \hat{t}_1^\mu(\sigma_2) \cdot \hat{t}_1^{\mu+}(\sigma_4) \right]. \end{aligned} \quad (20)$$

Свёртка (18') даёт разный результат с (19) и с (20). Для  $V$  из (17), свёртка по спинам  $\sigma_3$  и  $\sigma_4$  включает всю транспозицию (19). Она инвариантна при вращениях в спиновом пространстве, и ранг  $\omega$  слагаемых в (18') не изменит. Для  $W$  (17) свёртка по  $\sigma_3$  и  $\sigma_4$  в РМП-4 (18') затрагивает не все переменные в (20). Произведения тензоров в ней «разрываются», и в слагаемых (18') свёртки с  $\hat{t}_1^{\pm 1}(\sigma_3) \cdot \hat{t}_1^{\pm 1}(\sigma_4) \approx \hat{T}_{(1^2)_2}^{(2)\pm 2}$  изменяют, по правилу треугольника для спинов [2, 17], ранги  $\omega$  спиновых тензоров: с  $\omega \geq 2$  до  $\omega \pm 2$ , а с множителем  $R_s^{(4)} \equiv R_{(1^4)_0}^{(4)0}$  до  $0+2=2$ , порождая и  $F$ .

Аналогично, из  $Sp_{3,4}^{r,\sigma} \left\{ \hat{P}_{2,3}^r \Gamma^{(3)} \right\}$  следует  $\Delta\omega \leq 1$ .

После применения (3) и НИС (7), (7') для  $W$  в (17) получим разложение:

$$\begin{aligned} \frac{1}{3!} \left\{ \binom{n+s-2}{2} L_+ + \frac{(n+s-1)(n-s-3)+2}{4} (K + 'K') + \right. \\ \left. + \frac{3n+s-5}{4} (K' + 'K) + \binom{n-s-4}{2} L_- \right\} = W(1,2|1',2'); \quad (21) \\ W(1,2|1',2') = W(2,1|2',1'). \end{aligned}$$

### Распределения спинов из зарядовых плотностей

Вектор  $\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$  коэффициентов разложения плотностей (16) по плотностям из (14), определяемым зарядовыми плотностями  $R_s^{(2)}$  и  $R_s^{(3)}$  в базе РМП  $L_+$ ,  $K$ ,  $'K$ ,  $K'$ ,  $'K'$  и  $L_-$ , – это решение системы:

$$\mathbf{T} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}, \quad (22)$$

где  $\tilde{\mathbf{b}} = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6)$  – вектор коэффициентов разложения  $R$ ,  $D$  или  $F$  (16) в этом же базисе. Столбцы матрицы (22) для  $\mathbf{T} = \mathbf{T}_5$ , где:

$$\mathbf{T}_5 = \begin{pmatrix} 1 & -1 & \alpha & -\alpha & -\alpha & \alpha \\ \frac{1}{2} & 0 & \beta & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \gamma \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \beta & \gamma & \frac{1}{6} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \gamma & \beta & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{2} & 0 & \gamma & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \beta \\ 1 & -1 & \delta & -\delta & -\delta & \delta \end{pmatrix}; \quad (23)$$

$$\alpha = -\frac{n+s-2}{3} = 2\gamma + \frac{1}{3};$$

$$\beta = -\frac{n-s-3}{6}; \quad \gamma = -\frac{n+s-1}{6};$$

$$\delta = -\frac{n-s-4}{3} = 2\beta + \frac{1}{3}; \quad \det(\mathbf{T}_5) = 0,$$

равны векторам разложения плотностей  $R$ ,  $R'$ ,  $Q$ ,  $'Q$ ,  $Q'$ ,  $'Q'$  в том же базисе. Из-за (14) её ранг равен 5, и система (22), (23) разрешима, если:

$$b_1 - 2b_2 + 2b_3 + 2b_4 - 2b_5 + b_6 = 0. \quad (24)$$

Её решения – это очевидное  $R \equiv R$  и разложение  $D$  по  $R$ ,  $R'$ ,  $Q$ ,  $'Q$ ,  $Q'$  и  $'Q'$ :

$$\begin{aligned} D(1,2|1',2') &= \left( x \cdot \frac{2n-2}{3} - \frac{n-2}{s(s+1)} \right) \cdot R + \\ &+ \left( x \cdot \frac{2n-2}{3} - \frac{1}{s(s+1)} \right) \cdot R' + \\ &+ x \cdot (Q + 'Q + Q') + \left( x - \frac{3}{s(s+1)} \right) \cdot 'Q', \end{aligned} \quad (25)$$

с произвольным  $x = x_3 = x_4 = x_5 = \frac{3}{s(s+1)} + x_6$ , и

$$x_1 = x \cdot \frac{2n-2}{3} - \frac{n-2}{s(s+1)}, \quad x_2 = x \cdot \frac{2n-2}{3} - \frac{1}{s(s+1)}.$$

При  $x = 0$  из (25) следует

$$D = \frac{1}{s(s+1)} \left[ (2-n)R - 'R - 3Sp_3 \{ \hat{P}_{13} R_s^{(3)} \} \right]. \quad (26)$$

Система (22) с матрицей (23) не совместна для спин-спиновой плотности  $F$ .

После замены плотности  $'Q'$  на  $W$  в системе (22) её неособенная матрица  $\mathbf{T} = \mathbf{T}_6$  равна:

$$\det(\mathbf{T}_6) \neq 0;$$

$$\mathbf{T}_6 = \begin{pmatrix} 1 & -1 & \alpha & -\alpha & -\alpha & \frac{\alpha(3\alpha+1)}{4} \\ \frac{1}{2} & 0 & \beta & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{18\beta\gamma+1}{12} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \beta & \gamma & -\frac{2\gamma+\beta}{4} \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \gamma & \beta & -\frac{2\gamma+\beta}{4} \\ \frac{1}{2} & 0 & \gamma & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{18\beta\gamma+1}{12} \\ 1 & -1 & \delta & -\delta & -\delta & \frac{\delta(3\delta+1)}{4} \end{pmatrix}. \quad (27)$$

Значения  $\alpha, \beta, \gamma$  и  $\delta$  те же, что в (23). Последний столбец (27) – вектор разложения  $W$  по РМП-2 функций Фока. Система (22) с  $\mathbf{T}=\mathbf{T}_6$  разрешима с любым  $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}^T = (b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6)$ , её решениями будут разложения по  $R, R', Q, 'Q, Q', W$ .

Так как для шестого столбца матрицы (27) тождество (24) не выполняется, в решении (22) для спин-орбитальной плотности  $D$  отсутствует  $W$ , и оно равно (25) с  $x = \frac{3}{s(s+1)}$ :

$$D = \frac{1}{s(s+1)} [n \cdot R + (2n-3)'R + 3(Q + 'Q + Q')] = \frac{1}{s(s+1)} [n \cdot R_s^{(2)} + (2n-3)'R_s^{(2)}] + \frac{3}{s(s+1)} Sp_3 \left\{ (1 + \hat{P}_{12} + \hat{P}_{13}) \cdot \hat{P}_{23} \cdot R_s^{(3)} \right\}. \quad (28)$$

Вследствие (14) формулы (25), (26) и (28) для плотности  $D$  тождественны. Они эквивалентны формуле (8) из [7] и результату из [6], полученному в спин-орбитальном подходе.

$$\text{С вектором } \tilde{\mathbf{b}} = \frac{1}{2s(2s-1)} \cdot (2, -1, 1, 1, -1, 2),$$

для  $F$  (16), из 2-ой и 5-ой строк системы (22) с  $\mathbf{T}=\mathbf{T}_6$  получим:  $x_3 = 0$ , а из 3-го и 4-го уравнений системы:  $x_4 = x_5$ . Значения  $x_1, x_2, x_4$  и  $x_6$  разные.

$$F = \frac{\binom{2s+3}{2}^{-1}}{s(2s-1)} \left\{ [s(s+1) - 3(n^2 - 2n - 1)] \cdot R + 2[s(s+1) - 3(n-2)^2] \cdot R' - \frac{9}{2}(2n-7)(Q' + 'Q) + 36W \right\}. \quad (29)$$

Согласно (9") плотность (29) должна быть антисимметричной и в штрихованных, и в нештрихованных переменных. В  $-(Q' + 'Q)/2$  из (29) выделим симметричную и антисимметричную части с помощью тождества (14).

$$-\frac{Q' + 'Q}{2} = -\frac{Q' + 'Q}{2} + \frac{0}{4} = \frac{-Q' - 'Q}{2} + \frac{Q + 'Q + Q' + 'Q' + \frac{N-2}{3} \cdot (R + R')}{4} = \hat{A}_{12} \cdot Q \cdot \hat{A}_{12}' + \frac{n-1}{3} \hat{S}_{12} \cdot R \cdot \hat{S}_{12}', \quad (30)$$

где  $(\hat{S}_{12}')^2 = \hat{S}_{12}$  – симметризатор. Тождественные преобразования для  $W$ , с аналогичным (14) равенством, исключают из (29) симметричную составляющую. Иначе, её отсутствие легко проверить, применив в (29) тождество (30) и разложение для  $R$  (16) и для  $W$  (21). В итоге имеем:

$$F = \frac{3}{s(s+1)(2s-1)(2s+3)} \hat{A}_{12} \left\{ \lambda \cdot R_s^{(2)} + \nu \cdot Sp_3 \left( \hat{P}_{23}' R_s^{(3)} \right) + 12 Sp_{3,4} \left( \hat{P}_{13}' \hat{P}_{24}' R_s^{(4)} \right) \right\} \hat{A}_{12}'. \quad (31)$$

В (31)  $\lambda = (n-3)^2 - s(s+1)/3 = x_1 - x_2$ , где  $x_1$  и  $x_2$  – численные коэффициенты при  $R$  и  $R'$  в (29), и  $\nu = 3(2n-7)$ , как в (9) из [7].

ИС, связывающие тензорные пространственные компоненты РМП-1 и РМП-2, даны в [5] на стр. 590 и в формулах (49)-(53) из [3], включающих и переходные по спину плотности.

Формулы, выражающие спиновую, (49) из [3], спин-орбитальную, с формой записи (26), и спин-спиновую, как в (31), плотности через зарядовые плотности, оказались удобными для определения операторов спиновых плотностей в базисе генераторов унитарной группы [7]. Отсутствие там множителей  $1/s$  и  $1/(s(2s-1))$  связано с различиями в определениях плотностей.

### Физический смысл ряда интегральных соотношений

Физический смысл ИС между пространственными тензорными компонентами РМП- $p$  различной частичности часто связан со значением их полной свёртки. Такие свёртки для РМП-2 и РМП-1 следуют непосредственно из [3, 5] и из определений зарядовой и спиновой плотностей через РМП нормированной функции Фока:

$$Sp\{\rho_s\} = N, \quad Sp\{d_s\} = 2, \quad Sp\{R_s^{(2)}\} = n(2n-1). \quad (32)$$

Свёртка выражения (49) из [3] даёт тождество

$$Sp_{1,2}\{R'\} = -n \cdot (n-2) - s \cdot (s+1). \quad (33)$$

Из формул (50) – (53) в [3] следуют

$$-Sp_{1,2}\{D'_s\} = -Sp_{1,2}\{ 'D_s\} = (2n-1) = Sp_{1,2}\{D_s\} = Sp_{1,2}\{ 'D'_s\}, \quad Sp_{1,2}\{F_s\} = 1. \quad (34)$$

И значение  $Sp_{1,2}\{K'\} = n - s$  в [4], и равенство (33) связаны с принадлежностью и функции Фока, и плотности  $R_s$  системы состоянию с определённым полным спином. Применяя формулу Фока-Дирака [17] для оператора  $\hat{S}^2$  и тождество (33) при вычислении его среднего значения, получим подтверждение этого:

$$\begin{aligned} \langle sM | \hat{S}^2 | sM \rangle &= \langle \Phi_s | [-n(n-2) - \sum_{i<j} \hat{P}_{ij}] | \Phi_s \rangle = \\ &= -n(n-2) - Sp_{1,2}\{R'\} = s \cdot (s+1). \end{aligned} \quad (35)$$

Транспозиции в формуле Фока-Дирака действуют на пространственные координаты частиц.

Полученные для  $Q$  (13) и  $W$  (17) разложения (15) и (21) по базису РМП-2 функций Фока дают значения соответствующих свёрток:

$$\begin{aligned} Sp_{1,2}\{Q\} &= \frac{3}{2n-2} Sp_{1,2}\{R'\}, \\ Sp_{1,2}\{Q\} &= Sp_{1,2}\{R_s^{(3)}(2,3,1|1,2,3)\} = \\ &= \frac{n-1}{3} [n \cdot (n-5) + 3s \cdot (s+1)], \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} 6Sp_{1,2}\{W\} &= 6Sp_{1,2}\{R_s^{(4)}(3,4,1,2|1,2,3,4)\} = \\ &= s \cdot (s+1)[2n \cdot (n-5) + s \cdot (s+1) + 6] + \\ &+ n \cdot (n-1) \cdot (n^2 - 5n + 9). \end{aligned} \quad (37)$$

Верные значения свёрток (36), (37), (32) и (33), определяемых зарядовыми плотностями РМП-2 – РМП-4, гарантируют нулевую дисперсию оператора  $\hat{S}^2$ . Действительно, имеем:

$$\begin{aligned} \langle sM | [\hat{S}^2 - s(s+1)]^2 | sM \rangle &= \langle \Phi_s | [-n(n-2) - \\ &- \sum_{i<j} \hat{P}_{ij} - s(s+1)]^2 | \Phi_s \rangle = [n(n-2) + s(s+1)]^2 + \\ &+ 2[n(n-2) + s(s+1)]Sp_{1,2}\{R'\} + \\ &+ 6Sp_{1,2}\{W + Q\} + Sp_{1,2}\{R\} = 0. \end{aligned} \quad (38)$$

Способы построения зарядовых плотностей  $R_s^{(2)}$ ,  $R_s^{(3)}$  и  $R_s^{(4)}$ , отвечающих чистому спиновому состоянию со спином  $s$  для  $2n$ -частичной системы, не влияют на эти результаты.

### Заключение

Теоретико-групповые методы построения шредингеровской функции (см. [12, 14]) преобладали в её исследовании, начиная с работ [16]. Способ «конструирования» шредингеровской функции был отделён от исследования её свойств только после открытия трёх условий Фока [1], гарантирующих её принадлежность к состоянию с определённым полным спином.

В работах [18 – 21], развивающих метод Фока, эти условия применялись для построения упрощённых шредингеровских функций, в частности, с отделённым электроном и для проверки условий Фока в определённой её модели.

В работах [3 – 10] метод координатной функции Фока получил дальнейшее развитие. Спиновая плотность до работы [4] в нём не рассматривалась. К изучению зарядовых и спиновых плотностей РПМ- $p$  одного состояния он применён в [4, 5, 7], к переходным по спину РПМ- $p$  – в [3], к нерутановским состояниям молекул и атомов с учётом пространственных симметрий – в [9, 10], к выводу ОИС между РМП функций Фока различной частичности – в [11] и т. д.. Способ его применения для получения ИС между компонентами РМП различного ранга и частичности предложен здесь.

Все преобразования и вычисления проведены с плотностями, зависящими только от пространственных координат, что подтверждает универсальность методов «квантовой механики без спина» [1 – 13, 15] и развивает их.

Все установленные соотношения точные и не зависят от метода построения функции определённого спинового состояния. Они будут применены и в проверках корректности приближений, и как общий метод изучения спиновых свойств  $N$ -электронных систем с учётом и их пространственных симметрий.

### Список литературы

1. Фок В.А. О волновых функциях многоэлектронных систем // Журн. Эксперим. и теорет. физ. – 1940. – Т. 10, № 9 – 10. – С. 961 – 979.
2. Фок В.А. Начала квантовой механики. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
3. Klimko G.T., Mestechkin M.M., Whyman G.E. Fock coordinate function method for separation of spin variables in transition density matrices // Intern. J. Quantum Chem. – 1980. – V. 17, no 3. – pp. 415 – 428.
4. Вайман Г.Е., Лузанов А.В., Местечкин М.М. Отделение спина и метод координатной волновой функции Фока в проблеме  $N$  – представимости // Теорет. и матем. физ. – 1976. – Т. 28, № 1. – С. 65 – 79.
5. Mestechkin M.M., Klimko G.T. Spin-dependent operators in the spin-free quantum chemistry // Intern. J. Quantum Chem. – 1978. – V. 13, no 5. – pp. 579 – 596.
6. Luzanov A.V., Whyman G.E. Structure and Spin-Purity Conditions for Reduced Density Matrices of Arbitrary Order // Intern. J. Quantum Chem. – 1981. – V. 20, no 6. – pp. 1179 – 1189.
7. Климов Г.Т., Лузанов А.В. Решение проблемы определения спиновых свойств молекул в унитарном формализме квантовой химии // Журн. структурн. химии. – 1987. – Т. 28, № 5. – С. 3 – 9.
8. Климов Г.Т., Местечкин М.М. Суперпозиция конфигураций и метод координатной функции Фока // Многоэлектронная задача в квантовой химии (Сб. научных трудов). – К.: Наук. думка, 1987. – С. 31 – 43.

9. Klimko G.T., Mestechkin M.M. Roothaan's Open Shell Theory from the Viewpoint of an Orthogonal Group // Intern. J. Quantum Chem. – 1990. – V. 37, no 5. – pp. 753 – 771.
  10. Климко Г.Т. О применимости молекулярных методов для расчётов атомов с открытыми оболочками // Журн. физич. химии. – 1996. – Т. 70, № 4. – С. 667 – 674.
  11. Климко Г.Т. Метод координатной функции Фока, производящая функция, интегральные соотношения // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2012, № 1(2) – 2(3). – С. 99 – 106.
  12. Каплан И.Г. Симметрия многоэлектронных систем. – М.: Наука, 1969. – 407 с.
  13. Matsen F.A., Poshusta R.D. Reduced Density Matrices with Application to Physical and Chemical Problems // Queen's Papers on Pure and Applied Mathematics. – 1968, no 11. – pp. 20 – 30.
  14. Вигнер Е. Теория групп и её приложения в квантовомеханической теории атомных спектров. – М.: ИЛ., 1961. – 443 с.
  15. Klimko G.T. Recovery of Bases of Group  $\pi_{2n}$  Representation on its Sub-group  $\pi_{n \times n}$  and Gargiman's Theorem // Искусственный интеллект. – 2012. – no 2. – pp. 69 – 76.
  16. Hund F. Symmetriecharactere der Termen bei Systemen mit gleichen Partikeln in der Quantenmechanic. – Zeitschrift for Physik (Berlin), 1927, v. 43. – pp. 788 – 804.
  17. Дирак П. Принципы квантовой механики. – М.: Наука, 1979. – 480 с.
  18. Друкарёв Г.Ф. К теории столкновения электронов с атомами // Журн. эксперим. и теор. физ., 1956, т. 31, № 2. – С. 288 – 301.
  19. Абаренков И.В. О шредингеровской координатной функции для произвольного состояния многоэлектронного атома // Вестник ЛГУ, 1956, т. 10, № 2. – С. 43 – 54.
  20. Трифонов Е.Д. К вопросу о симметрии многоэлектронной шредингеровской волновой функции // Журн. эксперим. и теор. физ. – 1958, т. 34, № 6. – С. 1643 – 1644.
  21. Зельцер Г.И. Условие циклической симметрии Фока и схемы Юнга // Журн. эксперим. и теор. физ. – 1958, т. 35, № 4. – С. 1058 – 1059.
- References (transliteration)**
1. Fok V.A. O volnovykh funkciyah mnogojelektronnyh sistem [On the wave functions of many-electron systems] // Zhurn. Jekspirim. i teoret. fiz. – 1940. – V. 10, no 9 – 10. – pp. 961 – 979.
  2. Fok V.A. Nachala kvantovoj mehaniki [Principles of Quantum Mechanics] – М.: Nauka, 1976. – 376 p.
  3. Klimko G.T., Mestechkin M.M. and Whyman G.E. Fock coordinate function method for separation of spin variables in transition density matrices // Intern. J. Quantum Chem. – 1980. – V. 17, no 3. – pp. 415 – 428.
  4. Vajman G.E., Luzanov A.V. and Mestechkin M.M. Otdelenie spina i metod koordinatnoj volnovoј funkcion Foka v probleme N – predstavimosti [The Separation of spin and Fock coordinate wave function method in the problem N – representability] // Teoret. i matem. fiz. – 1976. – V. 28, no 1. – pp. 65 – 79.
  5. Mestechkin M.M. and Klimko G.T. Spin-dependent operators in the spin-free quantum chemistry // Intern. J. Quantum Chem. – 1978. – V. 13, no 5. – pp. 579 – 596.
  6. Luzanov A.V. and Whyman G.E. Structure and Spin-Purity Conditions for Reduced Density Matrices of Arbitrary Order // Intern. J. Quantum Chem. – 1981. – V. 20, no 6. – pp. 1179 – 1189.
  7. Klimko G.T. and Luzanov A.V. Reshenie problemy opredelenija spinovyh svojstv molekul v unitarnom formalizme kvantovoj himii [The solution to the problem of determining the spin properties of molecules in the unitary formalism of quantum chemistry] // Zhurn. strukturm. himii. – 1987. – V. 28, no 5. – pp. 3 – 9.
  8. Klimko G.T. and Mestechkin M.M. Superpozicija konfiguracij i metod koordinatnoj funkcion Foka [The superposition of the configurations and Fock coordinate function method] / Mnogo-jelektronnaja zadacha v kvantovoj himii (Sb. nauchnyh trudov). – K.: Nauk. dumka, 1987. – pp. 31 – 43.
  9. Klimko G.T. and Mestechkin M.M. Roothaan's Open Shell Theory from the Viewpoint of an Orthogonal Group. // Intern. J. Quantum Chem. – 1990. – V. 37, no 5. – pp. 753 – 771.
  10. Klimko G.T. O primenimosti molekularnyh metodov dlja raschjotov atomov s otkrytymi obolochkami [On the applicability of molecular methods for the calculations of atoms with open shells] // Zhurn. fizich. himii. – 1996. – V. 70, no 4. – pp. 667 – 674.
  11. Klimko G.T. Metod koordinatnoj funkcion Foka, proizvodjashhaja funkcion, integral'nye sootnoshenija [The Fock coordinate wave function method, the generate function, the integral relations] // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. – 2012, no 1(2) – 2(3). – pp. 99 – 106.
  12. Kaplan I.G. Simmetrija mnogojelektronnyh sistem [Symmetry of many-electron systems] – М.: Nauka, 1969. – 407 p.
  13. Matsen F.A. and Poshusta R.D. Reduced Density Matrices with Application to Physical and Chemical Problems // Queen's Papers on Pure and Applied Mathematics. – 1968, no 11. – pp. 20 – 30.
  14. Vigner E. Teorija grupp i ejo prilozhenija v kvantovomehanicheskoј teorii atomnyh spektrov [Group theory and its application to the



- quantum mechanics of atomic spectra] – М.: Inostr. lit., 1961. – 443 p.
15. Klimko G.T. Recovery of Bases of Group  $\pi_{2n}$  Representation on its Sub-group  $\pi_{n \times n}$  and Garriman's Theorem // *Iskusstvennyj intellekt.* – 2012. – no 2. – pp. 69 – 76.
  16. Hund F. Symmetriecharactere der Termen bei Systemen mit gleichen Partikeln in der Quantenmechanik. – *Zeitschrift for Physik (Berlin)*, 1927, V. 43. – pp. 788 – 804.
  17. Dirak P. Principy kvantovoj mehaniki [The principles of quantum mechanics] – М.: Nauka, 1979. – 480 p.
  18. Drukarjov G.F. K teorii stolknovenija jelektronov s atomami [To the theory of the collision of electrons with atoms] // *Zhurn. Jeksperim. i teor. fiz.*, 1956, V. 31, no 2. – pp. 288 – 301.
  19. Abarenkov I.V. O shredingerovskoj koordinatnoj funkcii dlja proizvol'nogo sostojanija mnogojelektronnogo atoma [On Schrodinger coordinate function for an arbitrary state manyelectron atoms] // *Vestnik LGU*, 1956, V. 10, no 2. – pp. 43 – 54.
  20. Trifonov E.D. K voprosu o simmetrii mnogojelektronnoj shredingerovskoj volnovoju funkcii [On the question of the symmetry of manyelectron Schrodinger wave function] // *Zhurn. jeksperim. i teor. fiz.* – 1958, V. 34, no 6. – pp. 1643 – 1644.
  21. Zel'cer G.I. Uslovie ciklicheskoju simmetrii Foka i shemy Junga [The condition of Fock cyclic symmetry and Jung schemes] *Zhurn. jeksperim. i teor. fiz.* – 1958, V. 35, no 4. – pp. 1058 – 1059.

**Климко Г.Т. «Метод просторової функції Фока, інтегральні співвідношення між спіновими і зарядовими густинами, їхні властивості».** Отримане в попередній роботі загальне інтегральне співвідношення між зредукованими матрицями густини (ЗМГ) різної частковості для функцій Фока, що витикає з методу просторової функції Фока, застосовано для встановлення інтегральних співвідношень між спіновими і зарядовими густинами. Ці співвідношення здобуті рішенням систем рівнянь, які було запропоновано й записано у базису ЗМГ для функцій Фока. Попередній результат використано, щоб часткові інтегралі від зарядових густин з транспозиціями розкласти по базису вказаних ЗМГ. Особливість отриманих рішень пов'язана з неоднозначністю форми їхнього запису, тотожність яких доведена. В проведених перетвореннях використано тільки густини, що залежать від просторових координат. Цей підхід додав до методів квантової механіки без спіну нові засоби дослідження спінових розподілів. Згадано і результати попередніх робіт. Обговорено фізичні наслідки від обчислених значень інтегралів для дво-, трьох- і чотирьохчасткових матриць зарядової густини з транспозиціями, діючими на них з одного боку. Всі отримані результати точні. Тому доречно їх застосовувати і для перевірки припустимості наближень, використаних у побудові матриць зарядової густини, і для тестування відповідності модельної функції чистому спіновому стану.

**Ключові слова:** квантова механіка без спіну, зарядові та спинові густини, інтегральні співвідношення.

**Klimko G.T. “The Fock coordinate wave function method, the integral relations between spin and charge densities, its properties”.** The practical consequence of the Fock coordinate wave function method in form of the general integral relation between Fock functions reduced density matrices (RDM) with different number of particles has been obtained in the preceding article. This result was applied here for determining the integral relationships between spin and charge densities. These relations are obtained by solving systems of equations that have been proposed and ones have been written at Fock functions RDM basis. And also the special cases of the general integral relation of the previous article have been considered. The last cases were used to obtain the expansions on the basis of the RDM of Fock functions for the partial integrals of the charge densities having the transpositions of their coordinates. This is not as straightforward as it may seem, since the multiple character of integral relations are existing. But applied method allows obtaining the different forms of such relations in the strict sense. Moreover the identity of ambiguity forms of writing has been proved. In the conducted transformations used only densities that depend on spatial coordinates of electrons. Therefore this approach added to the methods of spin free quantum mechanics new attack on the problem of spin distributions. The results of preceding articles have been touched. The full integral value for the two-, three- and four-particle charge densities having transpositions, which act on them on one side, were calculated, and its physical sense have been discussed also. The all received results do not depend on the used approached model for calculations of quantum mechanical system state, because ones are exact. Hence all such results can be applied to check of the fidelity of construction both the appropriate charge densities and the approached model wave function, which used.

**Keywords:** spin free quantum mechanics, charge and spin densities, integral relations.

Статья поступила в редакцию 27.06.2014  
Рекомендована к публикации канд. техн. наук В.Н. Беловодским

## Анализ динамики уровня воды в Днестре, Припяти и реках Закарпатья

Бельков Д.В., Едемская Е.Н.

Донецкий национальный технический университет

belkov@telenet.dn.ua

*Бельков Д.В., Едемская Е.Н. «Анализ динамики уровня воды в Днестре, Припяти и реках Закарпатья». При исследовании фрактальности временных рядов используется показатель Харста Н. Он характеризует отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор). Учет фрактальности гидрографа позволит более точно предсказывать уровень воды в реке, что обеспечит получение заданных показателей качества обслуживания гидротехнических сооружений. Целью настоящей работы является исследование структуры гидрографа рек для выявления его характерных особенностей. В работе решаются следующие задачи: оцениваются плотности распределения, автоковариационные функции, энергетические спектры изучаемых временных рядов, определяется степень фрактальности (показатель Харста). Исследования выполнены в среде Matlab. Изучаемые временные ряды представляют собой измерения уровня воды в реках с помощью автоматизированных гидрологических станций. В первом случае (река Днестр) данные получены на контрольном створе в городе Могилев-Подольский, во втором (река Припять) – на створе Любязь. Третий ряд (река Уж) получен на контрольном створе Заречное, четвертый ряд (река Латорица) – на створе в городе Мукачево.*

**Ключевые слова:** динамика уровня воды, плотность распределения, автоковариационные функции, энергетические спектры, показатель Харста

### Введение

В задачу гидрологии входит систематическое изучение гидрологического режима водных объектов для получения временных рядов наблюдений за уровнями, скоростями течений, расходами и стоком воды.

Данные по гидрологическому режиму рек необходимы при организации работы водного транспорта, проектировании гидротехнических сооружений транспортного, энергетического, водозаборного назначения, планирования водопотребления, создания базы для научных исследований. В задачу инженерной гидрометрии входит наблюдение за режимом водных объектов при строительстве и эксплуатации различных инженерных сооружений, влияющих на естественный режим водоемов.

Для изучения гидрометеорологических явлений создана постоянная государственная сеть станций и створов. В состав основных гидрометеорологических работ на реках и водоемах входят наблюдения за уровнем воды и его колебаниями. Данные наблюдений со всех станций и створов сосредотачиваются в Гидрометеоцентре страны. Они обрабатываются, анализируются и служат для решения научно-теоретических и хозяйственных проблем, в частности для прогноза природных явлений, разработки водохозяйственных балансов региона и отдельных объектов, обеспечения

исходными данными при разработке проектов крупных гидротехнических сооружений.

Уровнем воды называется высотное положение поверхности воды в данной точке относительно условной горизонтальной неизменной по высоте плоскости. Наблюдения над уровнем ведут длительное время, поэтому условную плоскость помещают на метр ниже самого низкого возможного уровня, с тем, чтобы отсчеты были всегда положительными. Эта плоскость принимается за ноль отсчетов и называется нулем графика водомерного створа. Уровни воды в реках постоянно изменяются. Наблюдения за уровнями ведут ежедневно. Сроки измерения уровней зависят от режима реки и назначения створа. График хода уровня во времени называется гидрограф [1].

В середине прошлого века британский гидролог Харст показал, что уровень воды в реке может следовать фрактальному броуновскому движению (тренду с шумом). При исследовании фрактальности временных рядов используется показатель Харста Н. Он характеризует отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор).

Учет фрактальности гидрографа позволит более точно предсказывать уровень воды в реке, что обеспечит получение заданных показателей качества обслуживания гидротехнических сооружений [2].

Целью настоящей работы является исследование структуры гидрографа рек для выявления его характерных особенностей. В работе решаются следующие задачи: оцениваются плотности распределения, автоковариационные функции (АКФ), энергетические спектры изучаемых временных рядов, определяется степень фрактальности (показатель Харста). Исследования выполнены в среде Matlab.

### Анализ временных рядов

Изучаемые временные ряды представляют собой измерения уровня воды (см) в реках с помощью автоматизированных гидрологических станций [3]. Временные ряды показаны на рисунках 1 – 4. В первом случае (река Днестр) данные получены в городе Могилев-Подольский, во втором (река Припять) – на створе Любязь. Третий ряд (река Уж) получен на створе Заречное, четвертый ряд (река Латорица) – на створе в городе Мукачево.

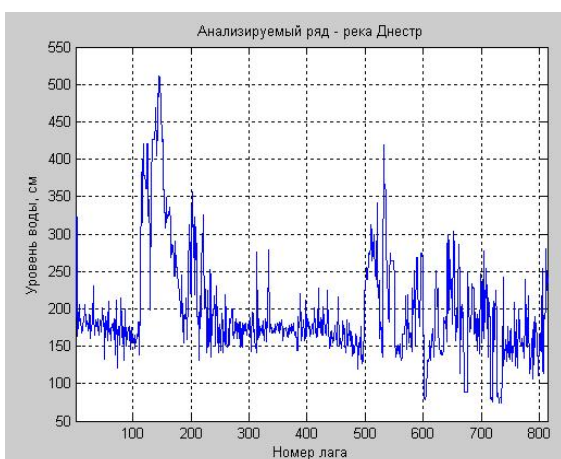


Рисунок 1. – Динамика уровня воды в Днестре

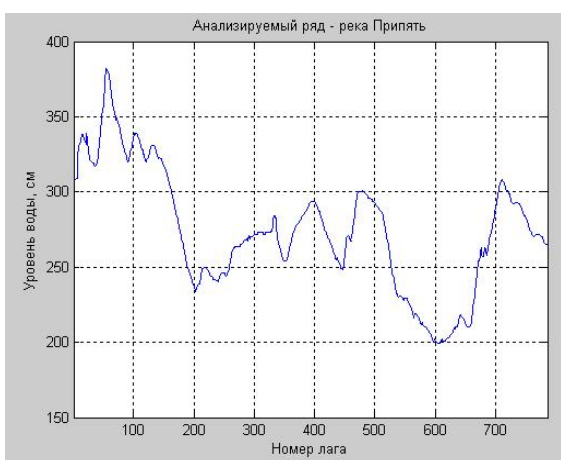


Рисунок 2. – Динамика уровня воды в Припяти

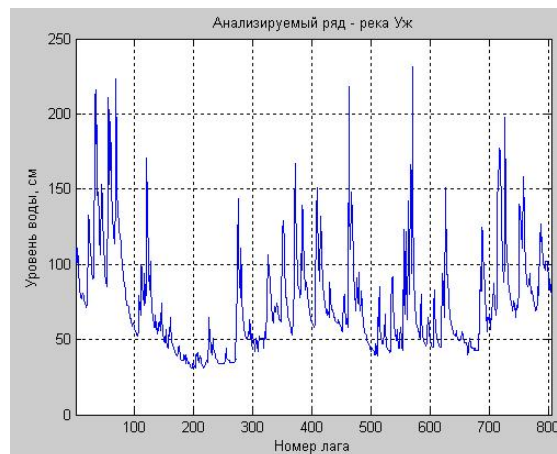


Рисунок 3. – Динамика уровня воды в реке Уж

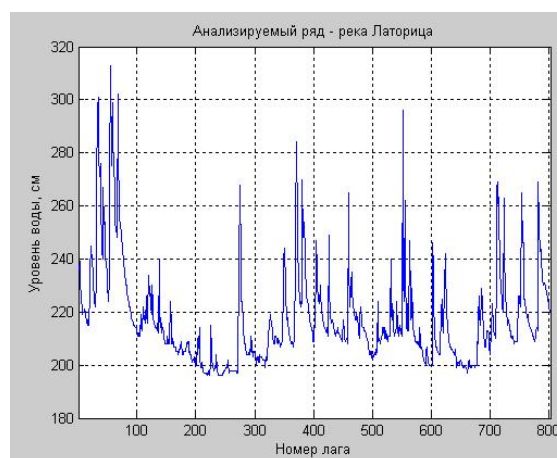


Рисунок 4. – Динамика уровня воды в реке Латорица

В первой серии экспериментов выполнен анализ плотностей распределения. Оценка проводилась на основании гистограмм относительных частот, показанных на рисунках 5 – 8. Визуальный анализ позволяет сделать следующий вывод: изучаемые временные ряды не подчиняются нормальному распределению.

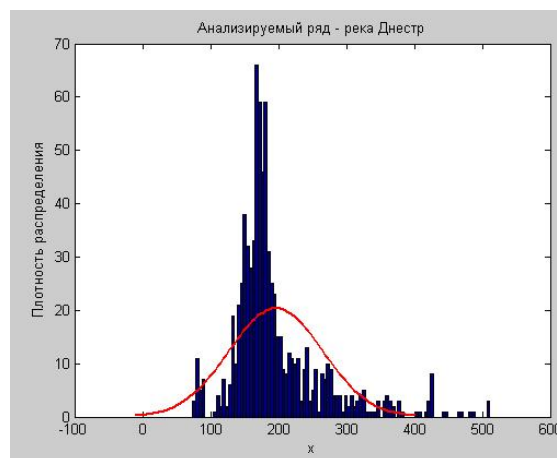


Рисунок 5. – Плотность распределения временного ряда для реки Днестр

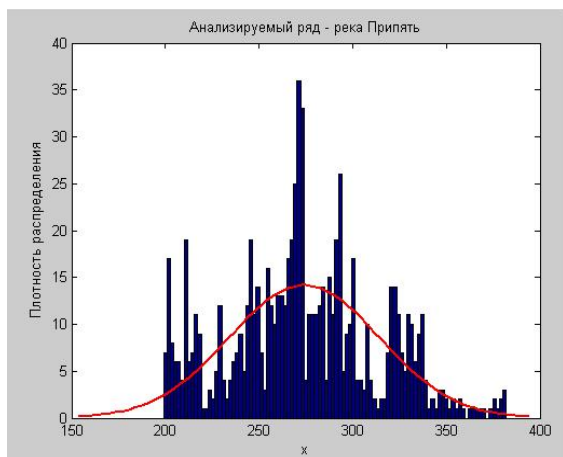


Рисунок 6. – Плотность распределения временного ряда для реки Припять

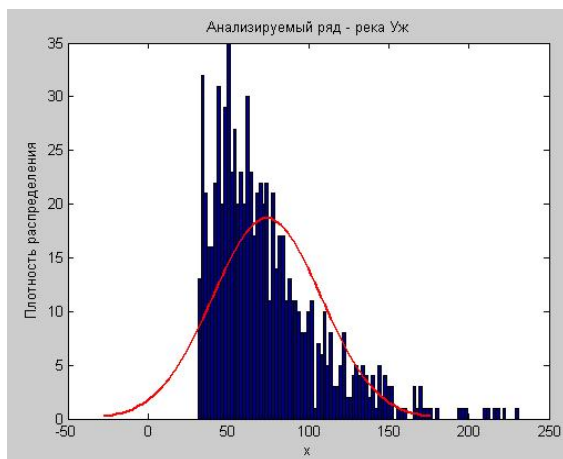


Рисунок 7. – Плотность распределения временного ряда для реки Уж

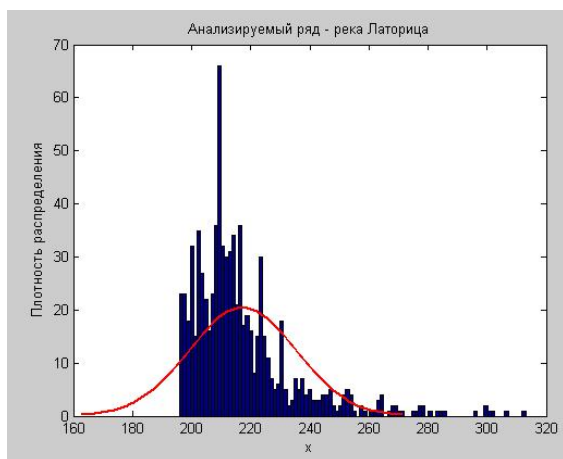


Рисунок 8. – Плотность распределения временного ряда для реки Латорица

Во второй серии экспериментов необходимо определить обладают ли временные ряды медленно убывающей зависимостью или

быстро убывающей зависимостью. Процесс  $X$  обладает медленно убывающей зависимостью (МУЗ) [long-range dependence], если для его автоковариационной функции (АКФ) выполняется условие  $r(k) \sim k^{-\beta}, k \rightarrow \infty$ . Процессы с МУЗ характеризуются автоковариационной функцией, которая убывает по степенному закону при увеличении временной задержки (лага). В отличие от процессов с МУЗ, процессы с быстро убывающей зависимостью (БУЗ) [short-range dependence] обладают экспоненциально спадающей АКФ вида  $r(k) \sim e^{-k}, k \rightarrow \infty$ . АКФ изучаемых временных рядов приведены на рисунках 9 – 12. Они не обращаются в ноль при больших значениях  $k$ , что говорит о медленном убывании АКФ и присутствии МУЗ во всех исследуемых реализациях трафика.

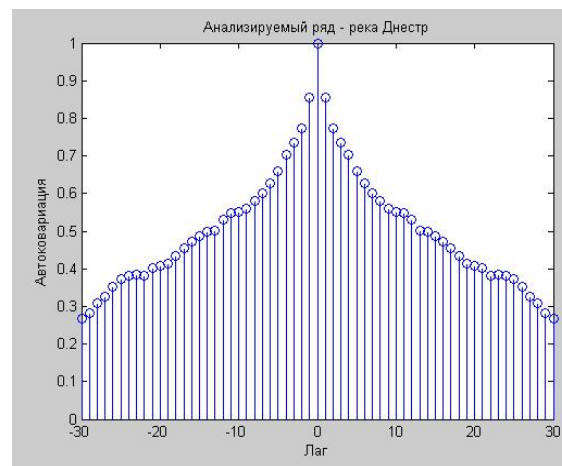


Рисунок 9. – АКФ временного ряда для реки Днестр

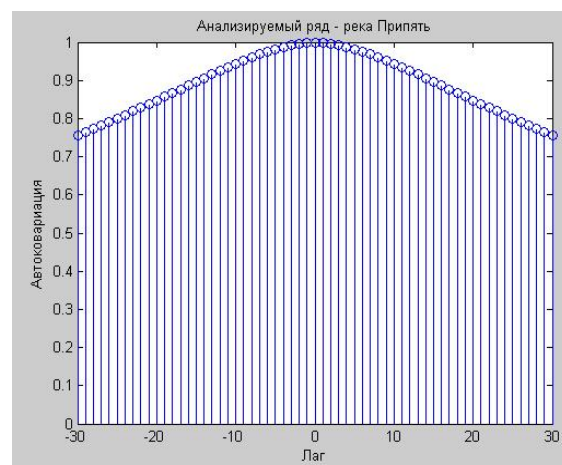


Рисунок 10. – АКФ временного ряда для реки Припять

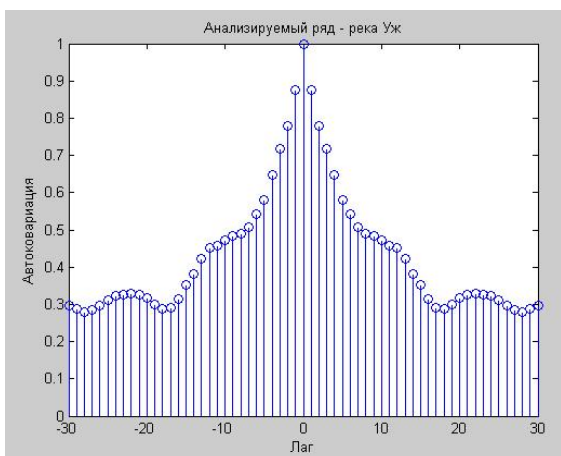


Рисунок 11. – АКФ временного ряда для реки Уж

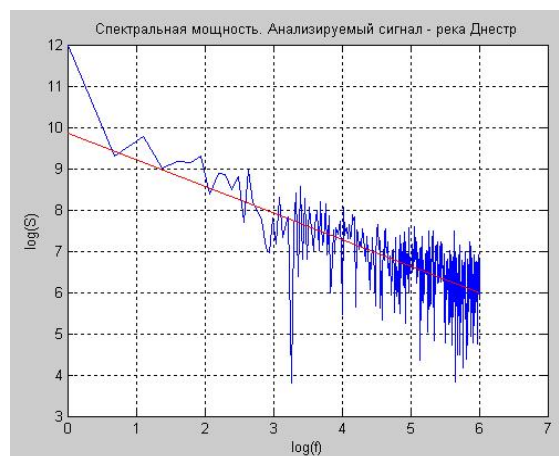


Рисунок 13. – Спектральная плотность временного ряда для реки Днестр

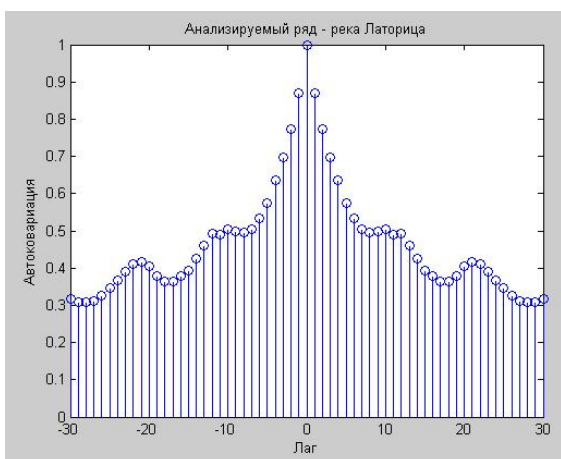


Рисунок 12. – АКФ временного ряда для реки Латорица

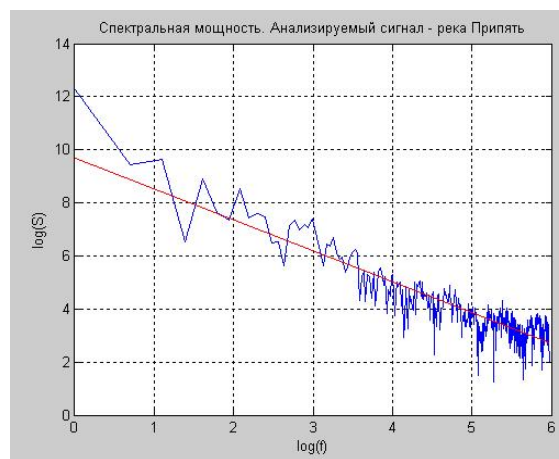


Рисунок 14. – Спектральная плотность временного ряда для реки Припять

В третьей серии экспериментов выполнен расчет энергетических спектров исследуемых временных рядов. Временной ряд с медленно убывающей зависимостью обладает степенным законом поведения спектральной плотности. Процесс  $X$  имеет МУЗ, если для спектральной плотности  $S(f) = \sum_k r(k) \cdot e^{ikf}$  выполняется условие  $S(f) \sim f^{-b}$ , где  $f \rightarrow 0$ ,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $0 < b < 4$ .

Процесс с МУЗ обладает спектральной плотностью с особенностью в нуле: спектральная плотность стремится к бесконечности по мере того, как частота  $f$  стремится к нулю. Энергетические спектры реализаций представлены на рисунках 13 – 16.

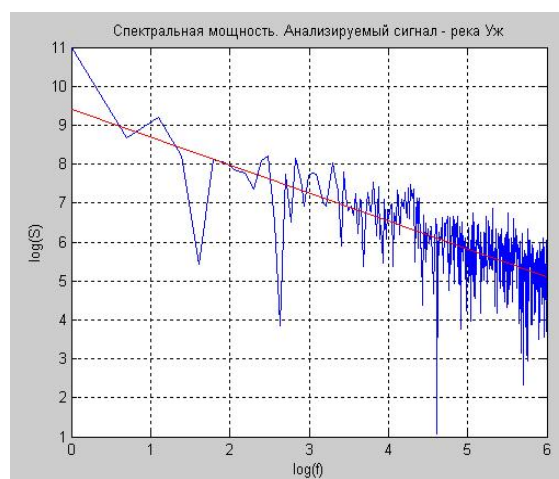


Рисунок 15. – Спектральная плотность временного ряда для реки Уж

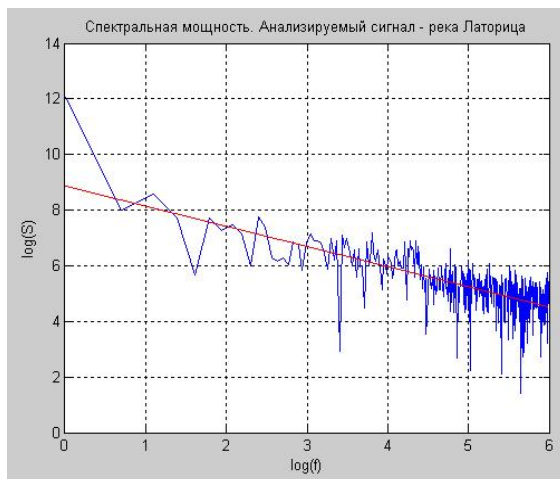


Рисунок 16. – Спектральная плотность временного ряда для реки Латорица

### Исследование показателя Харста

Если считать, что уровни воды в различные моменты времени  $t$  являются последовательностью случайных независимых величин, то суммарный уровень должен быть пропорционален величине  $t^H$ , где  $H = 0,5$ . Британский гидролог Г. Харст показал, что для некоторых рек такая гипотеза неверна. Уровни воды зависимы во времени. Показатель Харста  $H$  является мерой длительности долгосрочной зависимости процесса. Значение  $H = 0,5$  указывает на отсутствие долгосрочной зависимости. Корреляция между событиями отсутствует. Ряд является случайным, а не фрактальным. Чем ближе значение  $H$  к 1, тем выше степень устойчивости долгосрочной зависимости.

При  $0 \leq H < 0,5$  временной ряд является трендоустойчивым (антиперсистентным). Он более изменчив, чем случайный ряд, поскольку состоит из частых реверсов спад-подъем. Высокие значения процесса следуют за низкими, и наоборот. Вероятность того, что на  $i+1$  шаге процесс отклоняется от среднего в противоположном направлении (по отношению к отклонению на  $i$ -ом шаге) настолько велика, насколько параметр  $H$  близок к 0.

При  $0,5 < H \leq 1$  ряд трендоустойчив. Тенденция его изменения может быть спрогнозирована потому, что процесс обладает длительной памятью. Если в течение некоторого времени в прошлом наблюдались положительные приращения процесса, т.е. происходило увеличение, то и впредь в среднем будет происходить увеличение. Вероятность того, что процесс на  $i+1$  шаге отклоняется от среднего в том же направлении, что и на  $i$ -ом шаге настолько велика, насколько параметр  $H$

близок к 1. Персистентные стохастические процессы обнаруживают четко выраженные тенденции изменения при относительно малом «шуме».

В данной работе показатель Харста определяется с помощью процедуры [4]: для фрактальных процессов с увеличением частоты значение спектральной плотности падает по степенному закону с показателем  $b$ , причем  $b = 2H - 1$ . По этой формуле, зная величину  $b$ , можно найти показатель Харста  $H$ . Полученные значения  $H$ , показаны в таблице 1.

Таблица 1. – Показатели Харста

Временной ряд	Показатель Харста
Днестр	0,8218
Припять	0,8941
Уж	0,8598
Латорица	0,8609

Поскольку выполняется условие  $0,5 < H < 1$ , изучаемые ряды являются трендоустойчивыми (персистентными) и обладают долговременной памятью.

Причиной персистентности временных рядов, как указано в работе [2], может быть медленный спад воды после наводнений. Существенную роль играет задержка воды в почвах, грунтах, подземных водоносных горизонтах.

### Выводы

Для гидрологических режимов многих рек характерно, обнаруженное на практике, свойство фрактальности. В связи с этой особенностью динамики уровня воды актуальной является разработка конструктивных методов исследования речных гидрографов.

В данной работе для временных рядов уровня воды в Днестре, Припяти и рек Закарпатья [3] выполнен анализ плотности распределения, автоковариационных функций и энергетических спектров. Найдены значения показателя Харста  $H$ . Получены следующие результаты:

- изучаемые временные ряды не подчиняются нормальному распределению;
- изучаемые временные ряды не обладают экспоненциально спадающей АКФ, свойственной случайным рядам;
- изучаемые временные ряды являются персистентными и обладают долговременной памятью.

Перспективным направлением дальнейших исследований может быть анализ динамики уровня воды рек методами нелинейной динамики.

### Список литературы

1. Мазуркин П.М., Зверев В.И., Толстухин А.И. Статистическая гидрология. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2002. – 274 с.
2. Найденев В.И., Кожевникова И.А. Эффект Харста в геофизике // Природа, 2000, № 1. – С. 3 – 11. – Электр. ресурс. URL: <http://314159.ru/najdenov/najdenov1.pdf> (13.07.14).
3. Український гідрометеорологічний центр. – Электр. ресурс. URL: <http://hydro.meteo.gov.ua/> (28.07.14)
4. Compute the Hurst parameter for a sequence using the power spectral density method. – Электр. ресурс. URL: [http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst\\_psd.m](http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst_psd.m) (12.02.14).

### References (transliteration)

1. Mazurkin P.M., Zverev V.I., Tolstukhin A.I. Statisticheskaja gidrologija [Statistical hydrology]. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2002. – 274 p.
2. Najdenov V.I., Kozhevnikova I.A. Effekt Harsta v geofizike [Hurst effect in geophysics] // Nature, 2000, no 1. – pp. 3 – 11. – Electr. resurs. URL: <http://314159.ru/najdenov/najdenov1.pdf> (13.07.14).
3. Ukraine gidrometeorologic center [Ukrainyky gidrometeorologichny Center]. – Electr. resurs. URL: <http://hydro.meteo.gov.ua/> (28.07.14).
4. Compute the Hurst parameter for a sequence using the power spectral density method. – Electr. resurs. URL: [http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst\\_psd.m](http://www.cs.northwestern.edu/~pdinda/predclass/tools/hurst/hurst_psd.m) (12.02.14).

**Бельков Д.В., Едемська Є.М. “Аналіз динаміки рівня води у Дністрі, Прип’яті та річках Закарпаття”.** При дослідженні фрактальності часових рядів використовується показник Харста  $H$ . Він характеризує відношення сили тренду (детермінований фактор) до рівня шуму (випадковий фактор). Урахування фрактальності гідрографу дозволить точніше передбачати рівень води у річці, що забезпечить отримання потрібних показників якості обслуговування гідротехнічних споруд. Метою даної праці є дослідження структури гідрографу річок для з’ясування їхніх характерних особливостей. У роботі вирішуються наступні задачі: оцінюються щільності розподілу, автоковаріаційні функції (АКФ), енергетичні спектри часових рядів, визначається ступінь фрактальності (показник Харста). Дослідження виконано у середовищі Matlab. Часові ряди, що досліджуються, уявляють собою виміри рівня води у річках за допомогою автоматизованих гідрологічних станцій. У першому випадку (річка Дністер) дані отримано на контрольному створі в місті Могилів-Подільський, у другому (річка Прип’ять) – на створі Любязь. Третій ряд (річка Уж) отриманий на контрольному створі Зарічне, четвертий ряд (річка Латориця) – на створі в місті Мукачеве.

**Ключові слова:** динаміка рівня води, щільність розподілу, автоковаріаційні функції, енергетичні спектри, показник Харста.

**Belkov D.V., Edemskay E.N. “Analysis of dynamics of water level in Dnestr, Prypyat and rivers of Carpathians region”.** In practice the property of fractal for hydrograph of many rivers is discovered. In connection with this feature of dynamics of water level the development of research methods for the structure of river hydrograph is actual.

For fractal research of time series Hurst parameter  $H$  is used. It characterizes attitude of force of trend (determined factor) toward the level of noise (stochastically factor). The account of fractal of hydrograph will allow more exactly predicting a water level in a river, that will provide the receipt of the set indexes of quality of maintenance of hydrotechnical buildings. Research of structure of hydrograph of rivers for the exposure of it characteristic features is the purpose of this work. The following tasks decide in work: the closeness’s of distributing, autocovariance functions, power spectrums of the studied time series, fractal degree (Hurst parameter). Researches are executed in the Matlab environment. The studied time series are measuring of water level in rivers by the automated hydrological stations. In first case (river Dnestr) information is got in the Mogylev-Podol'skyu town, in the second case (the Prypyat river) – on the Lyubyaz post. The third case (river Uge) is got on a post Zarechnoy, fourth case (the Latorytsa river) – on a post in the Mukachevo town.

The following results are got:

- 1) the studied time series do not submit to normal distribution;
- 2) the studied time series do not possess exponentially falling ACF, incident to the stochastic time series;
- 3) the studied time series are persistent and possess of long duration memory.

The analysis of dynamics of water level of rivers can be perspective direction of further researches by the methods of nonlinear dynamics.

**Keywords:** dynamics of water level, closeness’s of distributing, autocovariance functions, power spectrums, Hurst parameter

Статья поступила в редакцию 04.09.2014

Рекомендована к публикации канд. техн. наук Звягинцевой А.В.

## Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems

Zviagintseva A.V.

Donetsk National Technical University

anna\_zv@ukr.net

*Zviagintseva A.V. "Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems". Ranking of natural-anthropogenic systems has been fulfilled on the basis of the evaluation of probabilities of complex events associated with simultaneous monitoring of several ecological indicators. The methodology for the evaluation of ecological development is offered. It is based on an algorithmic determination of the statistical probabilities of events that characterize the state of the studied objects. There is an example of the ranking of European countries according to a range of environmental indicators based on the use of existing databases. Evaluation of environmental development of countries is made according to three criteria: total greenhouse gas emissions per capita, the portions of protected areas and the portions of agricultural land in total land area for each country of Europe. This method is objective and doesn't use expert methods for integrated assessment of the state of objects.*

**Keywords:** *ecological indicators, integrated assessment, multiparameter ranking, the countries of Europe.*

### Introduction

In environmental security speaking about the state of natural-anthropogenic systems usually involve the pollution of natural environments, the observed level of anthropogenic impact on nature and humans, as well as anthropogenic features and species biodiversity which is peculiar to such systems.

The natural-anthropogenic system usually means a functioning set of natural and artificial objects, which are formed as a result of building and operation of the various buildings and technical equipment, and interacting with natural objects. In such systems not only natural, but also anthropogenic and technogenic processes play the great role. At any time a natural-anthropogenic system is in a certain state. The state of the system means a set of indicators which characterize the structure and processes of the functioning of systems at any moment of time. Each object in natural, anthropogenic and biological relation can be characterized by many indicators, which are peculiar only to this type of natural-anthropogenic system. To characterize various aspects of the systems in the world practice there are sets of indices and indicators that are adopted for using by the scientific community [1 – 6].

The main directions and trends of research in this area are connected with the accumulation and creation of more extensive databases of indicators of status and change of natural-anthropogenic systems, the use of new visualization techniques and evaluation of data, the use of methods of data analysis, creation of information systems for the storage, presentation and evaluation of data, development of integrated assessment

techniques, theories of risk assessment and methods of system dynamics.

Comprehensive assessment of the status and ranking of natural-anthropogenic systems are typically very time-consuming procedures because of the presence of a large number of indicators which reflect various aspects of the systems and require its analysis. In such studies three approaches are usually applied. The first one is connected with the creation of comprehensive analytical reports about the state and expected development of the systems and their mutual comparison. The second approach, in order to simplify the analysis procedure, is based on the indicator method when a variety of indices, which integrate different indicators and rank the systems, are introduced for the assessment of the status and changes of systems. The third theoretical direction of a comprehensive evaluation is associated with the risk assessment methodology and the theory of system dynamics.

The analysis of researches in the field of integrated assessment of natural-anthropogenic systems has been made in the famous works [7 – 11]. The authors observe that in this area there are a number of unresolved methodological problems, namely:

- existing methods of integrated assessment are largely incorrect and subjective, first of all because they use the methodology of the expert methods and don't consider the fundamental regularities of natural-anthropogenic systems. All of them practically reduce to multiple lengthy descriptions of various aspects and components of the systems or to the use of indices, which are built on agreement according to the principle of additivity of indicators and with due regard for the



weights of the indicators and comparison of systems based on these indices;

- the set of complex indices and measures that are built with using hypothetical and expert methods are not adapted to the observed data, have weak resistance to changing data, differ by a strong dependence of indicators used for evaluation;

- models for integrated assessment are based on rather partial and narrow hypotheses and cannot serve as a foundation for formally rigorous theories. In the study of natural-anthropogenic systems a number of fundamental hypotheses, that are widely spread in the natural sciences, practically are not used and are not tested on experimental data. In particular, these are various system-wide principles, the equations of state systems, laws of conservation, assumptions and admissions that would lead to a formalized formulation of problems, etc.;

- we must establish that any rigorous methods of integrated assessment, which would have a high validity of the theory, are not worked out nowadays. Many of the methods when applied to a single object of study can give disparate results, that indicates a violation of the basic principle of science about the reproducibility of the results;

- theoretical works in integrated assessment in the field of environmental Sciences often are reduced to hypotheses and generalizations which are cut off from realistic statistical base and systematic review of the available experimental data.

We observe that the most significant scientific problems lie in the theory of complex evaluation. Just in the field of theoretical research, there are several problems that don't allow to turn many scientific ideas into the generally accepted theories. As a consequence, on the background of the enormous number of analytical reports widely known theoretical models of natural-anthropogenic systems and science-based integrated assessments of the state of such systems are very limited. Today the scientific direction of comprehensive assessment of systems is being formed to a greater extent as a descriptive science. According to [12] during the last 30 years there wasn't any publication bringing something new to the basic concepts or fundamental laws of environmental Sciences. According to them the environmental world is on the threshold of the scientific revolution associated with the development of the theory, but the new paradigm has not penetrated the naturalists' minds of yet.

However, recent years area of interdisciplinary researches rapidly develops based on the application of natural science methods in biological and ecological Sciences. In this regard it should be noted phenomenological methods of system dynamics [8], which allowed to contribute to a methodology of modeling complex socio-

economic systems and the construction of models of biological systems.

We think that this direction of modeling systems is the most relevant as it allows to apply phenomenological methods to describe living systems and social nature.

In the field of monitoring of natural and anthropogenic systems large databases have been accumulated that allow you to talk about the establishment of laws and the development of integrated models of systems and objects. This area of research is already enough developed to put the problem of estimating of the state probabilities of the systems based on complex event simultaneous observation of multiple indicators from existing databases which describe various natural and anthropogenic systems.

Thus, the purpose of this article is to show the possibility of creation on the basis of available statistical information of phenomenological models for integrated assessment of natural and anthropogenic systems, and the ranking of their territories according to environmental indicators.

The basis of this article is the latest developments that are associated with the creation of the theory of system dynamics and the application of algorithmic methods of data analysis about the state of the system [8, 15 – 17].

### ***Methodology of Research, Adopted Methods and Used Data***

Models for the environmental assessment can be based on numerical algorithms to determine the statistical probabilities of states of the systems. These probabilities are determined by the amounts of data for complex events of the simultaneous observation of multiple indicators or indicators that characterize the development of countries, regions or territories. These can be some of the most characteristic events, and different combinations of several such events constituting one complex event, for example, a joint event of the observation of the three or four environmental indicators. Such approach allows to take into account the probabilistic patterns of distributing indicative data, which reflect the state of the studied systems.

We illustrate this approach on the example of a methodology for the comparison of European countries according to environmental indicators [6, 16 – 17]. For example we take the following environmental indicators as attribute variables for a comprehensive assessment of countries' development: total emissions of greenhouse gases per capita ( $p_1$ ), tons CO<sub>2</sub>-eq./person.; the part of protected areas in general area of land ( $p_2$ ), %; the part of agricultural area in general area of land ( $p_3$ ), %. To solve this problem we can use databases [16, 17].

On the basis of variables  $p_1, p_2, p_3$  form a three-dimensional space of coordinates  $\{p_1, p_2, p_3\}$ , in which the possible states of the studied system (all European countries) theoretically form a certain area  $Q_3$ , covering all the observed points of the database. In this case, the state of each country in three-dimensional space can be represented by three-dimensional point  $M(p_1, p_2, p_3)$ , and the processes of change of countries' state for a certain period – by multidimensional lines. We assume, as in works [7, 13 – 15], the continuity of the multidimensional area  $Q_3$ . It means that in the state space  $Q_3$  there are an infinite set of states for a general set of objects (countries) and point of states  $M(p_1, p_2, p_3)$  continuously fill this space. We also assume that the experimental points from the database are limited sample of observations from a given aggregate.

Let's consider a complex joint event of the simultaneous observation of these three indicators and determine that the ecological condition of each country in Europe can be evaluated with this particular observed event. We find the statistical probability of this event according to the basis of experimental data which are in the database [16, 17], using algorithms of selection, grouping, and counting frequencies of favorable events [7, 13, 14]. We think that this statistical probability is a probability of state of the studied system. This statistical probability  $w$  is calculated in the whole group of objects (52 European countries). In the process of grouping data the statistical probability of a state is determined by dividing the whole monitored area  $Q_3$  into three-dimensional parallelepipeds based on a specified number (usually equal) intervals of grouping for each variable  $p_k$ , and determine the relative frequencies of events. The relative frequencies are the ratio of the number of experimental points that fall into the specified three-dimensional parallelepipeds, the total number of all observed points. Statistical probability is taken as cumulative relative frequencies of given joint events.

For construction models of quantitative data we also accept the hypothesis about continuity of the probability distribution of the system state in the area  $Q_3$ . In other words, we assume the existence of a scalar field of statistical probability  $w$  in the area  $Q_3$  in the form  $w = w(M)$ , which can be estimated from experimental data.

Let's suppose that in the area  $Q_3$  you can set continuous analytical function  $T(p_1, p_2, p_3)$ , on the basis of which a mathematical model of the probabilistic space will be formed. For a known

function  $T(p_1, p_2, p_3)$  and the values of the variables  $p_1, p_2, p_3$  in the area  $Q_3$  you can construct one more scalar field, which is taken as the simulation environment.

In this variant of the construction of theories about the creation of data models the most important thing is the choice of simulation environment  $T$ . In [7], for example, this environment was described by relationships which belong to homogeneous classes or multiplicative functions relative to the attribute variables. It was established that under these conditions during modeling you can use multidimensional quasi-linear partial differential equations of the first order, which are closely related to Pfaff's equations. For modeling it is assumed that in the space of states  $Q_3$  scalar field of values  $w$  and  $T$  are definitely related with each other. This relationship is represented in the form of phenomenological ratios  $dw = c_1 \cdot dT$ , where  $c_1$  – empirical quantities which are the functions of the development process.

If these hypotheses are true phenomenological descriptions of the data, presented in tabular and temporal arrays of information are closely related with Pfaff's equations of the form [7]:

$$dw = c_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_1} dp_1 + c_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_2} dp_2 + c_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial p_3} dp_3. \quad (1)$$

Introduction of the function  $T(p_1, p_2, p_3)$  is necessary for construction of theoretical models describing the data (states of European countries). The solution of the Pfaff's equation with constant values  $c_k$  depends on the type of the function  $T(p_1, p_2, p_3)$ . As we study the distribution of statistical probability, we can represent this function in the form of geometric probability of the state space  $Q_3$

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}{p_{1,\max} \cdot p_{2,\max} \cdot p_{3,\max}} \quad (2)$$

or as a measure of relative changes

$$T = \frac{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}{p_{10} \cdot p_{20} \cdot p_{30}}, \quad (3)$$

where  $p_{k,\max}$ ,  $p_{k0}$  – the maximum value or some reference values of ecological indices, accordingly.

In the case (3), in particular, for data analysis we should provide a reference point  $M_0(p_{10}, p_{20}, p_{30})$  and the states of all other countries to connect with this point. With considering (3) equation (1) can be presented then in the form:

$$dw = T \cdot ds = T \cdot \left( c_1 \cdot \frac{dp_1}{p_1} + c_2 \cdot \frac{dp_2}{p_2} + c_3 \cdot \frac{dp_3}{p_3} \right). \quad (4)$$

And after integration of this equation the function of the state can be represented in the form

$$s = c_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + c_2 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + c_3 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{30}}\right). \quad (5)$$

This state function is usually called entropy. Thus, according to [7] for this Pfaff's equation (1) in the area  $Q_3$  there is a field of directions, which is generated by the scalar field of statistical probability  $w$  and which is characterized by the vector lines of this field – lines of entropy. In addition for this equation in a multidimensional space  $Q_3$  there is a total potential of the form  $P(p_1, p_2, p_3) = C$ , that is a surface orthogonal to the vector lines of the field [7]:

$$P = \frac{p_1^2 - p_{10}^2}{c_1} + \frac{p_2^2 - p_{20}^2}{c_2} + \frac{p_3^2 - p_{30}^2}{c_3}. \quad (6)$$

Potential  $P$  can be adopted as a generalized criterion for an integrated assessment of the European countries' states in a multidimensional area  $Q_4$  for selected environmental indicators. This value is a function of the state under true conditions for the existence of scalar field of statistical probability  $w$ . The change of the potential depends only on the initial and final state of the country in the process of its ecological change and does not depend on the way of transition between these states.

### **An Example for Ecological Assessment of Natural and Anthropogenic Systems**

The obtained results allow to assess objectively the ecological state of European countries and to construct a system of their ranking according to ecological indicators, which is not based on expert methods.

For the search of nonlinear relationships between the statistical probability of the system state and ecological indicators we will use the method of regression for determination of the relation (5).

Choose reference values of ecological indicators. Thus, total emission of greenhouse gases per capita ( $p_1$ ) in European countries changes in enough wide range from 0,85 to 28,1 ton CO<sub>2</sub>-eq./person. We will take as the base value of this index the average value for European countries  $p_{10} = 8,8$  ton CO<sub>2</sub>-eq./person. Similarly, we take the reference value for the protected areas  $p_{30} = 10,9$  % (the range of variation from 0,5 to 40,1 %) and a part of agricultural land in the total area of the land, –  $p_{40} = 48,8$  % (the range of variation from 3,0 to 77,0 %). According to these data we'll get the control point  $M_0(p_{10}, p_{20}, p_{30})$ .

We connect the probability  $w$  with the values of the variables in the array of experimental data, as the result of which we will have the following regression dependence of  $w$  from the entropy of the system state:

$$\ln(w) = -1,804 + s; \quad (7)$$

$$s = 0,466 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_{10}}\right) + 0,495 \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_{20}}\right) + 1,041 \cdot \ln\left(\frac{p_3}{p_{30}}\right)$$

The correlation coefficient of relationship (7) is 0,91 and the results of data processing are given in Figure 1. The original variables were related to values  $p_{10}, p_{20}, p_{30}$ , which correspond to a selected reference state. The data show that the phenomenological constants  $c_k$  for the studied case are respectively equal to:  $c_1 = 0,466$ ,  $c_2 = 0,495$ ,  $c_3 = 1,041$ . The algorithm for calculating probability of the system state is quite definite, so there is always a dependence of the probability  $w$  from the original variables, which is presented in tabular form. As shown in Figure 1, by converting the coordinates this nonlinear dependence can be represented approximately as linear one.

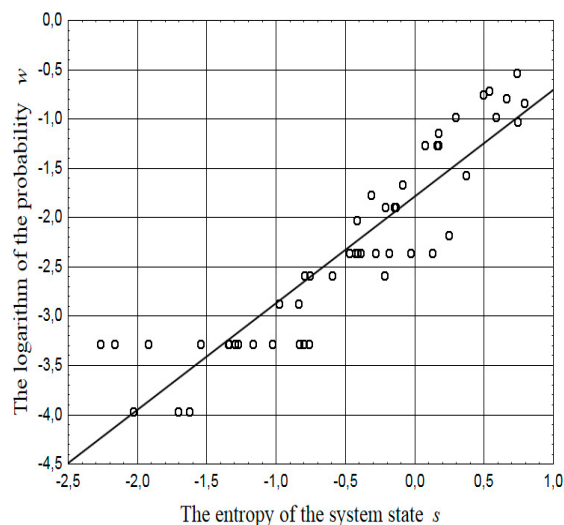


Figure 1. –The dependence of the statistical probability  $w$  from the entropy  $s$  indicators  $p_1, p_2, p_3$

Thus, in the space of observable states of the system  $Q_3$  we can built curvilinear coordinates that specify a certain field of directions that reflects average trends associated with ecological changes throughout the studied class of objects (among European countries).

The corresponding vector lines and the potential of this field  $P$  determine the natural curvilinear coordinates in the area  $Q_3$ , in this case. The point  $M(p_1, p_2, p_3)$ , which characterizes the state of each country in the process of its ecological

change, will take a position in accordance with these coordinates. This allows us to determine objectively the rank of the country in the hierarchical set of other objects on the basis of simultaneous observations of the three ecological indicators  $p_1, p_2, p_3$ . The potential is the most convenient tool for ranking objects.

According to the obtained data, based on the probabilistic evaluation of complex joint events, the potential of the state is identified for each country in Europe. The results of the ranking are given in Table 1.

Table 1. – Potential values for the European countries

European Countries	Potential of the country, $P$	European Countries	Potential of the country, $P$
Albania	-4,01	Liechtenstein	25,15
Andorra	-3,02	Lithuania	-1,41
Armenia	-2,36	Luxembourg	22,64
Austria	12,29	Macedonia	-2,32
Azerbaijan	-2,26	Malta	-2,91
Belarus	-2,11	Republic of Moldova	-2,37
Belgium	1,51	Monaco	6,24
Romania	-1,68	the Netherlands	4,62
Bulgaria	-0,56	Norway	-0,77
Croatia	-2,30	Poland	11,34
Cyprus	-1,52	Portugal	-2,21
Czech Republic	6,09	Bosnia and Herzegovina	-4,25
Serbia and Montenegro	-3,26	the Russian Federation	1,90
Estonia	18,23	San Marino	-5,01
Finland	2,65	Denmark	2,07
France	0,81	Slovakia	8,79
Georgia	-4,01	Slovenia	-1,17
Germany	15,28	Spain	0,04
Greece	0,97	Sweden	-2,01
Hungary	-0,20	Switzerland	10,88
Iceland	-1,24	Tajikistan	0,88
Ireland	4,23	Turkey	-3,22
Italy	1,38	Turkmenistan	-0,99
Kazakhstan	1,60	Ukraine	-0,80
Kyrgyzstan	-3,56	Great Britain	5,89
Latvia	-1,01	Uzbekistan	-2,44

From the data of Table 1 it is obvious that the European countries can be ranked according to several environmental indicators by determining the potential of each country in the space of variables  $\{p_1, p_2, p_3\}$ . A comprehensive assessment is carried out by determining the position of each country in curvilinear coordinates in this space taking into account the average trends in the development of all countries. The estimation is

performed with respect to the average values of ecological indicators in relation to the reference point  $M_0(p_{10}, p_{20}, p_{30})$ . Thus, taking into account probabilistic assessment of joint events associated with simultaneous monitoring of ecological indicators, it is possible to have a mutual comparison of different natural and anthropogenic systems based on state data and environmental development of these systems.

## Conclusions

This method of complex assessment can be applied to various natural and anthropogenic systems, such as countries, regions, cities, natural and industrial complexes and enterprises, as well as to any set of initial ecological indicators. However, we should note that when increasing number of indicators more than 3 or 4 it's necessary to have a sufficiently large amount of data. The number of data is commensurate with the value  $N = d \cdot f^p$ , where  $f$  – the number of intervals, grouping data for one indicator (from 7 to 10);  $d$  – the number of experimental data in the same interval of grouping ( $d = 5 - 7$ );  $p$  – the number of indicators, which form a joint event. The proposed method of evaluation is based on the probabilistic approach and doesn't use expert methods of data analysis.

Thus, a database of ecological indicators in combination with methods of comprehensive evaluation, based on the determination of the probabilities of events, allow you to set the patterns of ecological development of natural-anthropogenic systems.

## Literature

1. Environmental Indicators for Agriculture: Methods and Results. – OECD, Vol. 3, 2001.
2. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies / Prepared by D. Briggs, Occupational and Environmental Health. Geneva: UNEP, USEPA and WHO, 1999. – 119 p.
3. ten Brink, B. (2000) Biodiversity indicators for the OECD Environmental Outlook and Strategy – A feasibility study. Globo Report Series, RIVM Report 402001014, Bilthoven, The Netherlands: RIVM. – 52 p. – Электр. ресурс, URL: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/402001014.pdf> (04.06.14).
4. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. Third Edition. – United Nations, New York, 2007. – 93 p. – Электр. ресурс, URL: <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/guidelines.pdf> (10.06.14).
5. World Development Indicators (issued annually). World Bank. – Электр. ресурс, URL: [www.worldbank.org/](http://www.worldbank.org/) (10.03.14).
6. Экологические показатели и основанные на них оценочные доклады. Восточная Европа, Кавказ и Центральная Азия. Нью-Йорк, Женева: ООН. 2007. – 110 с.
7. Аверин Г.В. Системодинамика: наука о закономерностях процессов изменения и развития систем во времени. – Palmarium Academic Publishing, 2014. – 488 с.
8. Смольянинов В.М., Русинов П.С., Панков Д.Н. Комплексная оценка антропогенного воздействия на природную среду при обосновании природоохранных мероприятий. Воронеж: ВГАУ, 1996. – 126 с.
9. Мусихина Е.А. Методологический аспект технологии комплексной оценки экологической емкости территорий. М.: Академия Естествознания, 2009. – Электр. ресурс, URL: <http://www.monographies.ru/31> (17.05.14).
10. Артюхов В.В., Мартынов А.С. Системная методология оценки устойчивости природно-антропогенных комплексов: теория, алгоритмы, количественные оценки. 2013. – 142 с. // «Общая теория систем» на Practical Science: <http://www.sci.aha.ru>; <http://www.sci.aha.ru/ots/Metodology.pdf> (23.06.14).
11. Буренков Э.К., Гинзбург Л.Н., Грибанова Н.К., Зангиева Т.Д. и др. Комплексная эколого-геохимическая оценка техногенного загрязнения окружающей природной среды // ИМГРЭ, ЗАО «РИФТ», М.: Прима-Пресс, 1997. – 73 с.
12. Розенберг Г.С., Шитиков В.К. О соотношении математики и биологии в экологии // Количественные методы экологии и гидробиологии / Отв. ред. чл.-корр. РАН Г.С. Розенберг. – Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. – С. 228 – 233.
13. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. 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. Донецк: Друк-инфо, 2013. – № 1 (4) – 2(5). – С. 46 – 55.
14. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины // Геотехническая механика. Выпуск 112. Днепрпетровск, 2013. С. 242 – 255.
15. Звягинцева А.В. Методы комплексного анализа информации в оценке уровня развития регионов Украины // Материалы V научно-практической конф. «ДОНБАС-2020: Перспективы развития глазами молодых ученых». Донецк: ДонНТУ, 2010. – С. 573 – 577.
16. Защита окружающей среды Европы – Четвертая оценка. Европейское агентство по окружающей среде, Копенгаген. Дания: Schultz Grafisk, 2007. – 452 с. // [eea.europa.eu](http://eea.europa.eu). (09.04.14).
17. Доклад «Живая планета» / Всемирный фонд дикой природы. Пер. с англ. 2006, 2008,

2010, 2012. <http://www.wwf.ru/resources/publ/book/436>, <http://www.wwf.ru/resources/publ/book/584> (10.11.12).

### **Literature (transliteration)**

1. Environmental Indicators for Agriculture: Methods and Results. – OECD, Vol. 3, 2001.
2. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies / Prepared by D. Briggs, Occupational and Environmental Health. Geneva: UNEP, USEPA and WHO, 1999. – 119 p.
3. ten Brink, B. (2000) Biodiversity indicators for the OECD Environmental Outlook and Strategy – A feasibility study. Globo Report Series, RIVM Report 402001014, Bilthoven, The Netherlands: RIVM. – 52 p. – Elektr. resurs. URL: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/402001014.pdf> (04.06.14).
4. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. Third Edition. – United Nations, New York, 2007. – 93 p. – Elektr. resurs. URL: <http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/guidelines.pdf> (10.06.14).
5. World Development Indicators (issued annually). World Bank. – Elektr. resurs. URL: [www.worldbank.org/](http://www.worldbank.org/) (10.03.14).
6. Ekologicheskie pokazateli i osnovannye na nih ocenochnye doklady. Vostochnaja Evropa, Kavkaz i Central'naja Azija [Environmental Indicators and Indicators-Based Assessment Reports. Eastern Europe, the Caucasus and Central Asia]. N'ju-Jork, Zheneva: OON. 2007. – 110 p.
7. Averin G.V. Sistemodinamika: nauka o zakonomernostjeh processov izmenenija i razvitija sistem vo vremeni [Systemdynamik: the Science About the Regularities of the Processes of Change and Development Systems at Time]. – Palmarium Academic Publishing, 2014. – 488 p.
8. Smol'janinov V.M., Rusinov P.S. and Pankov D.N. Kompleksnaja ocenka antropogennogo vozdejstvija na prirodnuju sredu pri obosnovanii prirodohrannyh meroprijatij [A Comprehensive Assessment of Anthropogenic Impact on the Natural Environment in the Justification of Environmental Protection Measures]. Voronezh: VGU, 1996. – 126 p.
9. Musihina E.A. Metodologicheskij aspekt tehnologii kompleksnoj ocenki jekologicheskoy emkosti territorij [The Methodological Aspect of the Technology of the Integrated Assessment of the Ecological Capacity of the Territory]. M.: Akademija Estestvoznaniya, 2009. – Elektr. resurs, URL: <http://www.monographies.ru/31> (17.05.14).
10. Artjuhov V.V. and Martynov A.S. Sistemnaja metodologija ocenki ustojchivosti prirodno-antropogennyh kompleksov: teorija, algoritmy, kolichestvennye ocenki [A Systematic Methodology for Assessing of the Sustainability of Natural and Anthropogenic Systems: Theory, Algorithms, Quantitative Evaluation]. 2013. – 142 c. // “Obshhaja teorija system” na Practical Science: <http://www.sci.aha.ru>; <http://www.sci.aha.ru/ots/Metodology.pdf> (23.06.14).
11. Burenkov E.K., Ginzburg L.N., Gribanova N.K., Zangieva T.D. i dr. Kompleksnaja jekologo-geohimicheskaja ocenka tehnogennogo zagryaznenija okružhajushhej prirodnoj sredy [Integrated Ecological-Geochemical Assessment of Technogenic Pollution of the Natural Environment] // IMGRJe, ZAO “RIFT”, M.: Prima-Press, 1997. – 73 p.
12. Rozenberg G.S. and Shitikov V.K. O sootnoshenii matematiki i biologii v jekologii [About the Relationship of Mathematics and Biology in Ecology] // Kolichestvennye metody jekologii i gidrobiologii / Otv. red. chl.-korr. RAN G.S Rozenberg. – Tol'jatti: SamNC RAN, 2005. – pp. 228 – 233.
13. Averin G.V. and Zvjaginceva A.V. Strategicheskaja ocenka statusa Ukrainy v sovremennom mire po dannym mezhdunarodnyh organizacij. Chast' 2: Primery analiza i rezul'taty [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. Doneck: Druk-info, 2013. – no 1 (4) – 2(5). – pp. 46 – 55.
14. Averin G.V. and Zvjaginceva A.V. Primenenie metodov intellektual'nogo analiza dannyh pri ocenke razvitija Ukrainy [Application of Data Mining Techniques for the Assessment of Ukraine Development] // Geotehnicheskaja mehanika. Vypusk 112. Dnepropetrovsk, 2013. pp. 242 – 255.
15. Zvjaginceva A.V. Metody kompleksnogo analiza informacii v ocenke urovnja razvitija regionov Ukrainy [Methods for the Integrated Analysis of Information in Assessing the Level of Development of Regions of Ukraine] // Materialy V nauchno- prakticheskoy konf. “DONBAS-2020: Perspektivy razvitija glazami molodyh uchenyh”. Doneck: DonNTU, 2010. – pp. 573 – 577.

16. Zashhita okruzhajushhej sredy Evropy – Chetvertaja ocenka [Protection of European Environment – the Fourth Assessment]. Evropejskoe agentstvo po okruzhajushhej srede, Kopengagen. Danija: Schultz Grafisk, 2007. – 452 p. // eea.europa.eu (09.04.14).
17. Doklad “Zhivaja planeta” [The report “The Living Planet”] / Vsemirnyj fond dikoj prirody. Perevod. s angl. 2006, 2008, 2010, 2012. <http://www.wwf.ru/resources/publ/book/436>, <http://www.wwf.ru/resources/publ/book/584> (10.11.12).

**Звягинцева Г.В.** *«Багатопараметричне ранжування територій на основі аналізу даних про стан природно-антропогенних систем».* Ранжування природно-антропогенних систем виконано на основі оцінки ймовірностей спільних складних подій, пов'язаних з одночасним спостереженням декількох екологічних показників. Запропоновано методіку оцінки екологічного розвитку, яка заснована на алгоритмічному визначенні статистичних ймовірностей подій, що характеризують стан досліджуваних об'єктів. Наведено приклад ранжирування країн Європи за комплексом екологічних показників на основі використання існуючих баз даних. Виконано оцінку екологічного розвитку країн за трьома показниками: сумарними викидами парникових газів на душу населення, часткою територій, що охороняються, та часткою сільськогосподарських земель у загальній площі землі для кожної країни Європи. Дана методика є об'єктивною та не використовує експертні методи при комплексній оцінці стану об'єктів.

**Ключові слова:** екологічні показники, комплексна оцінка, багатопараметричне ранжування, країни Європи.

**Звягинцева А.В.** *«Многopараметрическое ранжирование территорий на основе анализа данных о состоянии природно-антропогенных систем».* Ранжирование природно-антропогенных систем выполнено на основе оценки вероятностей совместных сложных событий, связанных с одновременным наблюдением нескольких экологических показателей. Предложена методика оценки экологического развития, которая основана на алгоритмическом определении статистических вероятностей событий, характеризующих состояния изучаемых объектов. Дан пример ранжирования стран Европы по комплексу экологических показателей на основе использования существующих баз данных. Выполнена оценка экологического развития стран по трем показателям: суммарным выбросам парниковых газов на душу населения, доли охраняемых территорий и доли сельскохозяйственных земель в общей площади земли для каждой страны Европы. Данная методика является объективной и не использует экспертные методы при комплексной оценке состояния объектов.

**Ключевые слова:** экологические показатели, комплексная оценка, многopараметрическое ранжирование, страны Европы.

Статья поступила в редакцию 16.07.2014  
Рекомендована к публикации канд. техн. наук В.Н. Беловодским

## Оценка фрагментации экологической сети Луганской области

Клюев В.Е., Аверин Г.В.

Донецкий национальный технический университет  
vitleo@ukr.net, averin.gennadiy@gmail.com

*Клюев В.Е., Аверин Г.В. «Оценка фрагментации экологической сети Луганской области». Сегодня в Украине отсутствует единый подход к формированию экологической сети. Экологические сети регионов построены по одинаковым принципам, но используют разную методологию. Большинство ученых не рассматривает вопросы фрагментации территорий, которые являются одними из основных критериев выбора площади для включения в систему экологического каркаса. Функционально экосеть будет работать только в том случае, если будут основные фрагменты населены локальными популяциями флоры и фауны. В статье рассмотрена оценка фрагментации экологической сети Луганской области на примере Антрацитовского района Луганской области. Базы данных для анализа сформированы из цифровых и печатных источников. В результате моделирования получена информация о фрагментированных участках территории района. Анализ фрагментов позволил подтвердить основные территории для региональной экологической сети. Полученные данные верифицированы на местности и описаны по функциональности. В результате исследования установлено, что фрагментация высока. Полученная оценка позволяет подтвердить функциональность элементов экосети и создать прогноз по ее расширению.*

**Ключевые слова:** экосети, фрагментация, Луганск, Антрацит, модель экосети.

### Введение

Сегодня в Украине отсутствует единый подход к формированию экологической сети Украины. Если взглянуть на созданные экологические сети регионов Украины, то они построены по одинаковым принципам, но используют свою методологию. Главная номинальная, а не декларируемая цель уже имеющихся экологических сетей – создание региональных сетей в номенклатурных широтных коридорах, созданных согласно общегосударственной программе формирования национальной экологической сети Украины на 2000 – 2015 годы. Но благодаря этой правовой коллизии, мы имеем мощную практическую базу для реализации сетевого природного каркаса. К примеру, в Луганской области экологическая сеть разработана на основании различных ландшафтных методик построения.

Большинство авторов экологической сети не рассматривает вопросы фрагментации территорий, которые являются одними из основных критериев выбора той или иной площади для включения в сетевую систему экологического каркаса и предоставлению статуса охраны. Важно понимать при построении экологической сети, что функционально экосеть будет работать только в том случае, если ее основные фрагменты будут населены локальными популяциями представителей флоры и фауны. В реальности происходит обратное, создаются охраняемые территории, которые имеют статус.

Функционально они не жизнеспособны и поддерживаемы антропогенными факторами.

### Цель и задачи исследования

Цель исследования – оценка фрагментации экологической сети Луганской области на примере Антрацитовского района Луганской области.

Выбор территории обусловлен наличием развитой промышленной инфраструктуры, а также возрождающимся сельским хозяйством интенсивной формы, что характерно для северных районов региона.

Для достижения результата были поставлены следующие задачи:

- изучить картографический материал исследуемой территории;
- оценить фрагментированность территории экологической сети;
- верифицировать созданные схемы экологической сети.

### Картография и исходные данные

Базы данных для анализа сформированы из цифровых и печатных источников. Источниками информации, включенной в базы данных, послужили данные из Программы формирования экологической сети Украины на 2000 – 2015 годы, данные региональных и международных проектов экологической сети региона исследования, кадастра природно-заповедного фонда Луганской области, атласа природно-заповедного фонда Луганщины,



европейского атласа почв, публикаций по распространению животных и растений на территории региона, статистические данные 2-ТП охота, данные атласа Луганщины, картографические и спутниковые данные проектов «Rural development planning: integration of ECONET and agricultural development» и «Enhanced Economic & Legal Tools for Steppe Biodiversity Conservation and Climate Change Adaptation and Mitigation ("Steppe Biodiversity")» [1 – 11].

### **Фрагментация экологической сети Луганской области**

Сегодня под фрагментацией территорий понимают деление исходно больших территорий на относительно небольшие участки благоприятной для организмов среды обитания. Важную роль играют площадные характеристики территориальных фрагментов – чем больше площадь, тем биоемкость территории выше [12, 13]. Последние десятилетия территория Луганской области постоянно находится в процессе фрагментирования, что вызвано социально-экономическими и военными факторами. Природная среда обитания уменьшается в размерах, на маленькие части, уменьшая выживаемость видов флоры и

фауны. Например, аномальные климатические условия или военные действия могут привести к полному исчезновению вида или его миграцию в более благоприятную природную среду, лишению факторов раздражения [14, 15]. Дороги создают барьеры для миграций животных, что приводит к сокращению площади индивидуальных видовых участков и ограничению потока генов между локальными популяциями многих видов [16, 17].

### **Верификация данных и экологическая сеть**

Верификация полученных данных сделана в период с апреля 2013 по апрель 2014 года. Целью работы было изучение местности и проверка картосхем экологической сети на точность. В процессе работы исследованы самые перспективные территории для экосети, которые были определены в результате моделирования. Исследования не проводились для сильнофрагментированных территорий, так как малые созэкологические формы не позволяют включать их в экосеть из-за низкой функциональности. Основные области формируют каналы, ядра буферные зоны, которые вместе образуют экологическую сеть.

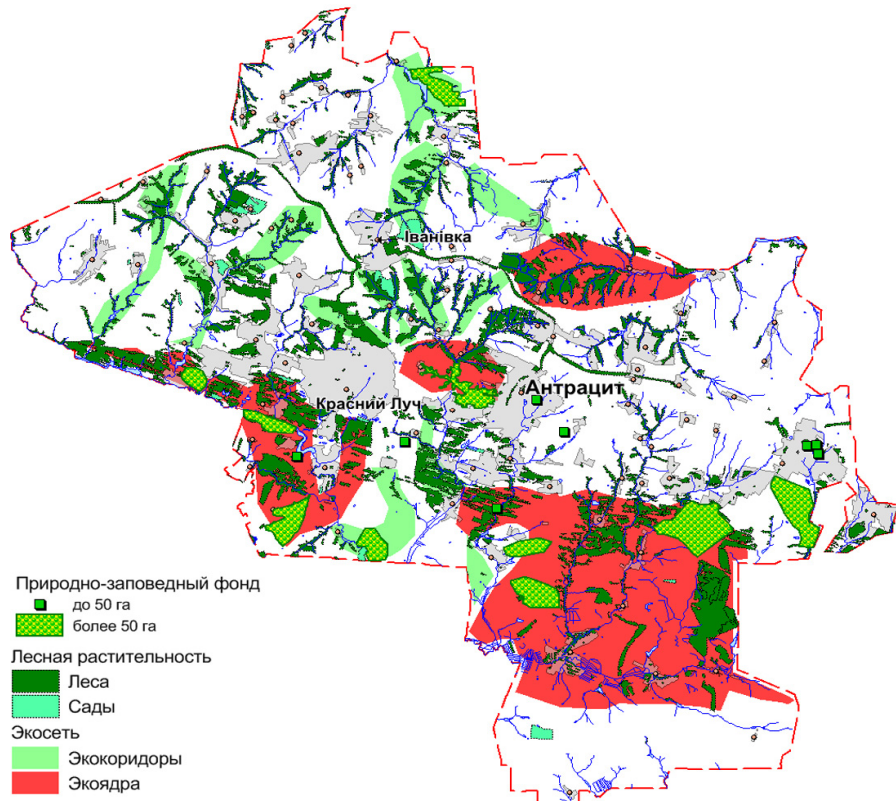


Рисунок 1. – Схема экологической сети Антрацитовского района Луганской области

### **Оценка фрагментации**

Территория экологической сети Антрацитовского района разбита на 2257 фрагментов. Максимальный фрагмент имеет

площадь – 19,38 км<sup>2</sup>. Общая площадь района 1662,19 км<sup>2</sup>, а площадь экологической сети 872,12 км<sup>2</sup>, что составляет 52,47 % от общей площади территории.

Фрагментированные участки оценивались по трем критериям [18 – 22]:

- площадь;
- индекс фрагментарности (отношение длины сторон фрагмента к его площади);
- индекс биоемкости (показатель отношения площади биотопа к минимальной площади, которая позволяет совокупности ключевых видов флоры и фауны сохранять всю свою функциональность).

Полученные данные в результате анализа позволяют ранжировать территориальные фрагменты по площадному показателю и индексу биоемкости (рис. 2 – 4).

Полученная схема оценки фрагментации экологической сети позволяет сформировать представление о местах сохранения природных участков, которые не тронуты антропогенезом территории района, а также подтверждают ранее установленную схему экологической сети Антрацитовского района. Следует отметить, что крупные природные фрагменты совпадают с природно-заповедными объектами, расположенными на территории района.

Во время натурных исследований и верификации данных описаны ключевые участки экологической сети Антрацитовского района.

Антрацитовский участок (ядро) – это территория, которая представляет собой скалистую петрофитную степь, чередующуюся

с распаханными сельскохозяйственными угодьями и загрязненными промышленными участками. Степь деградирована из-за вспахивания в прошлом и имеет тонкий растительный покров. Территория используется как пастбища, но продуктивность мала так как растительность имеет маленькую биомассу. По всей территории огромное количество нелегальных копанок по добыче угля и песчаника. Возраст лесных насаждений составляет около 50 лет. Функционально, на региональном уровне это ядро, но на материковом – это часть коридора между степными петрофитными степями Украины и России.

Краснолучский участок – это территория состоящая из скалистой петрофитной степи с лесами и нелегальными карьерными участками. Состояние степи постоянно ухудшается из-за катастрофических масштабов карьеров добычи угля и песчаника. Территория участка является соединительной между ядрами соседних районов.

Ивановский участок – территория, представленная скалистой петрофитной степью. Степь имеет тонкий растительный покров. Часть территории района покрыта степными лугами. Большая часть степи была вспахана в прошлом, что и привело к ее деградации. Территория формирует часть степного комплекса через границу Лутугинского района.

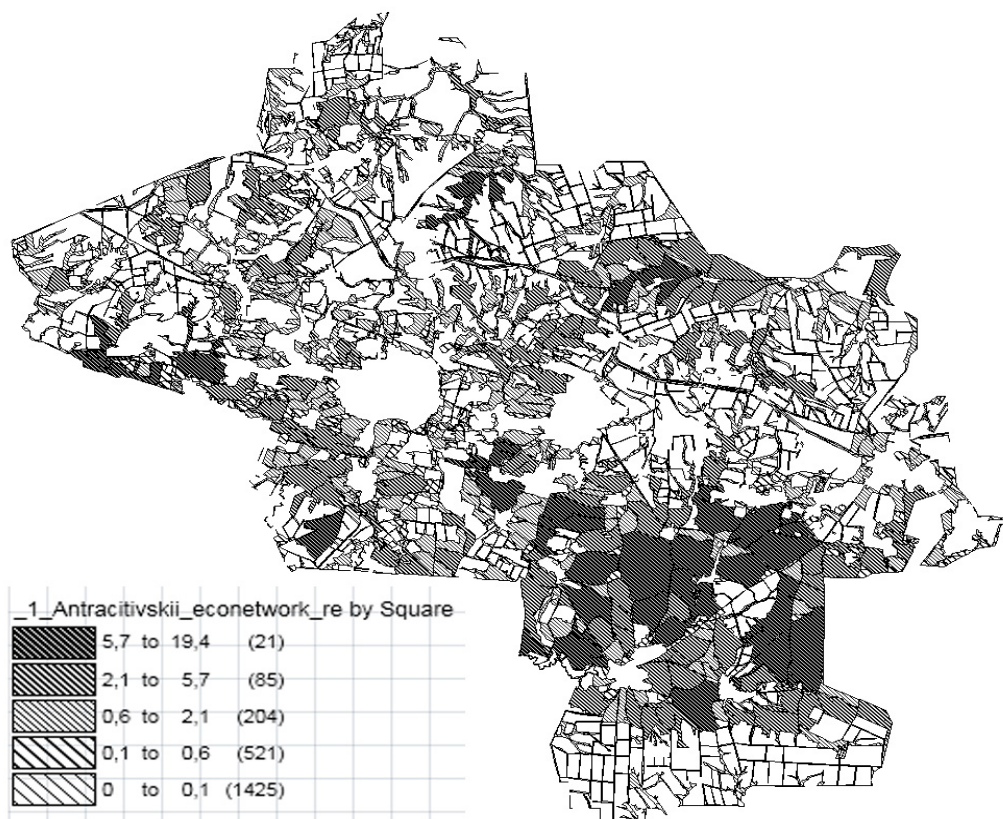


Рисунок 2. – Оценка фрагментов по площади

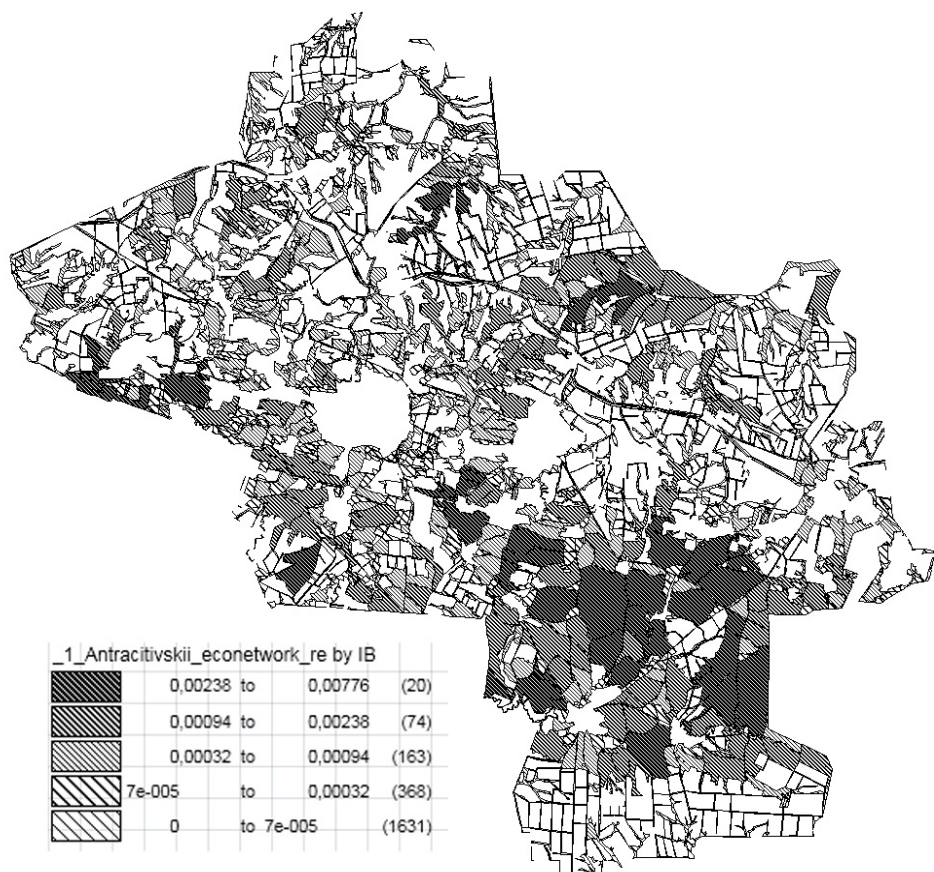


Рисунок 3. – Оценка фрагментов по индексу биомассы

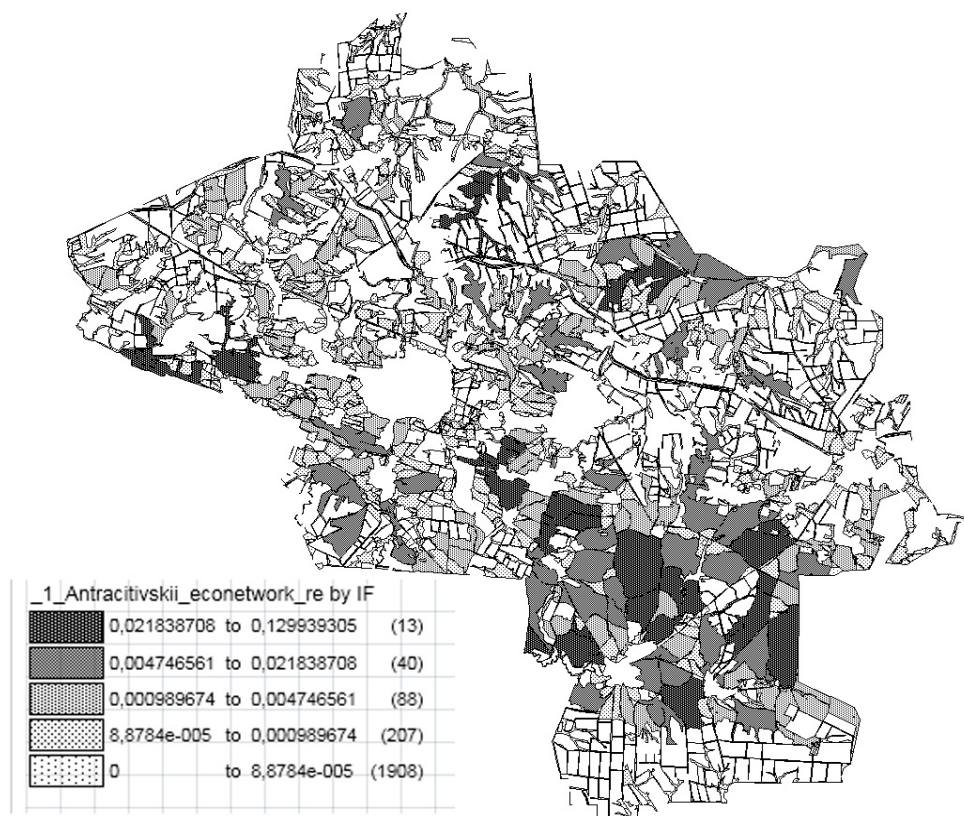


Рисунок 4. – Оценка фрагментов по индексу фрагментарности

**Выводы**

В результате исследования была достигнута цель – проведена оценка фрагментации схемы экосети степных ландшафтов на примере Антрацитовского района Луганской области.

В результате моделирования получена информация о фрагментированных участках территории района. Площадь природных участков – 872,12 км<sup>2</sup>, что составляет 52,47 % от общей площади территории. Количество природных фрагментов на территории велико – 2257 элементов на 1662,19 км<sup>2</sup>.

Проведенный анализ фрагментов позволил подтвердить основные территории для региональной экологической сети.

Полученные данные верифицированы на местности и описаны по функциональности.

В результате исследования установлено, что фрагментация очень высока, но полученная оценка позволяет подтвердить функциональность элементов экологической сети, а также создать прогноз по ее расширению.

**Список литературы**

- Levins R. Extinction / R. Levins // Some mathematical problems in biology / Gerstenhaber M. (ed.); American mathematical society. – Providence, 1970. – pp. 77 – 107.
- Luc Belanger, Marcelle Grenier Agriculture intensification and forests fragmentation in the St. Lawrence valley, Quebec, Canada // Landscape Ecology. 2002. Vol. 17. pp. 495 – 507.
- McGarigal, Kevin; Marks, Barbara J. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure / Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station., 1995. P. 122.
- Wilcox B.A. Conservation Strategy: Effects of fragmentation on extinction / Bruce A. Wilcox, Dennis D. Murphy // American Naturalist. – 1985. – Vol. 125, no. 6. – pp. 879 – 887.
- Агаханянц П.Ф. Экологическая оценка фрагментации территорий при проектировании дорожно-транспортных сетей: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. С.-Пб., 2003. – 20 с.
- Арапов О., Ференц В., Ключев В. Атлас заповідних об'єктів Луганщини. – Луганськ: Елтон-2, 2009. – 96 с.
- Fatha B.D., Scharlerb U.M., Ulanowiczd R.E., Hannone B. Ecological network analysis: network construction // Ecological Modelling – 2007 – Vol. 208 – pp. 49 – 55.
- How to define European ecological networks / van der Sluis T., Chardon P., Uso J.-L., Villacampa Esteve Y., Brebbia C.A. // Advances in ecological sciences: international conference on ecosystems and sustainable development. – Alicante, Spain, 2001. – pp. 119 – 128.
- Forman R. T. T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions / Richard T. T. Forman. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1995. – XX, 632 p.: ill., maps.
- Botequilha Leitao, A., Ahern, J. Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning // Landscape Urban Planning. 2002. Vol. 59. no 2. pp. 65 – 93.
- Calenge C. The package adehabitat for the R software: a tool for the analysis of space and habitat use by animals // Ecological Modelling – 2006 – Vol. 197 – pp. 516 – 519.
- Ключев В.Е. Экологическая сеть степных фрагментированных ландшафтов: модель LARCH для Луганской области / В.Е. Ключев, дер Слуис Т. Ван // Системний аналіз та інформаційні технології у науках про природу та суспільство. Донецьк: Друк-інфо, 2012. №1 (2) – 2 (3). – С. 118 – 127. – Електр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (11.05.14).
- Restoration of degraded steppe lands – opportunities for Lugansk Oblast, Eastern Ukraine / Sluis T. van der, Gosselink J. M. J., Slim P.A., Verhagen J., Keulen H. van. – Wageningen: Alterra, 2009. – 62 p.
- Атлас Луганской области // Николай Песоцкий (официальный сайт). – Луганск, 2004 – 2005. – Электр. ресурс. URL: <http://goo.gl/y50L7s> (11.03.14).
- Fahrig L. Habitat patch connectivity and population survival / Lenore Fahrig and Gray Merriam // Ecology. – Vol. 66, no. 6. – 1985. – pp. 1762 – 1768.
- Загороднюк І., Ключев В., Форощук В. Атлас екомережі Луганщини. Луганськ: Віртуальна реальність, 2014. – 156 с.
- Шеляг-Сосонко Ю.Р. (ред.). Розбудова екомережі України / Програма розвитку ООН. Проект «Екомережі». – К.: Техпринт, 1999. – 127 с.
- Закон України «Про Загальнодержавну програму формування національної екологічної мережі України на 2000 – 2015 роки (Терміни і визначення)» К. 21.09.00 № 1989-III.
- Блакберн А.А., Синельщиков Р.Г. Концептуальные подходы к формированию региональной экологической сети (на примере Донецкой области) // Заповідна справа в Україні. – 2006. – Том 12, вип. 1. – С. 3 – 10.
- Sluis T. (van der), Buijs J., Koopmanschap E. et al. Development of an Econet for Lugansk oblast / Alterra, part of Wageningen U R. – Alterra-report 2153. – 2011. – 82 p.

21. Soil Atlas of Europe // European Soil Bureau Network European Commission – 2005 – 128 p.
22. Арапов О.А., Сова Т.В., Ференц В.Б., Гванченко О.Ю. Природно-заповідний фонд Луганської області. – Луганськ: ВАТ «ЛЮД», 2008. – 168 с.
23. Seiler A. Road mortality in Swedish mammals: results of a drivers' questionnaire / Seiler A., Helldin J-O., Seiler C. // Wildl. Biol. – 2004. – Vol. 10. – pp. 225 – 233.

### References (transliteration)

1. Levins R. Extinction / R. Levins // Some mathematical problems in biology / Gerstenhaber M. (ed.); American mathematical society. – Providence, 1970. – pp. 77 – 107.
2. Luc Belanger, Marcelle Grenier Agriculture intensification and forests fragmentation in the St. Lawrence valley, Quebec, Canada // Landscape Ecology. 2002. Vol. 17. pp. 495 – 507.
3. McGarigal, Kevin; Marks, Barbara J. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure / Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-351. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station., 1995. P. 122.
4. Wilcox B.A. Conservation Strategy: Effects of fragmentation on extinction / Bruce A. Wilcox, Dennis D. Murphy // American Naturalist. – 1985. – Vol. 125, no. 6. – pp. 879 – 887.
5. Agahanjanc, P.F. Jekologicheskaja ocenka fragmentacii territorij pri proektirovanii dorozhno-transportnyh setej: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskix nauk [Environmental assessment fragmentation of the design of road networks: the thesis abstract on competition of a scientific degree of candidate of technical sciences]. S.-Pb., 2003. – 20 p.
6. Арапов О., Ференц В., Ключев В. Atlas zapovidnih ob'ektiv Luganshhini [Atlas reserves Lugansk region]. – Lugansk: Elton-2, 2009. – 96 p.
7. Fatha B.D., Scharlerb U.M., Ulanowicz R.E., Hannone B. Ecological network analysis: network construction // Ecological Modelling – 2007 – Vol. 208 – pp. 49 – 55.
8. How to define European ecological networks / van der Sluis T., Chardon P., Uso J.-L., Villacampa Esteve Y., Brebbia C.A. // Advances in ecological sciences: international conference on ecosystems and sustainable development. – Alicante, Spain, 2001. – pp. 119 – 128.
9. Forman R. T. T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions / Richard T. T. Forman. – Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1995. – XX, 632 p.: ill., maps.
10. Botequilha Leitao, A., Ahern, J. Applying landscape ecological concepts and metrics in

- sustainable landscape planning // Landscape Urban Planning. 2002. Vol. 59. no 2. pp. 65 – 93.
11. Calenge C. The package adehabitat for the R software: a tool for the analysis of space and habitat use by animals // Ecological Modelling – 2006 – Vol. 197 – pp. 516 – 519.
12. Kljuev V.E. Jekologicheskaja set' stepnyh fragmentirovannyh landshaftov: model' LARCH dlja Luganskoj oblasti [Environmental Network steppe fragmented landscapes: LARCH model to the Lugansk region] / V.E. Kljuev, der Sluis T. Van // Sistemnij analiz ta informacijni tehnologii u naukah pro prirodu ta suspil'stvo. 2012. Doneck: Druk-info, 2012. – no 1 (2) – 2 (3). – pp. 118 – 127. – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (11.05.14).
13. Restoration of degraded steppe lands – opportunities for Lugansk Oblast, Eastern Ukraine / Sluis T. van der, Gosselink J. M. J., Slim P. A., Verhagen J., Keulen H. van. – Wageningen: Alterra, 2009. – 62 p.
14. Atlas Luganskoj oblasti // Nikolaj Pesockij (oficial'nyj sajt). – Lugansk, 2004 – 2005. – Elektr. resurs. URL: <http://goo.gl/y50L7s> (11.03.14).
15. Fahrig L. Habitat patch connectivity and population survival / Lenore Fahrig and Gray Merriam // Ecology. – Vol. 66, no. 6. – 1985. – pp. 1762 – 1768.
16. Zagorodnjuk I., Kljuev V., Foroshhuk V. Atlas ekomerezhi Luganshhini [Atlas ecological network of Luhansk region]. Lugansk: Virtual'na real'nist', 2014. – 156 p.
17. Sheljag-Sosonko Ju.R. (red.). Rozbudova ekomerezhi Ukraïni [Strengthening ecological network of Ukraine] / Programa rozvitku OON. Proekt "Ekomerezhi". – K.: Tehprint, 1999. – 127 p.
18. Zakon Ukrainy "Pro Zagal'noderzhavnu programu formuvannja nacional'noi ekologichnoi merezhi Ukraïni na 2000 – 2015 roki (Termini i viznachennja)" [Law of Ukraine "On the State program of national ecological network of Ukraine for 2000 – 2015 (Terms and definitions)"] K. 21.09.00 no. 1989-III.
19. Blakbern A.A., Sinel'shhikov R.G. Konceptual'nye podhody k formirovaniju regional'noj jekologicheskoi seti (na primere Doneckoi oblasti) [Conceptual approaches to the formation of a regional ecological network (for example, Donetsk region)]// Zapovidna sprava v Ukraïni. – 2006. – Tom 12, Issue 1. – pp. 3 – 10.
20. Sluis T. (van der), Buijs J., Koopmanschap E. et al. Development of an Econet for Lugansk oblast / Alterra, part of Wageningen U R. – Alterra-report 2153. – 2011. – 82 p.
21. Soil Atlas of Europe // European Soil Bureau Network European Commission – 2005 – 128 p.

22. Arapov O.A., Sova T.V., Ferenc V.B., Ivanchenko O.J. Prirodno-zapovidnij fond Lugans'koї oblasti [Natural Areas Luhansk region]. – Lugans'k: VAT «LOD», 2008. – 168 p.
23. Seiler A. Road mortality in Swedish mammals: results of a drivers' questionnaire / Seiler A., Helldin J-O., Seiler C. // Wildl. Biol. – 2004. – Vol. 10. – pp. 225 – 233.

**Клюев В.Е., Аверин Г.В. «Оцінка фрагментації екологічної мережі Луганської області».** Сьогодні в Україні відсутній єдиний підхід до формування екологічної мережі. Екологічні мережі регіонів побудовані за однаковими принципами, але використовують різну методологію. Більшість вчених не розглядає питання фрагментації територій, які є одними з основних критеріїв вибору площі для включення в систему екологічного каркасу. Функціонально екомережа буде працювати тільки в тому випадку, якщо будуть основні фрагменти населені локальними популяціями флори і фауни. У статті розглянута оцінка фрагментації екологічної мережі Луганської області на прикладі Антрацитівського району Луганської області. Бази даних для аналізу сформовані з цифрових та друкованих джерел. Джерелами інформації, включеної до бази даних, стали дані з Програми формування екологічної мережі України на 2000 - 2015 роки, дані регіональних та міжнародних проектів зі створення екологічної мережі регіону, кадастру природно-заповідного фонду Луганської області, атласу природно-заповідного фонду Луганщини, європейського атласу ґрунтів, публікації з розповсюдження тварин і рослин на території регіону, статистичні дані 2-ТП полювання, дані атласу Луганщини, а також картографічні та супутникові дані. У результаті моделювання отримана інформація щодо фрагментованих ділянок території району. Аналіз фрагментів дозволив підтвердити основні території для регіональної екологічної мережі. Отримані дані верифіковано на місцевості та описано за функціональністю. У результаті дослідження встановлено, що фрагментація дуже висока. Отримана оцінка дозволяє підтвердити функціональність елементів екологічної мережі, а також створити прогноз щодо її розширення.

**Ключові слова:** екологічні мережі, фрагментація, Луганськ, Антрацит, модель екологічної мережі

**Kliuiev V.E., Averin G.V. "Evaluation the fragmentation of ecological network of Luhansk region".** Today in Ukraine there is no single approach to the formation of the ecological network. Ecological network in the region are built on the same principles, but using a different methodology. Most scientists do not consider issues of fragmentation of territories, which are among the main criteria for selecting areas for inclusion in the ecological framework. Functional ecological network will only work if local populations of flora and fauna inhabit the main fragments. In reality, the opposite occurs. It creates areas that have state protection. Functionally, they are not viable and propped up by human factors. The article describes the evaluation of the fragmentation of the ecological network of Luhansk region as an example Antracit region Lugansk region. A database for analysis and formed of digital printing sources. The sources of information included in the database was compiled Program of Ecological Network of Ukraine for 2000 – 2015, data of regional and international projects for the creation of the ecological network of the region, the inventory of natural reserve fund of Lugansk region, atlas of natural reserve fund of Lugansk region, the European Atlas of Soil and publications dissemination of plants and animals in the region, Luhansk atlas, cartographic and satellite data. Because of simulation obtained information about the fragmented areas in the district. Natural Area – 872.12 km<sup>2</sup>, accounting for 52,47% of the total land area. The amount of natural fragments in the Grand – 2257 items to 1662.19 km<sup>2</sup>. Analysis of fragments permitted confirmation of the main areas for regional ecological network. The data obtained verified in the field and are described in terms of functionality. The study found that fragmentation is very high. This estimate makes it possible to confirm the functional elements of the ecological network, and create a forecast for its expansion.

**Keywords:** ecological networks, fragmentation, Lugansk, Anthracite, Model Ecological Network.

Статья поступила в редакцию 15.08.2014  
Рекомендована к публикации канд. техн. наук А.В. Звягинцевой

## The analysis of municipal object's energy efficiency with methods of system dynamics

Kharitonov A.J.

Donetsk national technical university

donetskant@yandex.ru

*Kharytonov A.J. "The analysis of municipal object's energy efficiency with methods of system dynamics" In the article there is a question of analysis municipal object's energy efficiency with methods of system dynamics. Presently there is not universal methodology, allowing analyzing a consumption persons, directly responsible for an energy-savings – economists and managers. Data are analyzed by method of multiplicative function. Multiplicative dependence of building's thermal consumption is got on a standard. Adequacy of this model is tested by comparing to "energy-temperature" diagram.*

**Keywords:** *methods of system dynamics, multiplicative dependence, building's thermal consumption, "energy-temperature" diagrams*

### Introduction

Nowadays, in the world there is a process of mass accumulation of information. This contributes to increased use of information technologies and increasing storage capacity. By these reasons at present there is a need to process the data and search for patterns in the data arrays. If we consider the energy and resources consumption data on a variety of city facilities, the usual methods of analysis do not provide high quality results due to the fact that these data are stochastic and do not always lend themselves to the standard deterministic methods of analysis of energy consumption.

Scientific methods of analysis of energy and resource consumption of buildings are quite monotonous and in the bulk are based on engineering thermophysical calculations [1]. Such calculations are carried out by specialists of a corresponding profile: thermal engineering, hydraulics, electrical engineering, etc. The most qualitative data analysis is possible when the energy certificate of the building is present and the energy audit is held, but the latter is quite expensive procedure. It should also be mentioned that energy certificates for the vast majority of buildings, businesses and public-sector organizations are absent.

Currently, practically there is no simple and universal technique that allows to analyze the energy consumption of a variety of objects by persons directly responsible for energy saving – business executives, managers and system owners. Therefore, the development of new approaches in the analysis of energy and resource consumption is an actual problem.

### Benchmark data

By a presidential decree no. 679/2008 of 28 July 2008 there were approved and enacted the resolution "About the decision of the National Security and Defense Council from 30 May 2008 "About the implementation of the state policy on ensuring the efficient fuel and energy resources use". It reflects the conceptual directions of the state policy in providing of efficient use of resources and energy. One of the most important element of national energy saving policy is the creation of information systems of monitoring. In the Donetsk National Technical University in 2010, an information system for energy efficiency monitoring of municipal facilities in Donetsk was developed. It includes:

- automated workstation of data entry operator, installed at each facility;
- data transmission system to the server (the Internet access at the facility is optional);
- acquisition and data processing software installed on a server in the city council;
- constantly brimming databases of different indicators of buildings of all objects in the sphere of education.

Now the following data are collected [2]:

- administrative and engineering information for the 250 buildings of 160 schools in Donetsk;
- about 46,000 observational data of outdoor and indoor temperature of buildings during the 2008 – 2010 heating period;
- about 90,000 indications of daily consumption of electric energy;
- about 70,000 indications of daily consumption of hot or cold water;

– about 47,000 indications of thermal energy daily consumption (each indication includes coolant temperature regime, the total number and hourly mean of coolant, the total amount of heat and thermal power consumed in the period 2008 – 2010).

### Statement of the problem

The aim of the work is the analysis of the energy consumption database using system dynamics methods. The study was also conducted to compare the results with the calculations, which were carried out by existing methods, based on the equations of heat balance of buildings or the resource consumption balance [5].

### Data Analysis Methods

System dynamics methods allow us to study the behavior of complex systems by leveraging the capabilities of computer modeling. In contrast to the usual system dynamics modeling technologies, these methods do not require the construction of a mathematical model of the studied object in the traditional form as well as allowing us to develop computer models of the system elements and their relations.

While considering energy efficiency of buildings in the context of system dynamics, the problem is reduced to the recognition of similar images on a set of indicators for a number of consumption objects. It is necessary to choose a reference object and implement ranking of all relational objects to the current object.

An important element in this case is the selection of function class for modeling. Most often multiplicative functions are used.

A function  $F(a)$  is called multiplicative if it satisfies the following two conditions: this function is defined for all positive integers and is not equal to zero at least at one  $a$  [3]. Moreover, for any positive  $a_1$  and  $a_2$  we have:

$$F(a_1, a_2) = F(a_1) \times F(a_2). \quad (1)$$

It is needed to construct a multiplicative function of buildings parameters that varies little over time. The values a distinct change of which has the stochastic nature must not be included in the parameter list.

Such parameters may be those characteristics of buildings, which are controlled by energy and resource consumption, they are:

- year of construction, number of floors, height (m);
- construction area (sq. m), the total volume (cubic meters);
- total area (sq. m), heat output (Gcal / year);
- heated volume (cubic meters), heated area (sq. m);
- passport temperature of supply and return of the coolant at the object (°C);
- the number of people present in the building during working and non-working hours.

The attribute options for construction of a multiplicative function must be reliable, independent and directly affect on the consumption of the selected resource.

Subsequent analysis of the data and the estimation of the parameters that affect the energy consumption showed that for the analysis of heat consumption must be considered the year of construction of the building, heated area and the number of people in the building. This allows us to form a following multiplicative function:

$$T = a \frac{x_1}{x_{1_0}} \cdot \frac{x_2}{x_{2_0}} \cdot \frac{x_3}{x_{3_0}}, \quad (2)$$

where  $a$  – constant,  $x_1, x_2, x_3$  – parameters of studied objects,  $x_{i_0}$  – parameters of reference object.

To calculate the multiplicative function reference object – a building, characterized by some typical characteristics – is needed. As a reference, the worst or the best building in terms of thermal energy consumption, the building with the smallest heated area or building, selected according to other criteria, could be taken.

For the analysis, as the reference object school no. 9 of Voroshilov district has been chosen. It is characterized by a high specific consumption of thermal energy. Thus, the multiplicative function for analysis of resource and energy consumption will be as follows.

$$T = 100\% \cdot \frac{H_x}{H_c} \cdot \frac{A_x}{A_c} \cdot \frac{Y_x}{Y_c}, \quad (3)$$

where  $H_x, A_x, Y_x$  – number of people in the building, area of heated space and year of the construction of test buildings,  $H_c, A_c, Y_c$  – the corresponding parameters of the reference object. The calculated values of the multiplicative function (3) for the selected objects of one of the Donetsk' districts are given in Table 1.



Table 1. – Calculated values of multiplicative functions for the objects of Voroshilov district

Name of the school	Total amount of people	The total area of the buildings, sq. m	Average year of buildings	Volume, cu. m	T Index, calculated relatively to the school no. 9
School no.3	483	3176	1936	15355	22,12
Gymnasium no.15	299	2323,4	1952	7434,9	10,10
Gymnasium no.18	449	4449,3	1938	15573	28,84
Educational complex KORN	280	2295	1990	6770,3	9,52
Educational complex no.5	960	8907	1964	32265	125,13
School no.9	876	7749	1977	30996	100
Educational complex	738	3690,7	1950	40280	39,57
Lyceum no.22	526	3069	1939	46649	23,32
Educational complex no.1	1194	1132	1965	30959	19,79
School no.13	535	3500	1961	57275	27,36
DSPMS no.17	850	1652,9	1964	24123	20,56
School no.2	475	4169	1939	60040	28,61
School no.14	687	4049,4	1955	60741	40,52

Table 2. – The ratio of annual consumption of the selected objects to the annual consumption of the reference object for the different base years

Name	Actual consumption of thermal energy, Gcal for year				The normalized thermal energy consumption in relation to the school no. 9			
	2010	2009	2008	2007	2010	2009	2008	2007
School no.3	200,36	264,19	295,73	348,80	0,28	0,37	0,42	0,49
Gymnasium no.15	265,07	328,26	417,13	488,88	0,37	0,46	0,59	0,69
Gymnasium no.18	305,97	328,07	350,17	372,27	0,43	0,46	0,49	0,52
Educational complex KORN	356,08	329,00	372,71	369,23	0,50	0,46	0,52	0,52
Educational complex no.5	1135,18	810,98	1064,1	1317,3	1,60	1,14	1,50	1,85
School no.9	808,00	710,81	884,99	1059,7	1,14	1,00	1,25	1,49
Educational complex	930,00	930,00	1095,1	1150,2	1,31	1,31	1,54	1,62
Lyceum no.22	422,45	481,92	498,51	374,11	0,59	0,68	0,70	0,53
Educational complex no.1	431,91	628,60	656,10	796,39	0,61	0,88	0,92	1,12
School no.13	397,66	347,43	398,25	381,70	0,56	0,49	0,56	0,54
DSPMS no.17	562,46	479,04	480,14	383,76	0,79	0,67	0,68	0,54
School no.2	374,49	409,30	481,94	355,39	0,53	0,58	0,68	0,50
School no.14	453,26	425,13	490,32	376,43	0,64	0,60	0,69	0,53
School no.19	457,77	490,00	610,00	248,36	0,64	0,69	0,86	0,35
School no.56	474,22	330,00	200,00	60,52	0,67	0,46	0,28	0,09
School no.117	279,10	390,00	450,00	543,93	0,39	0,55	0,63	0,77

### Energy consumption assessment

For the analysis the change dynamics of the parameters during yearly intervals have been considered.

For each year and for each resource the empirical measure  $t$  was built (Table 2). This measure determines the ratio of annual consumption to the annual consumption of the reference volume of the same resource for the selected base year:

$$t = \frac{C_x}{C_c}, \quad (4)$$

where  $C_x$  – resource consumption of the analyzed object in a given year;  $C_c$  – resource consumption for the base year of the reference object.

The dependence of the parameter  $t$  from  $T$  is called normalized consumption. In Figure 1 the

scatter diagrams of the normalized consumption for different years are shown.

The obtained model of thermal energy from the indicators of objects (persons, area, and year of construction) allows to determine the state of the

object based on actual consumption of thermal energy. However, the problem of the optimal choice of attribute indicators and reference objects for the described analysis still remains.

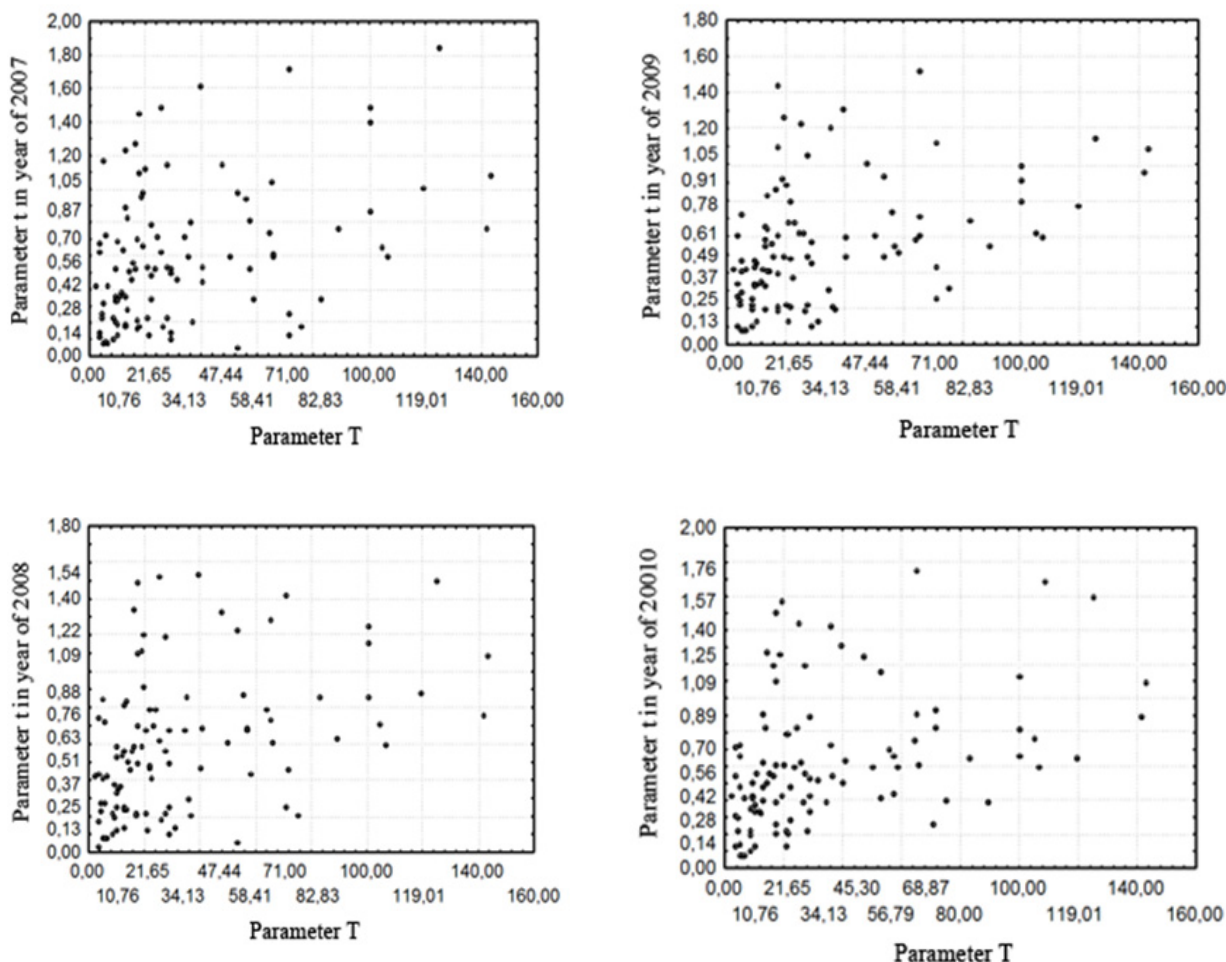


Figure 1. – The distribution of the normalized thermal energy consumption in relation to the consumption of thermal energy of the school no. 9

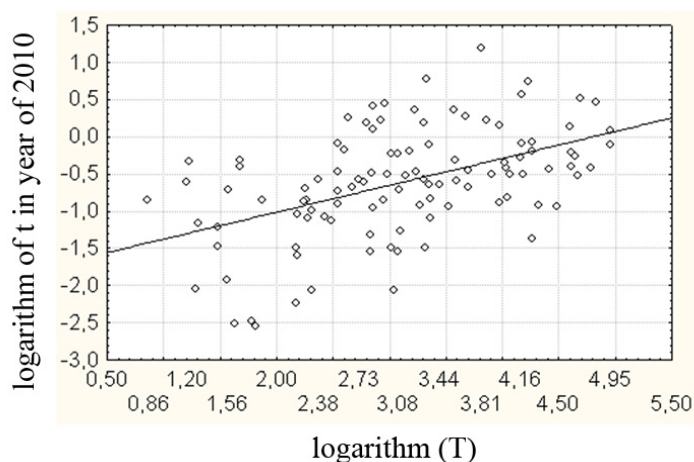


Figure 2. – Distribution of the natural logarithm of the normalized indicators of consumption in relation to the natural logarithm of the heat consumption of the school no.9, 2010

In the analysis of energy consumption it is necessary to check the linearity the dependencies (Figure 2). Due to this it is vital to construct a linear function of following type:

$$\ln(t) = A + B \cdot \ln(T), \quad (5)$$

where  $A, B$  are coefficients.

Figure 2 shows that the logarithmic relation is expressed by a linear relationship.

The analysis of distribution graphs of the indicators of the thermal energy normalized consumption relative to the thermal energy consumption of the reference building for each year (Figure 1) shows that the obtained coefficients are stable over time. The dynamics of changes ratios is similar to the dynamics of changes in average temperature of the environment and indicates the independence of unstable factors in the maintenance of internal heat.

### **Function test of the model**

To verify the functionality of the model we have to apply objects of public sector facilities to the analysis of its heat demand. For the analysis of these objects the method of charting the "energy-temperature" actual heat load and the required heat load, calculated according to the heat balance equations based on real data is used. More details about this technique can be found in [1]. For the analysis we selected objects that have sufficient volume of data for analysis. As it is seen from the graphs above, the difference between necessary and the average daily consumption of thermal loads shows the deviation in the supply of heat energy to various buildings in the upward or downward. According to data provided by the enterprises supplying heat, heat is supplied to all schools according to the temperature graphs, so this indicator is taken to determine the heat loss of buildings. Let's define the place of the schools above in the distribution of the normalized heat, leaving out only the objects in the distribution of Kiev and Voroshilov district, and select individually the objects with positive and negative difference between needed and consumed daily average thermal loads.

The resulting distribution shows the relationship between the normalized distribution of heat and the calculation of the data by the method of charting "energy-temperature", which proves the efficiency of the model.

### **Conclusions**

According to the results of the automated information system of monitoring of energy efficiency of municipal facilities in Donetsk database with indexes of consumption of energy and resources was accumulated. The data were analyzed using the theory of multiplicative functions. The dependence of the heat consumption of the buildings from the reference object is obtained. The adequacy of this model is tested by comparing it with the method of diagrams "energy-temperature".

The resulting multiplicative relationship can replace the database of indexes of energy and resource consumption by the base of models with the values of consumption and the parameters of the equation of the linear dependence of the natural logarithms of multiplicative function indicators. It allows to analyze energy and resource consumption, using only the data of consumption and omit static data and object parameters.

### **References**

1. Козин В.Е., Левина Т.А. и др. Теплоснабжение: Уч. пос. – М.: Вц. шк., 1980. – 408 с.
2. Лукьянченко А.А., Гришин Г.А., Сафьянц С.М. и др. Комплексная программа «Энергосбережение в г. Донецке на 2010 – 2014 годы» – Донецк: ЧП «Вик», 2010 – 188 с.
3. Оразов М. О некоторых задачах теории мультипликативных функций / М. Оразов // Молодой ученый. – М.: Наука, – 2011. – 165 с.
4. Аверин Г.В., Звягинцева А.В., Аверин Е.Г. Методы системной динамики при анализе социально-экономического развития стран и регионов // САИТ-2011. Выпуск 1 – Донецк: ДонНТУ, 2011. – С. 108 – 122.
5. Карпушев С.А., Харитонов А.Ю. Автоматизированная система мониторинга энергоэффективности муниципальных объектов г. Донецка / А.Ю. Харитонов // Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист / Інститут навколишнього середовища НАН та МНС України. Київ-Кременчук – 2010. – № 1. – С. 55 – 67.
6. Харитонов А.Ю. Анализ энерго- и ресурсопотребления муниципальных объектов с помощью методов системной динамики / Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. № 1 (2)-2 (3)2012. Донецк: ДонНТУ, 2012. – С. 107 – 112.

**References (transliteration)**

1. Kozin V.E., Levina T.A. i dr. Teplosnabzhenie [Heat supply]: Uch. pos. – M.: Vs. shk., 1980. – 408 p.
2. Luk'janchenko A.A., Grishin G.A., Saf'janc S.M. i dr. Kompleksnaja programma Jenergosberezenie v g. Donecke na 2010 – 2014 gg." [The comprehensive program "Energy saving in Donetsk for 2010 – 2014 years"] – Doneck: ChP "Vik", 2010 – 188 p.
3. Orazov M. O nekotoryh zadachah teorii mul'tiplikativnyh funkcij [Some problems in the theory of multiplicative functions] / M. Orazov // Molodoj uchenyj. – M.: Nauka, – 2011. – 165 p.
4. Averin G.V., Zvjaginceva A.V., Averin E.G. Metody sistemnoj dinamiki pri analize social'no-jekonomicheskogo razvitija stran i regionov [Methods of system dynamics in the analysis of socio-economic development of countries and regions] // SAIT-2011. Issue 1 – Donec'k: DonNTU, 2011. – pp. 108 – 122.
5. Karpushev S.A., Kharitonov A.Ju. Avtomatizirovannaja sistema monitoringa jenergojeffektivnosti municipal'nyh ob'ektov g. Donecka [An automated system for monitoring the energy efficiency of municipal facilities in Donetsk] / A.Ju. Haritonov // Tehnogenno-ekologichna bezpeka ta civil'nij zahist / Institut navkolishn'ogo seredovishha NAN ta MNS Ukraïni. Kiïv-Kremenčuk – 2010. – no.1. – pp. 55 – 67.
6. Haritonov A.Ju. (st. Prepodavatel'- dolja 1) Analiz jenergo- i resursopotreblenija municipal'nyh ob'ektov s pomoshh'ju metodov sistemnoj dinamiki [Analysis of energy and resource use of municipal facilities using system dynamics methods] / Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. no. 1 (2)-2 (3)'2012. Doneck: DonNTU, 2012. – pp. 107 – 112.

*Харитонов А.Ю. «Анализ энергоэффективности муниципальных объектов с помощью методов системной динамики». В статье рассматривается вопрос энергоэффективности анализа муниципальных объектов с помощью методов системной динамики. В настоящее время не существует универсальной методологии, позволяющей анализировать потребление электроэнергии лицами, непосредственно ответственными за энергосбережение – экономистами и менеджерами. Данные анализируются методом мультипликативной функции. Мультипликативная зависимость теплового потребления здания была взята за стандарт. Адекватность этой модели проверена путем сравнения с диаграммой «энергия-температура».*

**Ключевые слова:** *методы системной динамики, мультипликативная зависимость, тепловое потребление здания, диаграмма «энергия-температура»*

*Харитонов А.Ю. «Аналіз енергоефективності муніципальних об'єктів за допомогою методів системної динаміки». У статті розглядається питання енергоефективності аналізу муніципальних об'єктів за допомогою методів системної динаміки. Нині не існує універсальної методології, яка дозволяла би аналізувати споживання електроенергії особами, які безпосередньо є відповідальними за енергозбереження – економістами та менеджерами. Дані аналізуються методом мультипликативної функції. Мультипликативна залежність теплового споживання будівлі була взята за стандарт. Адекватність цієї моделі перевірена шляхом порівняння з діаграмою «енергія-температура».*

**Ключові слова:** *методи системної динаміки, мультипликативна залежність, теплове споживання будівлі, діаграма «енергія-температура»*

*Статья поступила в редакцию 10.07.2014  
Рекомендована к публикации канд. техн. наук В.Н. Беловодским*

## ***Раздел 3***

### ***Автоматизированные системы и информационные технологии***

## Концептуальная модель предметной области инструментальной оболочки для автоматизации построения интеллектуальных САПР

Григорьев А.В.

Донецкий национальный технический университет  
grigorie@r5.dgtu.donetsk.ua

*Григорьев А.В. «Концептуальная модель предметной области инструментальной оболочки для автоматизации построения интеллектуальных САПР». Рассматривается задача построения комплекса методов и средств для автоматизации построения интеллектуальных САПР. С этой целью описываются: построение ряда параметров проблемной адаптации специализированной инструментальной оболочки для автоматизации построения интеллектуальных САПР на специфику предметной области; исследование ряда существующих инструментов построения требуемой оболочки с целью сформировать комплекс необходимых методов; собственно построение комплекса новых методов и средств; освещение практической эффективности работы. Предлагаемая модель позволяет повысить эффективность процессов проектирования технических изделий в любых предметных областях.*

**Ключевые слова:** инструментальная оболочка, концептуальная модель, предметная область, интеллектуальные САПР.

### Введение

В последнее время произошел переход от использования общих инструментальных оболочек, предназначенных для формирования экспертных систем универсального характера типа CLIPS, к инструментальным оболочкам, ориентированным на различные предметные области. Для примера можно назвать характерные инструментальные оболочки: G2, ориентированная на решение задач реального времени в АСУ; СПРУТ-технология, ориентированная на решение вычислительных задач в САПР и т.д. Комплекс методов и средств построения инструментальной оболочки, обеспечивающий ее адаптацию на заданную предметную область, носит название концептуальной модели предметной области.

Следует отметить, что спецификой САПР как экспертной системы является то, что комплекс моделей объекта проектирования составляет ярко выраженную систему взаимосвязанных уровней знаний о действительности [1]. С другой стороны, имеет место ярко выраженная тенденция упростить процесс построения экспертной системы средствами инструментальных оболочек, сделав его доступным экспертам в предметной области, в данном случае – проектировщикам.

Все существующие инструментальные оболочки, в том числе и ориентированные на построение САПР, полноценно не обеспечивают ни учета специфики САПР, ни тенденций упрощения процесса построения экспертной системы. Таким образом, можно сказать, что в настоящее время не достаточно внимания уделяется созданию инструментальных средств построения собственно

инструментальных оболочек, общих для различных предметных областей и ориентированных на экспертов в предметных областях, что делает данную задачу актуальной. Среди концепций построения инструментальных оболочек для создания экспертной системы специфике САПР как интеллектуальной системы в наибольшей степени соответствует концепция *мета-оболочек* [2]. Мета-оболочка предполагает явное построение концептуальной модели предметной области, заданной как система взаимосвязанных уровней знаний о действительности – метазнаний. Недостатками концепции мета-оболочек с точки зрения САПР являются: невозможность учета особенностей уровней и форм представления моделей в САПР, отсутствие средств и методов представления модели пространства и времени и т.д. [3].

С другой стороны, имеется успешный авторский опыт построения подобной инструментальной оболочки в области САПР (инструментальная оболочка *ИнтерНаМ*, ориентированная на вычислительную технику, но использующая только известные методики проектирования).

Предлагается путь построения специализированной мета-оболочки для создания интеллектуальных САПР – мета-эвристической оболочки, но построенной с позиций подходов, реализованных в *ИнтерНаМ*.

### Постановка задачи работы

Необходимо создать комплексную концептуальную модель предметной области для инструментальных оболочек, предназначенную для автоматизации построения интеллектуальных

САПР типичного проектирования в условиях заданной проблемной области.

Цель работы – построение ряда параметров проблемной адаптации инструментальных оболочек на специфику предметной области; исследование ряда существующих инструментов построения требуемой инструментальной оболочки с целью сформировать комплекс необходимых методов для построения концептуальной модели предметной области, требуемой инструментальной оболочки на основе комплекса выбранных методов; освещение ее практической эффективности.

### 1. Семантика задачи адаптации инструментальной оболочки для автоматизации построения интеллектуальных САПР

Рассмотрим смысл, т.е. семантику задачи адаптации инструментальной оболочки на предметную область САПР. Тут можно выделить как классические задачи и методы адаптации, так и современные. Рассмотрим их детальнее.

#### 1.1. Классические методы адаптации САПР

В теории построения САПР имеют место задачи [1]:

- адаптации готового САПР под условия эксплуатации;

- адаптации новых САПР под условия предметной области, т.е. *задача предметной адаптации*.

Средства адаптации готового САПР под условия эксплуатации:

- адаптация *формы ведения диалога САПР*;

- адаптация *структуры и состава БД САПР* и т.д.

*Классические средства адаптации на условия создания САПР:*

1) **Процедурная модель САПР**, задающая САПР как систему типичных абстрактных уровней, объединяющих ряд типичных проектных процедур, определенных над типичными же моделями объекта проектирования:  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ .

Проектные процедуры выполняются над множеством моделей:  $M = \{M_1, M_2, \dots, M_{n+1}\}$ , с учётом множества критериев, ограничений и условий проектирования  $K: K = \{K_1, K_2, \dots, K_n\}$ .

В процессе проектирования каждая процедура  $P_j$  задается как тройка:  $P_j = \{O_j, K_j, M_j\}$ , где  $O_j$  – комплекс проектных операций, входящих в процедуру. Каждая процедура  $P_j$  переводит модель  $M_j$  в следующее состояние:  $P_j: M_j \rightarrow M_{j+1}$  (рис. 1).

Различают процедуры *изобретения, синтеза, моделирования и документирования*.

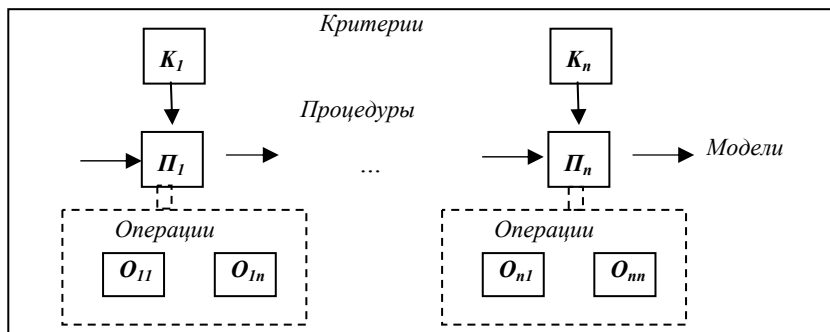


Рисунок 1. – Процедурная модель САПР

По типу можно выделить САПР поискового конструирования, ориентированные на поиск новых решений, и САПР типичного проектирования, предлагающие только известные решения, соответствующие данным условиям проектирования.

Все существующие модели могут быть отнесены к одному из уровней абстрагирования (к области применения различных математических теорий). Различают следующие уровни абстрагирования: структурные модели; логические модели; системные модели; количественных свойств и отношений.

Уровни отличаются: количеством типов отношений; моделью пространства и времени; полнотой отражения фазовых переменных и координат взаимодействия. Адаптация состоит в построении САПР требуемой структуры, отвечающей особенностям заданной предметной области.

2) **Метод аналогий**, позволяющий сводить предметные области друг к другу, а значит – унифицировать методы построения САПР в любой предметной области или же – свести их к одной из предметных областей (более развитой).

Между моделями любых предметных областей существует взаимное отображение, т.е. модель определённой предметной области на определенном уровне абстрагирования можно свести к моделям другой предметной области.

Такой предметной областью чаще всего является электротехника (табл. 1).

Названные методы адаптации необходимо использовать в любых новых подходах.

Таблица 1. – Фазовые переменные в различных предметных областях

Системы, тип движения	Фазовые переменные	
	типа I	типа U
Электрические	Ток I	Напряжение U
Механически поступательное	Сила F	Скорость V
Механически упругое	Сила F	Деформация
Механически вращательное	Вращательный момент M	Угловая скорость $\Omega$
Гидро	Поток (расход) q	Давление P
Пневмо	Поток (расход) q	Давление P
Тепло	Тепло поток q	Температура T

## 1.2. Современные задачи и методы адаптации САПР.

### 1.2.1. Специфика современного этапа развития САПР [3]:

1) переход САПР в область полностью интеллектуальных или гибридных, т.е. включающих наряду с обычными методами построения и исследования объектов и интеллектуальные;

2) количественная динамика развития предметных областей в САПР:

- увеличение числа новых технологий построения объектов (предметных областей);
- сокращение времени жизненных циклов технологий проектирования;

3) содержательная динамика развития предметных областей в САПР:

- усложнение объектов проектирования, т.е. использование иерархических, многоуровневых, регулярных, как структурно, так и функционально, моделей объектов проектирования;

- неравномерность развития предметных областей, технологий проектирования в них и соответствующих САПР;

- унификация средств и методов проектирования различных предметных областей на основе подходов, общих для различных предметных областей (принцип аналогий, *Simulink-MatLab*).

### 1.2.2. Тенденции развития искусственного интеллекта, влияющие на процесс интеллектуализации САПР:

1) появление новых средств и методов в искусственном интеллекте, имеющих широкие возможности адаптации;

2) удаление инженера по знаниям из процесса создания интеллектуальных САПР в пользу эксперта в предметной области, т.е. проектировщика, для чего необходимо учитывать уровень его квалификации в инженерии знаний;

3) появление технологий, позволяющих формализовать знания об объектах проектирования в данной предметной области (CASE-технологии, онтологии и т.д.);

4) появление инструментальных оболочек, предназначенных для создания экспертных систем в заданной предметной области.

Краткий список инструментальных оболочек:

- универсальные: Prolog, Clips, Jess, Exsys Corvid, Nexpert Object, AT ...;

- ориентированные на САПР: СПРУТ, ...;

- ориентированные на АСУТП: G2, ... и т.д.

Данные тенденции также необходимо учесть в параметрах адаптации.

## 2. Общая структура множества параметров адаптации специализированной инструментальной оболочки

Исходя из рассмотренной семантики задачи адаптации, сформируем множество параметров адаптации специализированной инструментальной оболочки. Данные параметры можно разделить на две группы [5]:

1) параметры инструментальной оболочки, связанные с ориентацией на САПР;

2) параметры инструментальной оболочки, функционирующей как обычная информационная оболочка.

Рассмотрим их детальнее.

### 2.1. Параметры специализированной инструментальной оболочки, связанные с ориентацией на САПР.

Включает два множества параметров адаптации, включающие три группы параметров:

*Множество 1.* Условия предметной области, в которых работает эксперт.

1) Специфика вербальной методики проектирования в данной предметной области,



что соответствует задаче *предметной адаптации*;

2) *Уровень достигнутого воплощения* вербальной методики проектирования в форме П САПР;

*Множество 2.* Характеристика эксперта, работающего в условиях предметной области.

3) *Уровень способности эксперта* в предметной области, играющего роль инженера по знаниям, явно сформулировать и передать свои знания о методике проектирования в инструментальной оболочке с целью повысить эффективность уровня воплощения методик проектирования в САПР.

Группа параметров 2 и 3 переводит задачу в *область проблемной адаптации САПР*.

Рассмотрим названные параметры детальнее.

**2.1.1. Условия предметной области, в которых работает эксперт.**

**2.1.1.1. Специфика вербальной методики проектирования требуемой П САПР.**

Задаёт желаемую (идеальную) структуру П САПР.

*Источники* вербальной модели:

1) документация разработчиков методики проектирования;

2) опыт проектировщиков, полученный в результате применения методики проектирования на практике;

3) множество готовых решений, воплощающих требуемые методики проектирования, как уже имеющихся в существующих П САПР, так и построенных проектировщиком самостоятельно в среде П САПР.

**2.1.1.2. Параметры адаптации концептуальной модели относительно вербальной модели требуемой П САПР.**

1) *Специфика структуры требуемой П САПР, т.е.:*

1.1) специфика системы взаимосвязанных абстрактных модельных уровней представления объекта проектирования:

- число уровней абстракции;
- связи между уровнями;

1.2) специфика состава проектных процедур на каждом абстрактном уровне:

- количество процедур;
- тип процедур.

2) *Специфика уровня полноты автоматизации выполнения операций проектирования для отдельных процедур в требуемой П САПР:*

2.1) специфика модели объекта проектирования предметной области различных проектных процедур для абстрактных уровней;

2.2) специфика критериев различных проектных процедур на различных абстрактных уровнях;

2.3) специфика форм реализации различных проектных процедур *доизобретения, синтеза, моделирования, документирования* на различных абстрактных уровнях.

**2.1.1.3. Уровень существующего воплощения вербальной методики проектирования в форме П САПР.**

Предполагает два аспекта анализа:

1) полнота структуры существующей П САПР относительно структуры идеального (эталонного вида) САПР, т.е.:

- состава абстрактных уровней;
- состава процедур на каждом уровне;
- состава операций для отдельных процедур;

2) полнота автоматизации выполнения операций проектирования для отдельных процедур существующей П САПР относительно возможного уровня автоматизации в модели идеального (эталонного) вида САПР.

**2.1.2. Характеристика эксперта, работающего в условиях предметной области.**

**2.1.2.1. Уровень способности эксперта в предметной области явно сформулировать и передать знания.**

**2.1.2.1.1. Семантика способности эксперта в предметной области явно сформулировать и передать знания.**

А) *Способность отразить специфику* вербальной методики проектирования в данной предметной области, т.е.:

1) *способность построить систему взаимосвязанных абстрактных модельных уровней представления объекта проектирования:*

- число уровней;
- связи между уровнями;

2) *способность отразить требуемый состав проектных процедур на каждом абстрактном уровне;*

3) *способность построить единый модуль знаний о методике проектирования некоторого типа структурного блока в рамках проектной процедуры синтеза для некоторого уровня абстрактного представления объекта проектирования.*

3.1) *Способность отразить специфику объекта проектирования данной предметной области.*

Рассматривается как возможность эксперта отразить специфику потенциала, потока и координат взаимодействия, специфика типов отношений, представляющих различные абстрактные уровни модели объекта проектирования.

Б) *Способность отразить специфику уровня воплощения методики проектирования в форме П САПР.*

Фактически, это способность построить интерфейс «язык интеллектуальной (И)

надстройки» – «язык проблемно-ориентированного (П) САПР», что включает:

- знание языка П САПР;
- знание языка формальных спецификаций инструментальных оболочек;
- анализ уровня полноты семантики П-языка относительно семантики языка формальных спецификаций.

**2.1.2.1.1.2. Параметры адаптации концептуальной модели по способности эксперта в предметной области явно сформулировать и передать знания.**

Можно рассмотреть три группы параметров адаптации мета-эвристической оболочки:

1) как *типичной инструментальной оболочки* на методику проектирования при создании САПР в заданной предметной области;

2) на *уровни квалификации экспертов* и способность построить *интерфейс с П САПР* при данном уровне воплощения;

3) на *уровни квалификации* по способности сформулировать *явно в форме БЗ свои знания* о методике проектирования в данной предметной области.

**2.2. Параметры адаптации мета-эвристической оболочки как типичной инструментальной оболочки.**

**1) Порядок обучения инструментальной оболочки** методике проектирования, соответствующий уровню воплощения и уровню квалификации эксперта в предметной области в рамках необходимой концептуальной модели предметной области:

- источники знаний;
- метод извлечения знаний;
- вид формируемой БЗ (представления знаний);
- порядок верификации БЗ.

**2) Порядок вывода в инструментальную оболочку**, соответствующий требуемой методике проектирования, уровню воплощения и уровню квалификации эксперта в предметной области:

- параметры вывода;
- алгоритм вывода;
- результат вывода.

**2.2.1. Этапы работы мета-эвристической оболочки как типичной инструментальной оболочки в соответствии с семантикой САПР:**

1) *обучение инструментальной оболочки* для построения системы БЗ о методах проектирования в данной предметной области, включая методы:

- построения САПР как системы процедур на различных абстрактных уровнях;
- функционирования САПР, т.е. построения модели объекта проектирования;
- моделирования объекта проектирования;

2) организация вывода в инструментальную оболочку:

- построение САПР (как БЗ) как результат выводы в инструментальную оболочку;

- построение модели объекта проектирования как результат вывода в САПР, построенной как БЗ;

- моделирование как результат вывода в интеллектуальной модели объекта проектирования.

**2.3. Предлагаемый порядок организации работы инструментальной оболочки.**

Предлагается следующий порядок адаптации специальной инструментальной оболочки на перечисленное множество параметров:

- адаптация на *уровень квалификации эксперта* в предметной области в методике проектирования;

- адаптация на *уровень достигнутого воплощения* методики проектирования;

- адаптация на *особенности методики проектирования* в данной предметной области.

Фактически, для каждой из градаций квалификации эксперта необходимо рассмотреть градации возможности:

- *сформулировать* явно в форме БЗ свои знания о методике проектирования в данной предметной области с учетом ее специфики;

- *построить интерфейс с П САПР*.

**3. Инструменты построения интеллектуальных САПР.**

Задача инструментов – обеспечить построение концептуальной модели предметной области, включая методы:

1) *представления знаний о методиках проектирования*:

- модели объекта проектирования;

- совокупности правил, отражающих методику проектирования;

2) *извлечения знаний*;

3) *верификации знаний*;

4) *организации логического вывода*.

Рассмотрим существующие инструменты с целью выбора необходимого их подмножества, обеспечивающего построение концептуальной модели предметной области, способной адаптироваться на заданные выше параметры предметной области.

**3.1. Краткая ретроспектива инструментальных методов.**

• *Динамические вычислительные модели (ВМ)* [6]. Декларация необходимости использования теоретико-множественных операций над порождающими грамматиками в процессе построения и модификации ВМ; методов ее решения дано не было.

• *Динамические недоопределенные ВМ* [7]. Дано определение НЕ-факторов. Применение теоретико-множественных операций свелось к оперированию областями определения переменных.

• *Технология R-tran* [8]. Ориентированна на автоматизацию процессов анализа формальных текстов; дает средства построения теоретико-множественных операций.

• *Инструментальная оболочка ИнтерНаМ* [9]. Удачная попытка разработки алгоритмов реализации таких теоретико-множественных операций над НЕ-факторами на базе *R-tran* с последующим практическим внедрением.

Теоретико-множественные операции и НЕ-факторы использовались в:

1) экспертной системе – интеллектуальном (И) САПР *EMULAT* [10];

2) инструментальной оболочке *ИнтерНаМ*.

САПР *EMULAT* обеспечивала синтез и модельное исследование структур и ПО спец-процессоров, построенных на базе секционного микропроцессорного набора Am2900. Типичный запрос к пользователю в экспертной системе *EMULAT*: «Задайте размер ALU в битах (кратно 4)». После ответа модель достраивалась соответствующими компонентами. Состав и порядок вопросов определялся предысторией диалога.

Инструментальная оболочка *ИнтерНаМ* была предназначена для автоматизации построения САПР типа *EMULAT*, но для любого секционного микропроцессорного набора. Специфика инструментальной оболочки *ИнтерНаМ* – *явное использование теоретико-множественных операций и НЕ-факторов в приложении к текстам, заданным на формальном языке спецификаций ДеСим*. Типичная продукция в *ИнтерНаМ*:

**REG[\*]->APU[\*].**

Смысл: ЕСЛИ в модели существует массив блоков типа REG произвольного размера (\*) ТО необходимо внести в модель массив блоков типа APU такого же размера (\*). Недостатки систем – недостаточно развитый механизм предметной и проблемной адаптации.

• Концепция «*мета-ЭС*» [11].

Достоинства:

1) способность адаптироваться на различные предметные области (мета);

2) динамическая модель экспертной системы;

3) наличие консультативно-обучающей подсистемы, управляющей процессом создания требуемой экспертной системы и др.

Недостатки:

1) отсутствие возможности адаптироваться на уровень подготовки эксперта в предметной области, выполняющего роль инженера по знаниям;

2) невозможность рассматривать систему уровней знаний о действительности.

• *Теория классического САПР* [1].

Достоинства:

представляет комплекс моделей в САПР любой предметной области как систему взаимосвязанных уровней знаний о действительности с физической семантикой, т.е.: законами сохранения, фазовыми переменными, координатами взаимодействия, моделями пространства и времени.

Недостатки:

1) отсутствие полноценной реализации в практике построения И САПР.

• *Концепция мета-оболочек* [2, 12].

Достоинства:

1) явное построение концептуальной модели предметной области, заданной как система взаимосвязанных уровней знаний о действительности – метазнаний;

2) ориентация на *онтологию*.

Недостатки:

1) отсутствие ориентации на САПР;

2) невозможность создать «тяжелые» онтологии, полноценно обеспечивающие процесс построения и функционирования И САПР.

**3.2. Современное состояние инструментальных средств.**

• **[Burke]** *Мета-эвристические алгоритмы и гиперэвристики* [13].

1) мета-эвристические алгоритмы – совокупность современных стохастических интеллектуальных методов поиска новых решений.

2) Гиперэвристики – генерация или выбор требуемой эвристики под задачу.

Достоинства:

1) рассматривается комплекс методов поиска новых решений, позволяющий выбрать оптимальный, исходя из специфики решаемой задачи, т.е. – адаптироваться на постановку задачи;

2) потенциальная возможность применения данного подхода в практике построения инструментальных оболочек в более широком смысле;

Недостатки – см. выше.

• *Работы в области И САПР* – практически полный набор параллельных результатов [14].

Отличие:

1) концепция мета-эвристической оболочки ориентирована на решение типичных задач проектирования, а данные работы – на построение И САПР поискового конструирования.

Недостатки:

- отсутствие использования теоретико-множественных операций в поисковом конструировании.

• *концептуальная модель предметной области с частичной физической семантикой* [15, 16].

Достоинства:

1) возможность частично моделировать физическую модель объектов;

2) использование рефлексивных связей в модели объекта.

Недостатки:

1) отсутствие полноценного отражения в предложенной модели физической семантики предметной области;

2) отсутствие структурной и функциональной (абстрактной) иерархичности и регулярности в моделях объектов.

• *Теоретико-множественная логика* [18].

Достоинства:

- достаточно хорошо проработанный теоретический аппарат, обладающий полным составом теоретико-множественных операций.

Недостатки:

1) отсутствие привязки теоретико-множественных операций не к множеству абстрактных идентификаторов решений, а к множеству решений, описывающих модели структур и функций реальных объектов, заданному либо в форме И-ИЛИ-деревьев решений, либо в форме грамматики множества решений с дополнительным множеством семантических правил (продукций);

2) отсутствие дополнительных модальностей «необходимо» и «возможно», наличие которых позволили бы модифицировать множество решений на уровне структур и функций.

• *Семiotическая модель* [19].

Система формальных моделей, связанных отношениями достижимости.

Достоинства:

- в роли формы представления в наибольшей степени соответствует задаче создания открытого САПР, ориентированного на языковое представление моделей, относящихся к различным абстрактным уровням.

• *Результаты*, полезные для решения поставленной задачи [7]:

1) НЕ-факторы;

2) динамические вычислительные недоопределенные сети ДНВС (ныне – программирование в ограничениях, интервальная математика).

Достоинства:

- возможность применить НЕ-факторы для построения системы уровней знаний о действительности;

- наличие в ДНВС потокового алгоритма вывода, потенциально обеспечивающего общий подход к организации логического вывода в интеллектуальных САПР типичного проектирования.

Недостатки:

1) не указано, как применять НЕ-факторы при построении концептуальной модели предметной области с физической семантикой;

2) не указано, как применять ДНВС в области моделей с физической семантикой.

• *Теория формальных грамматик* [20].

В настоящее время представлена такими классами грамматик как атрибутные, предикативные и трансформационные.

Достоинства:

- возможность описать систему формальных языков спецификаций в САПР, имеющих различную форму представления, исходя из специфики задачи адаптации в данной предметной области.

Недостатки:

- не исследована роль грамматик всех перечисленных типов в рамках САПР, где теоретико-множественные операции могут выступать в качестве инструмента построения отношений достижимости смежных формальных моделей.

• *Классические модальные логики* [21].

Достоинства:

- возможность описать систему правил вывода (продукций), формально описывающих методики проектирования в И САПР типичного проектирования.

Недостатки:

- не описано применение модальностей в продукциях с использованием теоретико-множественных операций.

• *Псевдофизические логики* [22, 23].

Достоинства:

- большой класс пространственных и временных логик;

- достаточно развитый теоретический аппарат временной логики, позволяющий в принципе оперировать физическими событиями (изменение положения блоков, изменение значений сигналов и т.д.).

Недостатки:

1) отсутствие реальной связи с полноценной моделью объекта проектирования, обладающей физической семантикой;

2) необходимость фактически вручную формировать требуемую логику, что можно было бы исправить путем выполнения теоретико-множественных операций над прототипами-решениями, представленными как тексты в рамках некоторой грамматики, явно включающей модели пространства и времени.

• *Теория сложности систем автоматического управления (ТС САУ)* [24].

Достоинства:

1) фактически задает модель процедуры синтеза блока некоторого типа в САПР типичного проектирования;

2) явно рассматривает множество решений (ЦПС) и множество ТЗ (ПОС).

Недостатки:

- не позволяет использовать теоретико-множественные операции.

• *Оценки эффективности вывода в базе знаний, построенной на основе дерева дизъюнктов [25].*

Достоинства:

Рассматривают главные выходные показатели эффективности вывода в базе знаний, задающие эффективность D-алгоритма синтеза логической области дедуктивной выводимости (ЛОДВ):

- L(S) – длину логического описания ОДВ (число конъюнктов в ДНФ ЛОДВ);

- M(S) – число замещений литералов в процессе работы алгоритма.

Недостатки:

- не ориентирована на оценку сложности теоретико-множественных операций над грамматиками.

*Аналогичные замечания* можно привести к:

- *методам извлечения знаний из текстов и баз данных;*

- *CASE-технологиям;*

- *нейронным сетям;*

- *объектному подходу* и т.д.

**Общий вывод:**

- для обеспечения решения задачи проблемной адаптации в рамках заданного набора параметров нужна комплексная концептуальная модель предметной области, использующая практически все названные выше инструменты;

- совместное комплексное использование всех названных выше инструментов требует их модификации для учета как взаимного влияния, так и физической семантики концептуальной модели предметной области.

Предлагаемый состав основных инструментов:

1) методы и средства построения пары «EMULAT – ИнтернНаМ» как основа концептуальной модели предметной области;

2) семиотическая модель как математическая форма построения концептуальной модели предметной области, отражающая физическую семантику;

3) теоретико-множественные операции над порождающими грамматиками как средство извлечения знаний и организации логического вывода;

4) комплекс методов работы с НЕ-факторами, обеспечивающих как построение

модели объекта проектирования, так и построение правил проектирования;

5) ТС САУ как модель проектной процедуры синтеза решения в САПР типичного проектирования, где процедура синтеза решений построена как база знаний, организованная по модульному принципу;

6) методы организации интерфейсов «П САПР – инструментальная оболочка» как средство обеспечения извлечения знаний о методиках проектирования, а так же как средство верификации синтезированных решений, т.е. – как средство построения интеллектуальных надстроек над существующими П САПР.

Предлагаемые общие принципы построения технологии мета-эвристической оболочки на основе выбранных инструментов:

1) термин «*мета*» в концепции мета-эвристической оболочки имеет два смысла:

1.1) способность адаптировать инструментальную оболочку на различные предметные области;

1.2) использование комплекса стандартных абстрактных уровней представления модели объекта проектирования в САПР;

2) в рамках концепции необходимо выполнить:

2.1) разработку **модели объекта проектирования;**

2.2) разработку **модели БЗн**, соответствующей специфике подхода.

Фактически предлагается:

1) построить систему уровней абстракции, объединяющих множество взаимосвязанных моделей объектов проектирования данной предметной области;

2) на основе системы абстрактных уровней моделей объекта проектирования предметной области построить систему проектных процедур для различных абстрактных уровней.

По существу должен быть создан механизм построения модели предметной области как «тяжелой» онтологии, ориентированной на физическую семантику предметной области.

Кратко рассмотрим концепцию.

#### **4. Принципы разработки модели объекта проектирования в рамках концептуальной модели предметной области на базе физической семантики и НЕ-факторов**

Рассмотрим задачу построения системы уровней абстракции, объединяющих множество взаимосвязанных моделей объектов проектирования данной предметной области. Предлагается разделить ее на три этапа:

1) построить систему уровней представления потенциалов в данной предметной области, трактуемых как уровни данных;

2) на основе системы уровней представления потенциалов построить абстрактные уровни структурной и функционально-логической модели;

3) рассмотреть пути достройки функционально-логической модели до уровня количественной макро-модели, что предполагает ввод токов (потоков) и координат взаимодействия (емкостей, индуктивностей, сопротивлений источников токов и напряжений).

#### 4.1 Семантика модели объекта проектирования.

##### 4.1.1. Принципы построения модели объекта проектирования в мета-эвристической оболочке.

Сформулируем ряд общих положений, определяющих главные принципы реализации модели объекта проектирования в специализированной инструментальной оболочке:

1) *предметная область* – это модель мира некоторого уровня общности; модель мира ограничена и замкнута;

2) отличие предметных областей – только в *различной идентификации и составе* используемых типов потенциалов, при полностью эквивалентных подходах построения их модели;

3) предполагается неразрывное соответствие «*потенциал (данное)* – *структурный блок*» в модели объекта проектирования;

4) *декомпозиция потенциалов* (данных) различных типов есть основа декомпозиции различных типов структурных блоков в модели структуры объекта проектирования;

5) время и пространство как *различные типы потенциалов* в структурной модели мира;

6) декомпозиция единичного объекта проектирования (прототипа), принадлежащего к некоторому типу, как построение *И-дерева*;

7) декомпозиция некоторого типа объекта проектирования на множество прототипов единичных объектов проектирования как построение *И-ИЛИ-дерева*;

8) число прототипов *в типе ограничено и счетно* (специфика САПР типичного проектирования);

9) модель структуры любого единичного объекта проектирования некоторого типа описывается *некоторым известным прототипом*.

##### 4.1.2. Подходы к построению модели объекта проектирования.

Сформулируем ряд общих подходов, позволяющих реализовать предлагаемые

принципы реализации модели объекта проектирования в специализированной инструментальной оболочке:

1) использование принципа неразрывной пары «блок – данное», при этом «данное» трактуется как потенциал;

2) классификация НЕ-факторов по роли в декомпозиции объектов;

3) декомпозиция модели как основа построения иерархической, регулярной по структуре и функциям модели объекта проектирования;

4) модель мира, модель времени и пространства, модель физического блока, модель функционального блока рассматриваются как этапы декомпозиции рефлексивных структурных связей по собственному свойству на основе НЕ-факторов;

5) модель структурного блока задается как совокупность:

- внешней границы блока;
- внутренней границы блока как «обращения» внешней границы блока;
- состава подблоков внутренней среды блока;
- состава структурных связей между подблоками и т.д.

Рассмотрим детальнее.

##### 4.1.3. Семиотическая модель как основа концептуальной модели.

Опишем структуру семиотической модели (СМ) [19] как общего инструмента, позволяющего реализовать изложенные выше принципы и подходы.

СМ представляет собой открытую формальную систему и имеет форму восьмерки:

$F = \langle T, C, A, \Pi, r, b, g, d \rangle$ , где:

$T$  – множество базовых элементов системы, на которых строятся все выражения в  $F$ ;

$C$  – множество правил построения синтаксически правильных формул;

$A$  – множество аксиом  $F$ , как подмножество  $C$ ;

$\Pi$  – множество правил вывода, или семантические правила (позволяющие получать из аксиом новые синтаксически правильные формулы, которым можно приписывать статус истинности);

$r, b, g, d$  – правила изменения, соответственно для  $T, C, A$  и  $\Pi$ .

Процедуры:

$\Pi 1$  – определения принадлежности данного элемента множеству  $T$ ;

$\Pi 2$  – идентификации различия элементов множества  $T$ ;

$\Pi 3$  – определения синтаксической корректности элементов, построенных посредством правил  $C$ .

Процедуры  $\Pi 1, \Pi 2$  и  $\Pi 3$  – конструктивны, т.е. должны завершаться через определенное число шагов.

Конструктивная СМ является разрешимой, если существует конструктивная процедура П4, дающая однозначный ответ на вопрос – является ли данное синтаксически корректное описание семантически верным (т.е. сводимо к аксиомам).

Т.о., построить концептуальную модель предметной области как СМ означает реализовать все перечисленные компоненты СМ с тем, чтобы отразить перечисленные выше принципы и подходы.

#### **4.1.4. Роль НЕ-факторов как инструментария построения модели объекта проектирования:**

1) построение семиотической модели декомпозиции данных;

2) построение семиотической модели декомпозиции структур в модели мира.

Рассмотрим данные модели детальнее.

### **5. Применение НЕ-факторов при построении модели данных для объекта проектирования с физической семантикой.**

Рассмотрим СМ декомпозиции данных и структур на базе НЕ-факторов [26, 27].

#### **5.1. Семиотическая модель декомпозиции данных**

Концептуальная модель предметной области должна включать в себя следующие НЕ-факторы [26]:

1) **недоопределенность общих знаний** – т.е. представление типовой сущности как системы различных уровней огрубления понятий (тип U).

2) **недоопределенность конкретных знаний** – т.е. неполнота информации о фрагменте реальности в рамках фиксированной системы общих знаний (тип N).

3) **неоднозначность, альтернативность знаний** (тип A).

Опишем СМ декомпозиции данных (потенциалов), входящих в СМ модели объекта проектирования  $T_{мн}$ , как основу построения модели декомпозиции структур.

Состав множества базовых элементов  $T_n$ :

- множество свойств;
- множество значений свойств;
- иерархия отношений, определенных над свойствами, их значениями и отношениями нижележащих уровней.

Множество отношений, определенных над данными, включает в себя, согласно принятой автором классификации, отношения:

- принадлежности;
- передачи информации;
- обработки информации;
- декомпозиции;
- агрегации;
- порядка.

Будем рассматривать только **отношения декомпозиции и порядка**, определенные для свойств и значений, как наиболее связанные с недоопределенностью знаний.

Из состава возможных отношений принадлежности рассмотрим, в частности, отношение принадлежности свойств к модели **M**.

**Состав набора атрибутов A модели данных M:**

- номер уровня аппроксимации;
- номер уровня неполноты информации об аппроксимациях;
- номер уровня альтернативности знаний об аппроксимациях.

Совокупность моделей мира будем задавать упорядоченным набором правил изменения  $r_n$  для сигнатуры СМ  $T_n$ .

Как  $r_n$ , так и  $T_n$  будем подчинять ряду аксиом и правил вывода.

Упуская собственно аксиомы и правила, **перечислим следствия** из данных аксиом, важные с точки зрения технологии описания модели данных.

#### **5.1. Уровни аппроксимации.**

Пусть дано:

1)  $l$  – номер уровня недоопределенности общих знаний, иначе – **уровня аппроксимации** или уровня огрубления понятий (типа U); при,  $l = 1 \div K_U$ , где  $K_U$  – общее количество уровней аппроксимации;

2)  $D_l$  – набор свойств уровня  $l$ ;

3)  $D_{ljm}$  – идентификаторы значений  $j$  свойств уровня  $l$ ;

**Следствие 1.** Можно рассматривать совокупность неопределенностей уровня аппроксимации  $l$  (рис. 2).

Будем считать, что уровень аппроксимации  $l$  представлен списком базовых элементов, состоящим из следующих подмножеств.

#### **А) В составе свойств:**

- множество всех свойств;
- множество базовых, т.е. определенных свойств;
- неопределенное свойство;
- «прочие свойства»;
- базовые свойства с определенным набором значений;
- базовые свойства с неопределенной структурой.

#### **Б) В составе значений:**

- множество всех значений всех свойств;
- базовые, т.е. определенные значения;
- недоопределенные значения.

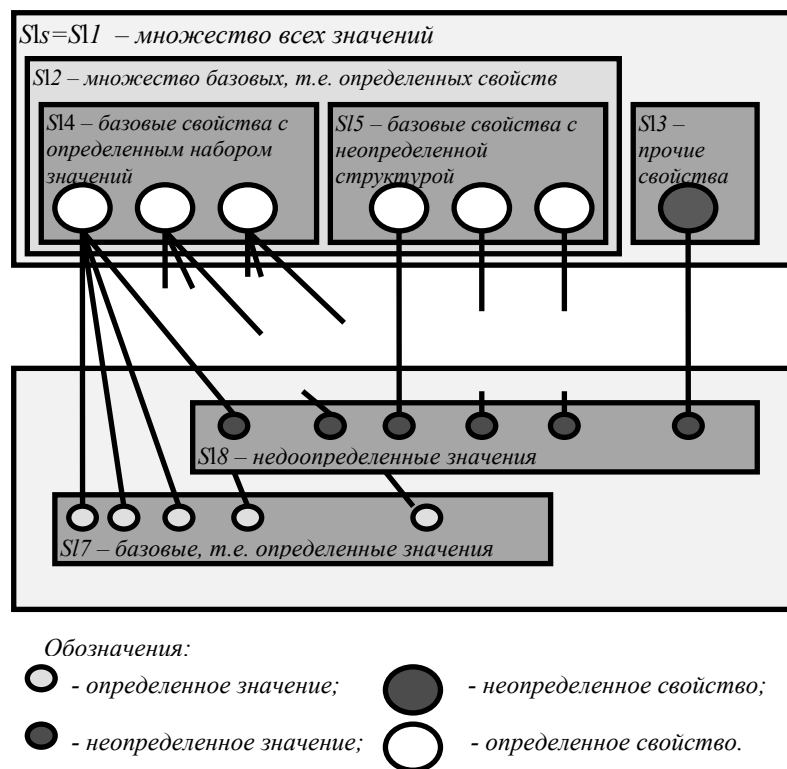


Рисунок 2. – Состав компонент уровня аппроксимации

**Следствие 2.** Множество всех неопределенностей уровня аппроксимации  $I$  может быть задано множеством неопределенных данных и значений.

### 5.2. Уровни неполноты информации об аппроксимациях.

Такая неопределенность может рассматриваться как **неполнота информации о фрагменте реальности** в рамках фиксированной системы общих знаний, т.е. недоопределенность типа  $N$ .

**Следствие 3.** Можно явно различать такие типы декомпозиции, т.е. типы правил изменения  $r$  для  $T$ :

$r_v$  – вертикальная декомпозиция, или декомпозиция свойств;

$r_g$  – горизонтальная декомпозиция, или декомпозиция значений.

### 5.3. Отношение уровней аппроксимации между собой.

**Следствие 4.** На уровне «0» имеется только один начальный элемент.

**Следствие 5.** Недопустимым является замена одного из базовых свойств уровня  $I$  некоторым новым свойством или его удаление.

**Следствие 6.** Допустимой формой изменения состава базовых свойств уровня  $I$  относительно уровня является только декомпозиция свойств или значений.

### 5.4. Уровни альтернативности знаний об аппроксимациях.

Рассмотрим неоднозначности знаний, связанные с наличием альтернативных

утверждений (неоднозначности типа  $A$ ). В нашем случае альтернативность должна трактоваться как наличие различных возможных форм представления уровней аппроксимаций. Пусть дано:

- номер уровня аппроксимации;
- набор базовых элементов уровня  $I$ .

**Следствие 7.** Возможны следующие формы взаимного отображения отдельно взятого варианта уровня  $I$  и множества вариантов уровня:

- не имеется ни одного соответствующего варианта;
- имеется подмножество соответствующих вариантов;
- соответствуют все варианты.

**Следствие 8.** Установление отношения порядка на элементах с учетом возможных вариантов представления требует введения дополнительного идентификатора (номера) в состав атрибутов элементов, рассматриваемого как «номер альтернативы формы представления для уровня аппроксимации».

### 5.5. Уровни альтернативности знаний об уровнях неполноты информации.

Строятся аналогично.

## 6. Семиотическая модель декомпозиции структур в модели мира

Результатом построения модели данных являются:

- сигнатура свойств (потенциалов)  $Tn CM$ ;
- грамматика описания свойств  $Gn CM$ .



На основе СМ декомпозиции данных, трактуемых как потенциалы блоков, можно построить СМ блочной декомпозиции модели объекта проектирования. Проиллюстрируем систему уровней СМ [27].

Отношения в модели тракуются как *структурные связи между блоками по свойствам (потенциалам)*.

Построение такой модели предполагает:

1) расширение сигнатуры свойств (потенциалов)  $T_n$  СМ до полноценной

сигнатуры модели объекта проектирования с физической семантикой –  $T_{мн}$ ;

2) расширение грамматики свойств (потенциалов)  $G_n$  СМ до полноценной грамматики модели объекта проектирования с физической семантикой –  $G_{мн}$ .

**6.1. Уровень исходной модели мира (предметной области).**

Модель прототипа уровня 1 не имеет альтернативных форм представления (рис. 3).

СВЯЗЬ "С0" ПО "NIL"

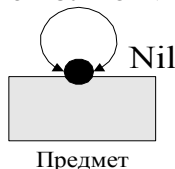


Рисунок 3. – Изначальное представление модели предмета

**6.2. Уровень ввода времени как свойства и блока.**

Декомпозиция блока включает произвольное число моделей времени, имеющих

связи с блоком «Время», и задает множество альтернативных форм представления уровня 2 (рис. 4).

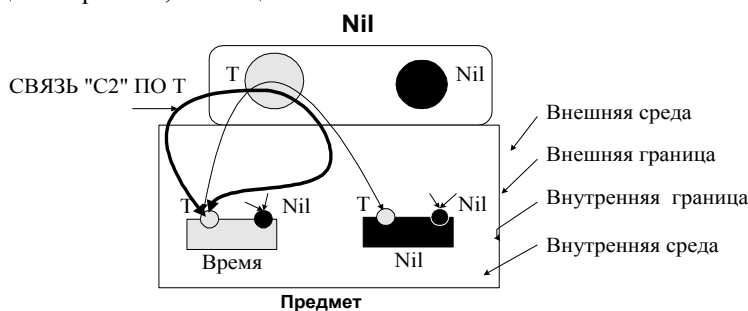


Рисунок 4. – Уровень ввода времени как свойства и блока

**6.3. Уровень значений свойства времени и моделей пространств.**

Декомпозиция моделей времени порождает ряд пространств (рис. 5).

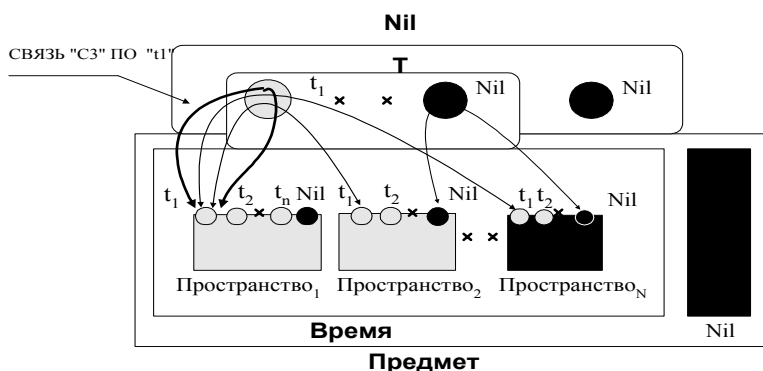


Рисунок 5. – Уровень определения моделей пространств

Упорядочивание моделей пространств по некоторой шкале задает модель времени.

Уровень 3 предлагаемой СМ задает жизненный цикл предметной области.

**6.4. Уровень точек пространства и их идентификаторов.**

Декомпозиция пространств порождает ряд физических точек (рис. 6).

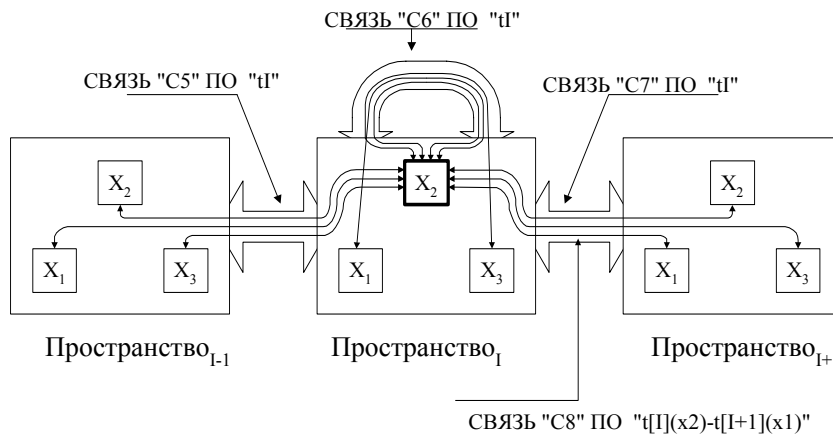


Рисунок 6. – Фрагмент совокупности связей точек пространства

Упорядочивание совокупностей физических точек в рамках единичных моделей пространств по некоторой совокупности шкал задает модель пространства.

Рассматривает модели точек пространства как наборы потенциалов предметной области, отражающих набор структурных связей точек пространства (табл. 2).

Таблица 2. – Пример состава свойств точек пространства

$t_{-1}^1$						$t_0^2$						$t_{+1}^3$					
$x_1^1$		$x_2^2$		$x_3^3$		$x_1^4$		$x_2^5$		$x_3^6$		$x_1^7$		$x_2^8$		$x_3^9$	
$s_1^1$	$s_2^2$	$s_1^3$	$s_2^4$	$s_1^5$	$s_2^6$	$s_1^7$	$s_2^8$	$s_1^9$	$s_2^{10}$	$s_1^{11}$	$s_2^{12}$	$s_1^{13}$	$s_2^{14}$	$s_1^{15}$	$s_2^{16}$	$s_1^{17}$	$s_2^{18}$

**6.5. Уровень «простых» свойств и внутренних функций точек пространства.**

Данный уровень СМ соответствует структурной модели объекта проектирования.

**6.6. Уровень значений «простых» свойств и «кортежей» функций.**

Рассматривает декомпозицию потенциалов на множество дискретных значений. При этом внешняя граница блока рассматривается как набор потенциалов предметной области и их значений (понимаемых как альтернативная блочная структура блока-типа данного).

Данный уровень СМ соответствует функционально-логической модели объекта проектирования.

**6.7. Уровень токов и координат взаимодействия.**

Рассматривается:

1) декомпозиция «черного» свойства блоков для ввода дополнительного свойства блока – тока (потока), т.е. – второй фазовой переменной;

2) введение свойств структурной связи между блоками, трактуемой как пара взаимно-направленных отношений причины-следствия,

таких как координаты взаимодействия (сопротивление, индуктивность и т.д.).

Данный уровень СМ соответствует количественной макро-модели объекта проектирования.

*Примечание:* уровни системной модели и уровень количественной микромодели детально не рассматривались, а только – эскизно.

Описанная выше модель объекта проектирования расширяет сигнатуру  $T_n$  СМ данных (потенциалов) путем включения моделей мира, пространства, времени, свойства, внешней границы блока и т.д. И-ИЛИ-дерево декомпозиции блоков есть основа семантики и грамматики языка описания множества моделей объекта проектирования  $G_{mn}$  на любом из перечисленных уровней декомпозиции. Грамматика языка  $G_{mn}$  контекстно-свободная, синтаксис соответствует языку ДеСиМ инструментальной оболочки *ИнтерНаМ*. Форма представления языка  $G_{mn}$  – БНФ (форма Бекуса – Наура). Т.о., процедуры СМ П1 и П2, описывающие различия элементов сигнатуры и грамматики СМ (в части языка  $G_{mn}$ ), считаются построенными. Соответствующие процедуры П1, П2 – конструктивны, т.е. завершаются через определенное число шагов.

## 7. Общие принципы построения семиотической модели базы знаний

Рассмотрим порядок расширения описанной выше модели, путем:

- расширения сигнатуры  $T$   $CM$  для ввода сигнатуры  $T_c$  языка синтеза модели  $G_c$ ;
- расширения грамматики  $G_{mn}$  до уровня полноценной грамматики  $CM$  путем ввода грамматики синтеза  $G_c$ ;
- ввода аксиоматики  $A$   $CM$  и соответствующей процедуры  $P_3$ ;
- ввода совокупности правил вывода  $P$   $CM$  и определения соответствующей процедуры  $P_4$ .

### 7.1. Описание основного подхода

Рассмотрим основные принципы построения проектных процедур на том или ином уровне абстракции модели объекта проектирования [28 – 31]. Проиллюстрируем данные принципы на примере процедуры синтеза.

В рассмотрении вводится понятие типа блока и прототипов блока, как множества альтернативных структур блока. Тип блока в дальнейшем трактуется как модуль знаний, а методика проектирования, соответствующая процедуре синтеза, представляется как база знаний, состоящая из совокупности модулей знаний. Порядок построения БЗ может различаться от пути декомпозиции модели объекта проектирования. Так, при прямой диалоговой декомпозиции различные варианты декомпозиции связей в модели структур порождают И-ИЛИ-дерево связей, позволяющее описывать различные варианты модели блоков любого уровня абстракции. В этом случае структурная связь может получить дополнительный идентификатор – номер прототипа на данном уровне абстракции.

И-ИЛИ-дерево связей является основой для обобщения ЖЦ (для создания системы модулей знаний), а номера прототипов в этом случае являются основой «*неявных*» *продукций*, связывающих данные альтернативы в И-ИЛИ-дереве зависимостями принадлежности к одному контексту.

Если подобное И-ИЛИ-дерево вводится не путем декомпозиции, а экспертным путем (прямой ввод модулей знаний), то в этом случае эксперт вводит «*явные*» *продукции*, связывающие различные альтернативы отношения совместимости-несовместимости.

### 7.2. Грамматика семиотической модели (G).

В рассматриваемой модели САПР имеется два языка: 1)  $G_{mn}$  – язык описаний *текстов прототипов* (на базе синтаксиса языка ДеСиМ из инструментальной оболочки *ИнтерНаМ*); имеет различную семантику и грамматику, исходя из уровня абстракции, где

он применяется; 2)  $G_c$  – язык *диалога синтеза* прототипов.

Данные языки соответствуют в *модифицированной ТС САУ* двум компонентам – *целевому пространству систем (ЦПС)*, т.е. множеству решений – прототипов и *пространству обликов систем (ПОС)*, т.е. множеству технических заданий.

Соответственно, имеются две различные грамматики: грамматика описаний текстов прототипов в ЦПС и грамматика диалога синтеза прототипов в ПОС. В грамматике описания множества прототипов имеется возможность построить любое из возможных описаний прототипов на формальном внутреннем языке представления моделей некоторого САПР.

В *грамматике диалога* каждый *ИЛИ-синтерм* трактуется как *возможный вопрос* к пользователю при синтезе решений и имеет дополнительно пустой элемент и возможность выбрать любое подмножество элементов.

Теоретико-множественные операции над грамматиками позволяют обеспечить процесс обучения БЗн САПР, т.е. *автоматическое построение ЦПС*, а так же процесс синтеза решений (прототипов) по ПОС, сформированному автоматически по ЦПС или же впрямую построенному пользователем.

### 7.3. Аксиоматика (A) и правила вывода (P), описывающие специфику базы знаний по семиотической модели структур

#### 1. Постановка задачи.

Будем рассматривать *иерархическую структуру объекта*, состав отношений которой задан в обобщенной концептуальной модели предметной области, построенной в форме  $CM$ .

$CM$  структур как И-ИЛИ-дерево есть основа для построения  $CM$  базы знаний.

#### 2. Статическое определение структуры.

Опишем отношения, составляющие структуру как сигнатуру  $CM$  БЗн. Сигнатура задает: типы отношений; правила идентификации структур элементов в пределах структур-прототипов, сложных выражений или аксиом.

Всякий блок, как структурная единица, *идентифицируется совокупностью составляющих*: внешняя среда; внутренняя среда; внешняя граница блока; внутренняя граница блока.

#### 3. Идентификация отношений в пределах сложных отношений, имеющих альтернативы представления.

Рассмотрим состав  $CM$  базы знаний, не вникая в формальные описания:

##### 3.1. Отношения внешних и внутренних границ между собой;

###### 3.1.1. Аксиоматика границ $A_g$ ;

- 3.1.2. Правила вывода для границ  $Pg$ ;  
 3.2. Отношение внутренних и внешних сред между собой;  
 3.2.1. Требования к средам, аксиоматика  $As$ ;  
 3.2.3. Отношение составляющих блоков, аксиоматика  $Ab$ ;  
 2.2.4. Отношение вариантов сред между собой, аксиоматика  $Ass$ ;  
 3.2.5. Правила вывода  $Pss$ ;  
 3.3. Зависимость вариантов сред от вариантов границ;  
 3.4. Отношение между составляющими структурной связи.

Процедура **ПЗ**, задающая отличия аксиом – конструктивна, т.е. завершается через определенное число шагов.

#### 7.4. Процедура П4

На верхнем уровне вывод в БЗн под управлением процедуры П4 [32] есть вывод на множестве вложенных модулей знаний. Порядок вывода – сверху-вниз, слева-направо, что обеспечивает конечность процесса вывода.

Общий порядок возможного вывода необходимой структуры блока, отвечающего заданным требованиям, исходя из заданного модуля знаний, таков:

- 1) вариант внешней среды определяет вариант внешней границы блока;
- 2) вариант внешней границы блока определяет вариант внутренней границы блока;
- 3) вариант внутренней границы блока определяет вариант внутренней среды блока и далее на 1 для определения структур вложенных подблоков.

Исходя из семантики модели пространства-времени процедура П4 задает алгоритм управления движением в пространстве и времени [П4]. Поскольку вывод ориентирован на сужение грамматики описания модели объекта проектирования  $G_{mn}$  до уровня, соответствующего набору требований, заданных в языке синтеза  $G_c$ , то из этого следует, что вывод монотонный [31]. В свою очередь, монотонность вывода говорит о том, что процедура П4 конструктивна, т.е. должна завершаться через определенное число шагов. Т.о., предложенная СМ конструктивна, т.к. конструктивны процедуры П1, П2, П3 и П4. Построенная СМ есть разрешимой, т.к. предлагаемая конструктивная процедура П4 всегда дает однозначный ответ на вопрос – является ли данное синтаксически корректное (т.е. – соответствует языку синтеза  $G_c$ ) описание семантически верным (т.е. сводимо к аксиомам). Фактически, речь идет о выборе в рамках языка описания объекта проектирования  $G_{mn}$  требуемого подмножества прототипов (семантически верных выражений).

## 8. Построение семиотической модели базы знаний на основе использования теоретико-множественных операций и НЕ-факторов

### 8.1. Роль теоретико-множественных операций как инструментария построения модулей знаний.

Рассмотрим детальнее роль теоретико-множественных операций как инструментария построения модулей знаний.

#### 8.1.1. Теоретическое обоснование алгоритма теоретико-множественных операций.

В качестве базового утверждения была доказана теорема, что существование требуемых теоретико-множественных операций не противоречит положениям теории формальных грамматик.

#### 8.1.2. Построение теоретико-множественных операций.

В соответствии с различными путями построения системы уровней абстракции объекта проектирования, предлагаются и различные алгоритмы теоретико-множественных операций. Разработанные алгоритмы теоретико-множественных операций отличаются ориентацией на различные модели эксперта в предметной области. Предложено три модели эксперта в предметной области, играющего роль инженера по знаниям:

- 1) «умный», что соответствует построению специализированных упрощенных систем типа ПРОЛОГ;
- 2) «средний», что соответствует построению специализированного редактора «тяжелых» онтологий как основы построения базы знаний;
- 3) «глупый», что соответствует построению специфических методов автоматического извлечения знаний из текстов.

Выделено два класса алгоритмов теоретико-множественных операций – с *известной семантикой* и грамматикой языка и – с *неизвестной семантикой* и грамматикой языка.

#### 8.1.2.1. Алгоритм теоретико-множественных операций в условиях полного отсутствия известной грамматики и семантики текстов

Соответствует модели «глупого» эксперта по знаниям [29, 30], не способного построить базу знаний и не знающим грамматики языка представления решений. Основой алгоритма является *многократный прямой и обратный обход двух сравниваемых деревьев* (грамматик) с помощью двух пар стеков. Алгоритм обеспечивает:

- синтез решений в диалоге с пользователем, задающего требуемые ему структурные особенности решения;

- синтез выполняется походом по грамматике как дереву решений с выбором в диалоге требуемой альтернативы в том или ином ИЛИ-узле.

#### 8.1.2.2. Алгоритмы теоретико-множественных операций в условиях полностью известной грамматики и семантики текстов

Предлагается ряд алгоритмов, отличающихся использованием различных форм семантических правил, определенных над грамматиками, вводящих контекстную зависимость.

Различные формы задания дополнительных семантических правил соответствуют трем моделям экспертов:

- модели «глупого» эксперта по знаниям; предполагает автоматическое формирование множества семантических правил (продукций);

- модели «умного» эксперта по знаниям; предполагает прямой ввод множества семантических правил (продукций);

- модели «среднего» эксперта; предполагает ввод продукций косвенно – через введение ряда отношений совместности-несовместности для ИЛИ-узлов дерева решений.

#### 8.2. Роль НЕ-факторов как инструментария построения модулей знаний.

В соответствии с различными путями построения системы уровней абстракции объекта проектирования, предлагаются и различные методы использования НЕ-факторов в правилах (продукциях), описывающих

методику проектирования. Например, явное использование по принципу *ИнтерНаМ* НЕ-факторов в продукциях, неявное и т.д.

#### Выводы

Предложенный инструментарий использовался в практике построения оболочек в таких случаях:

1) использование теоретико-множественных операций и НЕ-факторов как механизма организации вывода в различных типах «пакетных продукций» в режиме «умного» эксперта;

2) использование теоретико-множественных операций и НЕ-факторов как механизма создания модулей знаний в режиме «глупого» эксперта;

3) построение пространственной и временной псевдо-физической логики в режиме «глупого» эксперта и т.д.

Разработанные инструментальные оболочки использовались в следующих предметных областях: 1) **бизнес-планирование в экономике** (синтез календарного плана, выбор оптимального распределения рабочих различной квалификации по производственным операциям и т.д.); надстройка над САПР бизнес-планов Project Expert; 2) **проектирование трубопроводов** (задача синтеза или реконструкции схем парогазовых установок, заданных на внутреннем ЛИСП-подобном языке САПР паро-газовых установок в энергетике СПРУТ); 3) **проектирование средств выч. техники** (интеллектуальная надстройка над САПР вычислительной техники OrCAD для синтеза нужного решения на языке VHDL) и т.д.

автоматизации построения интеллектуальных САПР // Наукові праці ДонНТУ. Серія ІКОТ-2011. Випуск 14(185). – Донецьк: ДонНТУ. – С. 252 – 261.

#### Список литературы

1. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем. М.: Вс. шк., 1986. – 304 с.
2. Клещев А.С. Экспертные оболочки, основанные на знаниях // Сборник научных трудов III конф. по искусственному интеллекту. КИИ-92. Т. 2. Казань. – С. 119 – 121.
3. Григорьев А.В. Расширенная постановка задачи проблемной адаптации интеллектуальных САПР // Наукові праці ДонНТУ. Серія ІКОТ. Випуск 19(2014). – Донецьк: ДонНТУ. – С. 62 – 71.
4. Григорьев А.В. Унифицированная концептуальная модель предметной области // Информатика, кибернетика и вычислительная техника. Выпуск 1. Донецк: ДонНТУ, 1997. – С. 225 – 228.
5. Григорьев А.В. Состав параметров адаптации на проблемную область в инструментальной оболочке для

6. Тьугу Э.Х. Концептуальное программирование. – М.: Наука. 1984. – 256 с.

7. Нариньяни А.С. Недоопределенность в системах представления и обработки знаний // Техн. кибернетика, 1986, № 5. – С. 3 – 28.

8. Вельбицкий И.В. Технологический комплекс производства программ на машинах ЕС ЭВМ и БЭСМ-6. – М.: Статистика, 1980.

9. Григорьев А.В. Теоретико-множественные операции над грамматиками как механизм работы со знаниями в интеллектуальных САПР // Вісник СХУ ім. В. Даля, № 2(48). Луганск: ВУТУ, 2002. – С. 186 – 194.

10. Реуцкий В.А., Гельман А.Ю., Григорьев А.В., Марков А.И., Карабчевский В.В. Пакет программ функционально-логического проектирования микропроцессорных систем. Техника средств связи. 1989. Вып. 6. – С. 63 – 66.

11. Стефанюк В.Л., Жожикашвили А.В. МЕТА-ES (консультирующая мета экспертная система) // Программное обеспечение и прикладные системы искусственного интеллекта, Каталог выставки на II Всесоюзной конференции «Искусственный интеллект-90». Минск: ИВТС МГТПТО. – С. 116 – 120, 191.
12. Артемьева И.Л. Многоуровневые модели предметных областей и методы их разработки // Труды десятой национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2006. М: Физматлит, 2006. – С. 100 – 108.
13. Burke E.K., Kendall G., Newall J., Hart E., Ross P. and Schulenburg S. (2003) Hyper-Heuristics: An Emerging Direction in Modern Search Technology, Chapter 16 in *Handbook of Meta-Heuristics* (Eds. F. Glover and G. Kochenberger), Kluwer Academic Publishers. – pp. 457 – 474.
14. Валькман Ю.Р. Основные концепции построения аппарата исчисления моделей в исследовательском проектировании сложных объектов // Сборник научных трудов «Искусственный интеллект-94». Том 2. Рыбинск. 1994. – С. 255 – 262.
15. Гаврилова Т.А. Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. С.-Пб.: Питер, 2000. – 384 с.
16. Гаврилова Т.А., Голенков В.В. Бинарные семантические сети и приведение произвольной семантической сети к бинарному виду // Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2011. К.: Просвіта, 2011. – С. 180 – 186.
17. Кузнецов О.П. Однородные ресурсные сети I. Полные графы // Автоматика и телемеханика, 2009, № 11. – С. 136 – 147.
18. Кулик Б.А. Система логического программирования на основе алгебры кортежей // Изв. РАН, серия «Техническая кибернетика», № 3, 1993. С. 34 – 64.
19. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. – 288 с.
20. Ахо А., Ульман Дж. Теория синтаксического анализа, перевода и компиляции. Т.1. Синтаксический анализ. Пер. В.Н. Агафонова Под. ред. В.М. Курочкина. М.: Мир, 1978. – С. 614.
21. Семантика модальных и интенциональных логик. Сборник статей. Перевод с английского под ред. А.В. Смирнова. М.: Прогресс, 1981. – С. 424.
22. Кондрашина Е.Ю., Литвинцева Л.В., Поспелов Д.А. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Наука, 1989. – 328 с.
23. Еремеев А.П. Логика ветвящегося времени и ее применение в интеллектуальных системах поддержки принятия решений // труды десятой национальной конференции по искусственному интеллекту КИИ-2006. Т. 3. – М.: Физматлит, 2006. – С. 746 – 754.
24. Солодовников В.В., Тумаркин В.И. Теория сложности и проектирование систем управления. – М.: Наука. 1990. – 186 с.
25. Донской В.И. Логические продукционные системы: анализ и синтез // Техническая кибернетика и системный анализ, 1994, № 4. – С. 11 – 22.
26. Григорьев А.В. Представление недоопределенности знаний в инструментальной оболочке для построения САПР // Искусственный интеллект. № 1, 1999. – С. 96 – 106.
27. Григорьев А.В. Комплекс моделей САПР как система взаимосвязанных уровней о действительности // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия ИКВТ-2000, выпуск 10. – Донецк: ДонГТУ, 2000. – С. 155 – 167.
28. Григорьев А.В. Семиотическая модель базы знаний САПР // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем, выпуск 10: Донецк: ДонГТУ, 1999. – С. 30 – 37.
29. Григорьев А.В. Теоретико-множественные операции над грамматиками как механизм работы со знаниями в интеллектуальных САПР // Вісник СНУ ім. В. Даля, № 2(48). Луганськ, ВУТУ, 2002. – С. 186 – 194.
30. Григорьев А.В. Специфика выполнения теоретико-множественных операций над контекстно-свободными грамматиками в условиях различных форм дополнительных семантических правил в семиотической модели интеллектуальных САПР // Научные труды ДонНТУ. Серия МАП – 2006. Выпуск 5 (116). – Донецк: ДонНТУ, 2006. – С. 91 – 104.
31. Григорьев А.В., Малявка О.В. Обеспечение монотонности вывода и верификация баз знаний в инструментальной оболочке для создания интеллектуальных надстроек над САПР // Наукові праці ДонНТУ. Серія ІКОТ. Випуск 11(164). Донецьк: ДонНТУ. – 2010. – С. 161 – 164.
32. Григорьев А.В. Управление движением объектов в семиотической модели предметной области // Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 48: Донецк: ДонНТУ, 2002. – С. 280 – 287.

### References

1. Norenkov I.P. Vvedenie v avtomatizirovane proektirovanie tehnicheskikh ustrojstv i sistem [Introduction to Designing automatic technical devices and systems]. М.: Vs. shk., 1986. – 304 p.
2. Kleshhev A.S. Jekspertnye obolochki,

- osnovannye na znanijah [Expert shell based on knowledge] // Sbornik nauchnyh trudov III konferencii po iskusstvennomu intellektu. KII-92. T. 2. Kazan'. – pp. 119 – 121.
3. Grigor'ev A.V. Rasshirenaja postanovka zadachi problemnoj adaptacii intellektual'nyh SAPR [Problem statement problems adaptation intellectual CAD] // Naukovi praci DonNTU. Serija IKOT. Issue 19'(2014). – Donec'k: DonNTU. – pp. 62 – 71.
  4. Grigor'ev A.V. Unificirovannaja konceptual'naja model' predmetnoj oblasti [Universal conceptual model objects area] // Informatika, kibernetika i vychislitel'naja tehnika. Issue 1. Donec'k: DonGTU, 1997. – pp. 225 – 228.
  5. Grigor'ev A.V. Sostav parametrov adaptacii na problemnuju oblast' v instrumental'noj obolochke dlja avtomatizacii postroenija intellektual'nyh SAPR [Composition parameters for adaptation problems objects region in building a shell for automation intellectuals CAD] // Naukovi praci DonNTU. Serija IKOT-2011. Issue 14(185). – Donec'k: DonNTU. – pp. 252 – 261.
  6. Tyugu Je.H. Konceptual'noe programmirovanie [Conceptual programming]. – M.: Nauka. 1984. – 256 p.
  7. Narin'jani A.S. Nedoopredelennost' v sistemah predstavlenija i obrabotki znanij [Undefined systems and presentation of technical science] // Tehn. kibernetika, 1986, no. 5. – pp. 3 – 28.
  8. Vel'bickij I.V. Tehnologicheskij kompleks proizvodstva programm na mashinah ES JeVM i BJeSM-6 [Technologic complex production programs for computers and machines EC BESM-6]. – M.: Statistika, 1980.
  9. Grigor'ev A.V. Teoretiko-mnozhestvennye operacii nad grammatikami kak mehanizm raboty so znanijami v intellektual'nyh SAPR [Technologic complex production programs for computers and machines EC BESM-6] // Visnik SNU im. V. Dalja, no. 2(48). Lugansk: VUTU, 2002. – pp. 186 – 194.
  10. Reuckij V.A., Gel'man A.Ju., Grigor'ev A.V., Markov A.I., Karabchevskij V.V. Paket programm funkcional'no-logicheskogo proektirovanija mikroprocessornyh system [Package Programs functional-logical designing Microprocessor systems]. Tehnika sredstv svjazi. 1989. Issue 6. – pp. 63 – 66.
  11. Stefanjuk V.L., Zhozhikashvili A.V. META-ES (konsul'tirujushhaja meta jekspertnaja sistema) [META-ES (conceptual goal expert system)] // Programmnoe obespechenie i prikladnye sistemy iskusstvennogo intellekta, Katalog vystavki na II Vsesojuznoj konferencii «Iskusstvennyj intellekt-90». Minsk: IVTS MGTPTO. – pp. 116 – 120, 191.
  12. Artem'eva I.L. Mnogourovnevyje modeli predmetnyh oblastej i metody ih razrabotki [Multilevel model object areas and methods s development] // Trudy desjatoj nacional'noj konferencii po iskusstvennomu intellektu KII-2006. M: Fizmatlit, 2006. – pp. 100 – 108.
  13. Burke E.K., Kendall G., Newall J., Hart E., Ross P. and Schulenburg S. (2003) Hyper-Heuristics: An Emerging Direction in Modern Search Technology, Chapter 16 in *Handbook of Meta-Heuristics* (Eds. F. Glover and G. Kochenberger), Kluwer Academic Publishers. – pp. 457 – 474.
  14. Val'kman Ju.R. Osnovnye koncepcii postroenija apparata ischislenija modelej v issledovatel'skom proektirovanii slozhnyh ob"ektov [Main building a concept apparatus calculus models researches Designing complicated objects] // Sbornik nauchnyh trudov «Iskusstvennyj intellekt-94». Tom 2. Rybinsk. 1994. – pp. 255 – 262.
  15. Gavriloza T.A. Horoshevskij V.F. Bazy znanij intellektual'nyh system [Intellektual knowledge base systems]. S.-Pb.: Piter, 2000. – 384 p.
  16. Gavriloza T.A., Golenkov V.V. Binarnye semanticheskie seti i privedenie proizvol'noj semanticheskoi seti k binarnomu vidu [Binary semantic network and adduction arbitrary semantic network for Binar species] // Intellektual'nyj analiz informacii IAI-2011, K.: Prosvita, 2011. – pp. 180 – 186.
  17. Kuznecov O.P. Odnorodnye resursnye seti I. Polnye grafy [Homogeneous resorts sets. The full graphs] // Avtomatika i telemekhanika, 2009, no. 11. – pp. 136 – 147.
  18. Kulik B.A. Sistema logicheskogo programmirovanija na osnove algebrы kortezhej [The system is based on logical programming algebra tuples] // Izv. RAN, serija «Tehnicheskaja kibernetika», no. 3, 1993. – pp. 34 – 64.
  19. Pospelov D.A. Situacionnoe upravlenie: teorija i praktika [Situation Management: Theory and Practice]. M.: Nauka, 1986. – 288 p.
  20. Aho A., Ul'man Dzh. Teorija sintaksicheskogo analiza, perevoda i kompiljacii [Syntaxes Theory analysis, transfer and compliant]. T.1. Sintaksicheskij analiz. Per. V.N. Agafonova Pod. red. V.M. Kurochkina. M.: Mir, 1978. – P. 614.
  21. Semantika modal'nyh i intensional'nyh logic [Semantics modal in intensional and logic]. Sbornik statej. Perevod s anglijskogo pod red. A.V. Smirnova. M.: Progress, 1981. – P. 424.
  22. Kondrashina E.Ju., Litvinceva L.V., Pospelov D.A. Predstavlenie znanij o vremeni i prostranstve v intellektual'nyh sistemah [Knowledge representation of time and space in intelligent systems] / Pod red. D.A. Pospelova. – M.: Nauka, 1989. – 328 p.
  23. Eremeev A.P. Logika vetvjashhegosja vremeni i ee primenenie v intellektual'nyh sistemah podderzhki prinjatija reshenij [Logic branching of time and its application in intellectual systems support adoption of decisions] // trudy desjatoj nacional'noj konferencii po

- iskusstvennomu intellektu KII-2006. T. 3. – M.: Fizmatlit, 2006. – pp. 746 – 754.
24. Solodovnikov V.V., Tumarkin V.I. Teoriya slozhnosti i proektirovanie sistem upravleniya [Designing Theory and complexity of management]. – M.: Nauka. 1990. – 186 p.
  25. Donskoj V.I. Logicheskie produkcionnye sistemy: analiz i sintez [Logic production systems: analysis and synthesis, commercial] // Tehnicheskaja kibernetika i sistemnyj analiz, 1994, no. 4. – pp. 11 – 22.
  26. Grigor'ev A.V. Predstavlenie nedoopredelennosti znaniy v instrumental'noj obolochke dlja postroenija SAPR [Presentation of uncertain known in instrumental shell for building a CAD] // Iskusstvennyj intellekt. no. 1, 1999. – pp. 96 – 106.
  27. Grigor'ev A.V. Kompleks modelej SAPR kak sistema vzaimosvjazannyh urovnej o dejstvitel'nosti [As complex CAD models system interconnected level of reality] // Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. Serija IKVT-2000, issue 10. – Doneck: DonGTU, 2000. – pp. 155 – 167.
  28. Grigor'ev A.V. Semioticheskaja model' bazy znaniy SAPR [Semiotic base model known CAD] // Sbornik nauchnyh trudov DonGTU. Serija: Problemy modelirovanija i avtomatizacii proektirovanija dinamicheskikh sistem, vypusk 10: Doneck: DonGTU, 1999. – pp. 30 – 37.
  29. Grigor'ev A.V. Teoretiko-mnozhestvennye operacii nad grammatikami kak mehanizm raboty so znaniyami v intellektual'nyh SAPR [Set-theoretic operations on grammars as a mechanism to work with intellectual knowledge in CAD] // Visnik SNU im. V. Dalja, no. 2(48). Lugans'k, VUTU, 2002. – pp. 186 – 194.
  30. Grigor'ev A.V. Specifika vypolnenija teoretiko-mnozhestvennyh operacij nad kontekstno-svobodnymi grammatikami v uslovijah razlichnyh form dopolnitel'nyh semanticheskikh pravil v semioticheskoy modeli intellektual'nyh SAPR [Specificity Set-theoretic perform operations on context-independent grammar in conditions DIFFERENT forms additional semantic rules in semiotic model intellectual CAD] // Nauchnye trudy DonNTU. Serija MAP – 2006. Issue 5 (116). – Doneck: DonNTU, 2006. – pp. 91 – 104.
  31. Grigor'ev A.V., Maljavka O.V. Obespechenie monotonnosti vyvoda i verifikacija baz znaniy v instrumental'noj obolochke dlja sozdaniya intellektual'nyh nadstroek nad SAPR [Providing output monotony and verification of knowledge bases in instrumental shell to create intelligent CAD add-on] // Naukovi praci DonNTU. Serija IKOT. Issue 11(164). Donec'k: DonNTU. – 2010. – pp. 161 – 164.
  32. Grigor'ev A.V. Upravlenie dvizheniem ob"ektov v semioticheskoy modeli predmetnoj oblasti [Manage objects in motion semiotic model objects area] // Obchisljuval'na tehnika ta avtomatizacija. Issue 48: Doneck: DonNTU, 2002. – pp. 280 – 287.

*Григор'єв О.В. «Концептуальна модель предметної області інструментальної оболонки для автоматизації побудови інтелектуальних САПР». Розглядається задача побудови комплексу методів і засобів для автоматизації побудови інтелектуальних САПР. З цією метою описуються: побудова ряду параметрів проблемної адаптації спеціалізованої інструментальної оболонки для автоматизації побудови інтелектуальних САПР на специфіку предметної області; дослідження низки існуючих інструментів побудови необхідної оболонки з метою сформулювати комплекс необхідних методів; власне побудова комплексу нових методів і засобів; освітлення практичної ефективності роботи. Запропонована модель дозволяє підвищити ефективність процесів проектування технічних виробів в будь-яких предметних областях.*

**Ключові слова:** інструментальна оболонка, концептуальна модель, предметна область, інтелектуальні САПР

*Grigoryev A.V. “The instrumental shell conceptual model domain to automate the intelligent CAD construction”. The complex methods and tools for building intelligent automation CAD construction problem reviewed. For this purpose, are described: the construction of number concern parameters to adapt a specialized tool shell for building intelligent automation CAD on the specific subject area; the study of number existing tools required for the shell constructing so as to form a set of necessary methods; the actual construction of a new methods and tools complex; practical efficiency lighting. The proposed model can improve the technical products design efficiency in all possible subject areas.*

**Key words:** shell instrumental, conceptual model, subject area, intelligent CAD

Статья поступила в редакцию 14.08.2014  
Рекомендована к публикации в журнале «Техн. наук А.А. Каргиным»



## Особенности формирования свойств модулей обработки периодических событий в системах реального времени

Достлев Ю.С.

Донецкий национальный технический университет  
dostlev@cs.dgtu.donetsk.ua

*Достлев Ю.С. «Особенности формирования свойств модулей обработки периодических событий в системах реального времени». Выполнен анализ особенностей обработки периодических событий в системах контроля и управления технологическими процессами. Рассмотрены основные характеристики оценки качества контроля и управления непрерывными процессами методами периодизации обработки первичной информации и формирования управляющих воздействий. Рассмотрены особенности организации периодизации программной обработки информации в средах систем реального времени с учетом особенностей физических процессов автоматизируемого объекта. Изучены характеристики нарушений параметров реального времени в зависимости от способов организации управления периодическим их вызовом и информационным взаимодействием с контролируемым объектом. Выполнено обоснование выбора способа управления периодизацией в зависимости от особенностей параметров реального времени систем непрерывного автоматизированного контроля оперативного состояния динамических объектов.*

**Ключевые слова:** система реального времени, управление периодической обработкой, параметры систем реального времени, достоверность решения задач реального времени, супервизор задач реального времени.

### Введение

Системы реального времени (СРВ) являются аппаратно-программной основой построения всех автоматизированных систем контроля и управления параметрами реальных объектов. Решение любой задачи реального времени всегда базируется на организации информационного взаимодействия вычислительной среды системы с элементами реального объекта, участвующего в решении единой задачи контроля и управления – задачи автоматизации. Поскольку все параметры реальных сред обладают свойством непрерывности во времени, то цифровой вычислитель управляющей системы решает задачи контроля и управления в среде с дискретизацией значений переменных объекта.

В большинстве случаев используется синхронная дискретизация с постоянными значениями интервалов информационного взаимодействия – период обмена. Таким образом решение задачи в среде управляющего вычислителя может быть представлено как последовательность обработки событий реального времени (РВ).

Значения периодов обосновываются с учетом динамических характеристик непрерывных параметров, значения которых существенны для решения единой задачи автоматизации данного конкретного объекта.

Для обеспечения достоверности получаемого решения задачи автоматизации, в среде вычислителя требуется обработка множества

событий, количество которых определяется особенностями автоматизируемого объекта. При этом качество получаемого в цифровой среде решения, а соответственно и достоверность, во многом зависят от возможных нарушений параметров реального времени в организации событий реального времени.

### Особенности параметров обработки периодических событий

Кроме периодических событий дискретизации непрерывных параметров объекта, в данное множество включаются и события, порождаемые стохастическими изменениями состояний объекта. В большинстве случаев обработка таких событий является более приоритетной по сравнению с обработкой периодических событий. В соответствии с этим обработка таких событий может быть реализована в режиме обработки прерываний, а соответственно прерывать решение модулей периодического решения задачи – инициативная обработка.

Наличие инициативной обработки, а также множество событий, имеющих различные значения периодов, приводит к значительной неопределенности в соответствии моментов наступления периодических событий и моментов начала их обработки. Несоответствие моментов наступления событий и моментов их обработки, является одним из основных факторов нарушений при решении задач реального времени (рис. 1).

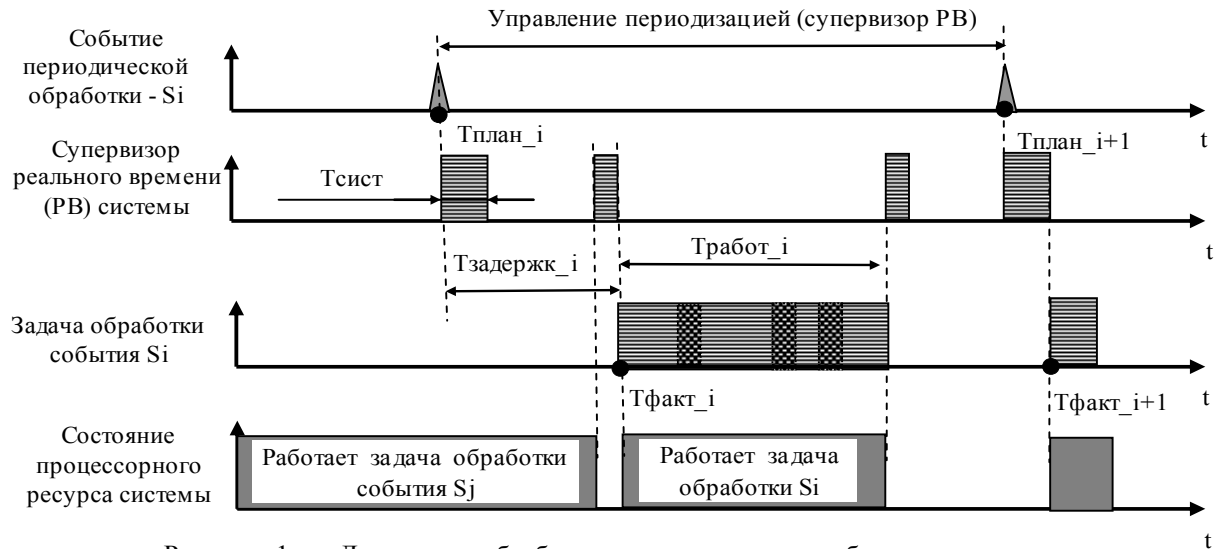


Рисунок 1. – Диаграмма обработки периодического события реального времени с интервалом нарушения

Существенным является количественное значение интервалов времени задержек ( $T_{\text{задержк}_i}$ ) в обработке событий реального времени, поскольку определяет степень нарушения периодичности обработки событий. Рассмотрим на примере диаграммы обработки периодического события реального времени интервалы возможных нарушений (рис. 1).

Интервал задержки состоит из двух составляющих:

$$T_{\text{задержк}_i} = T_{\text{сист}} + T_{\text{зд\_проц}}$$

$T_{\text{сист}}$  – интервал обработки события системным ПО РВ – супервизором РВ;

$T_{\text{зд\_проц}}$  – занятие процессорного ресурса, не позволяющее начать обработку текущего события.

Величина интервала  $T_{\text{сист}}$  определяется алгоритмической реализацией супервизора и для каждой системы РВ является значением приблизительно константным и несравнимо меньшим с интервалами обработки проблемных событий ( $T_{\text{сист}} \ll T_{\text{зд\_проц}}$ ) поэтому в дальнейшем будем рассматривать зависимость нарушений периодизации с исключением интервалов обработки событий системными средствами. Таким образом отсутствие задержек характеризуется совпадением плановых моментов наступления периодических событий с моментами фактического вызова задач их обработки

$$T_{\text{план}_i} = T_{\text{факт}_i}$$

При наличии задержек эти моменты не совпадают, и соответственно нарушаются интервалы времени между последующими сопряженными вызовами задачи периодической обработки относительно определяемого динамическими особенностями параметра объекта, которое в большинстве случаев должно быть константным ( $T_{\text{период}}$ )

$$(T_{\text{факт}_{i+1}} - T_{\text{факт}_i}) = \Delta T_{\text{факт}} \neq T_{\text{период}}$$

Отклонения интервалов вызова обработчика могут быть двухсторонними, то есть  $\Delta T_{\text{факт}} > T_{\text{период}}$  или  $\Delta T_{\text{факт}} < T_{\text{период}}$ .

Анализ особенностей динамических параметров реальных объектов с их отображением в дискретные значения программной среды управляющего вычислителя, приводит к выделению подмножеств, для которых направление отклонений от константности значения периода обработки являются существенными. Не учет таких ограничений приводит к снижению точности и достоверности решения единой задачи автоматизации [2].

В среде вычислителя СРВ моменты планового наступления событий определяются внутренними средствами на основе программирования параметров таймеров. Поэтому при проектировании СРВ актуальной является задача проведение анализа характеристик непрерывных параметров интерфейса вычислителя с объектом и адаптация системного ПО с индивидуальным способом организации планирования периодических событий и контролем их обработки.

В большинстве случаев достаточно все множество параметров РВ по динамическим характеристикам разделить на два подмножества: не инерционные с дискретно – интегральными характеристиками и инерционные со значительными значениями постоянных времени. В соответствии с этим для каждого подмножества необходимо обеспечить дискретизацию с параметрами, обеспечивающими максимальную достоверность получаемого решения единой задачи.

Параметры с дискретно-интегральными характеристиками требуют обеспечения константного значения вызовов задачи обработки на любом заданном интервале времени. Инерционные параметры предъявляют ограничение на минимальное значение интервала времени между сопряженными моментами их обработки.

С учетом приведенных основных требований к обработке различных параметров. В среде супервизора РВ должны быть реализованы две стратегии управления периодизацией. Характеристики стратегий организации периодической обработки событий оцениваются по двум критериям: число вызовов задач обработки на любом заданном интервале времени и константность значения минимального интервала

времени между последующими вызовами задачи обработки.

### Характеристики задач с различными способами организации периодической обработки событий

Для анализа характеристик периодизации вызова задач обработки рассмотрим диаграмму на рисунке 2.

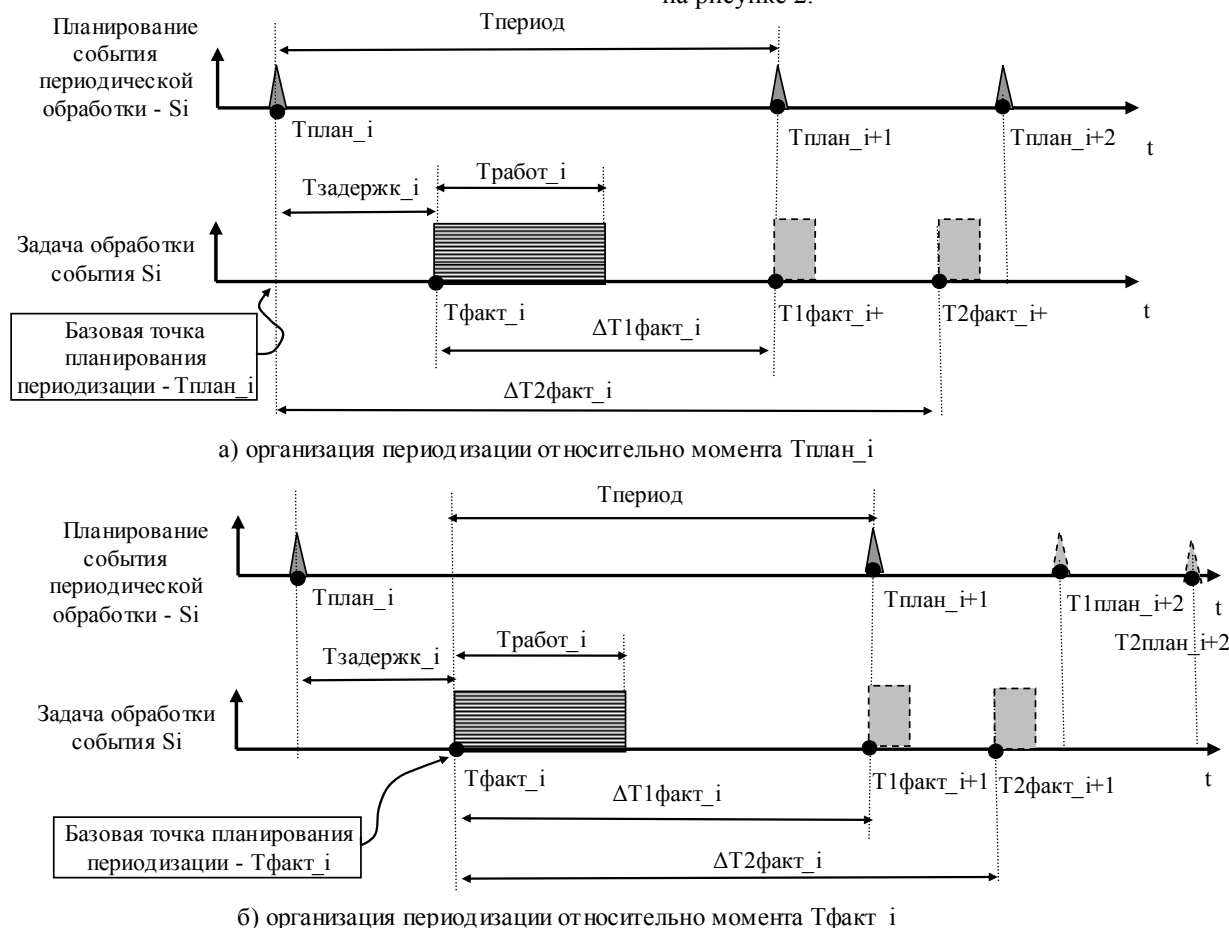


Рисунок 2. – Диаграммы организации периодизации относительно разных базовых моментов времени

Основным отличием способов управления периодизацией является выбор базовой точки отсчета периода для планирования следующего события.

В первом случае при назначении следующего момента планового события в качестве базовой принимаем момент предыдущего планового вызова

$$T_{\text{план}_{i+1}} = T_{\text{план}_i} + T_{\text{период}}$$

Во втором случае в качестве базовой принимается момент фактического вызова задачи обработки предыдущего события

$$T_{\text{план}_{i+1}} = T_{\text{факт}_i} + T_{\text{период}}$$

Выполним оценку характеристик периодизации задач в зависимости от выбора базовой точки планирования периодических событий по критериям в соответствии с ранее рассмотренными особенностями периодизации параметров РВ:

1) количество вызовов задачи обработки на любом заданном интервале времени –  $K_{\text{вызов}}$ ;

2) величина интервала времени между последующими вызовами задачи обработки –  $\Delta T_{\text{факт}}$ .

Для планирования периодизации относительно от  $T_{\text{план}}$ . По первому критерию гарантируется константное значение числа вызовов задач обработки на любом интервале решения (Треш), которое может быть рассчитано априорно до начала решения задачи

$$K_{\text{вызов}} = \text{Треш} / T_{\text{период}}$$

По второму критерию получаем диапазон возможных значений интервалов между последующими вызовами задачи обработки (рис.2.а  $\Delta T1_{\text{факт}} - \Delta T2_{\text{факт}}$ ):

$$\Delta T_{\text{факт\_мин}} = (T_{\text{период}} - T_{\text{задержк}});$$

$$\Delta T_{\text{факт\_мах}} = (T_{\text{период}} + T_{\text{задержк}}).$$

Для планирования периодизации относительно от Тфакт. По первому критерию число вызовов не константно и может изменяться в диапазоне:

$$K_{\text{вызов\_мин}} = T_{\text{греш}} / (T_{\text{период}} + T_{\text{задержк}});$$

$$K_{\text{вызов\_мах}} = T_{\text{греш}} / T_{\text{период}}.$$

По второму критерию получаем диапазон возможных значений интервалов между последующими вызовами задачи обработки (рис. 2.6  $\Delta T1_{\text{факт}} - \Delta T2_{\text{факт}}$ ):

$$\Delta T_{\text{факт\_мин}} = T_{\text{период}};$$

$$\Delta T_{\text{факт\_мах}} = (T_{\text{период}} + T_{\text{задержк}}).$$

### Применение

Способ управления периодизацией относительно  $T_{\text{план}}$  обладает константной стабильностью по критерию числа вызовов задачи обработки, но имеет большой разброс значений интервалов между последующими вызовами, значения которого зависят от недетерминированного параметра  $T_{\text{задержк}}$ .

Способ управления периодизацией относительно  $T_{\text{факт}}$  не гарантирует константного числа вызовов задач на интервале решения, но обладает свойством гарантированности константного минимального значения интервала между последующими вызовами.

*Достлев Ю.С. «Особливості формування властивостей модулів обробки періодичних подій у системах реального часу». Виконано аналіз особливостей обробки періодичних подій у системах контролю та управління технологічними процесами. Розглянуто основні характеристики оцінки параметрів контролю та управління безперервними процесами методами періодизації обробки первинної інформації та формування керуючих впливів. Вивчені характеристики порушень параметрів реального часу у відповідності до способів організації управління періодичним їхнім викликом та інформаційною взаємодією з об'єктом. Виконано обґрунтування вибору варіанта управління періодизацією у відповідності до особливостей параметрів реального часу систем безперервного автоматизованого контролю оперативного стану динамічних об'єктів.*

**Ключеві слова:** система реального часу, керування періодичною обробкою, параметри систем реального часу, достовірність рішення задач реального часу, супервізор задач реального часу.

*Dostlev Y.S. "Features of formation properties of processing modules periodic events in real-time". The analysis of real-time systems as the basis for building automation systems of technological objects. Consider the set of real-time events, the processing of which is a prerequisite for solving a single task automation. All events make up the interface of the calculator with a medium controlled or managed processes object. Recurring events allow the calculator to interface with the media object to the assessment of quantitative changes of states of the object in real-time pace. The reliability of the events provided by the specified boundaries exactly time parameters that characterize the event and are largely dependent on the characteristics of the dynamic characteristics of the specific parameters of the calculator interface with the object. The analysis of the characteristics of processing periodic events in monitoring systems and process control. The main characteristics of the evaluation of the quality control and management of continuous processes periodization methods of processing of the primary information and the formation of the control actions. The features of the organization of the periodization program information processing in real-time environments, taking into account features of the physical processes preseed object. The characteristics of violations of real-time parameters and depending on the organization of periodic control of their call and information exchange with the controlled object. Achieved rationale for the selection control method periodization, depending on features real-time parameters of the automated systems of continuous monitoring of operational status of dynamic objects.*

**Key words:** real-time control of batch processing, real-time parameters, the accuracy of real-time problem solving, supervisor real-time tasks.

При проектировании СРВ необходимо на основе анализа динамических характеристик интерфейсных параметров объекта, применять соответствующий способ управления периодизацией в среде системного ПО системы.

### Список литературы

1. Мартин Дж. Программирование для вычислительных систем реального времени. – М.: Наука, 1975.
2. Гусев Б.С. и др. Автоматизация поточного контроля и учета проката на блюмингах комбината «Криворожсталь» // Металл и литье Украины, № 5 – 6. 2000. – С. 17 – 21.

### References (transliteration)

1. Martin Dzh. Programmirovaniye dlja vychislitel'nyh sistem real'nogo vremeni [Programming for real-time computing]. – M.: Nauka, 1975.
2. Gusev B.S. and dr. Avtomatizacija potocnogo kontrolja i ucheta prokata na bljumingah kombinata «Krivorozhstal'» [Automation in-line monitoring and accounting rolled on a blooming plant "Kryvorizhstal'"] // Metall i lit'e Ukrainy, no 5 – 6. 2000. – pp. 17 – 21.

Статья поступила в редакцию 16.07.2014

Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Ф.В. Недопекиным

## Модели данных для отдельных проблемно-ориентированных баз данных

Аверин Г.В., Звягинцева А.В.

Донецкий национальный технический университет  
averin.gennadiy@gmail.com, anna\_zv@ukr.net

*Аверин Г.В., Звягинцева А.В. «Модели данных для отдельных проблемно-ориентированных баз данных». Изучаются методы и средства феноменологического анализа данных для массивов эмпирической или статистической информации, отражающей в виде временных рядов процессы изменения и развития систем различной природы. Основная гипотеза исследования связана с возможностью создания на основе таблично-временных данных множества моделей в виде феноменологических описаний процессов и явлений, отличающихся многомерным полевым представлением массивов количественной информации, а также существованием скалярных полей эмпирических мер для комплексной оценки состояний систем. Данная гипотеза может быть принята или отвергнута на основе обработки имеющихся данных, наиболее адекватные модели могут быть выбраны из множества моделей с использованием полуавтоматических алгоритмов моделирования. Даны предложения по созданию программных продуктов для феноменологического анализа данных. Создание моделей данных позволит повысить эффективность деятельности ученых, аналитиков и экспертов при исследовании природных процессов и явлений, при анализе процессов мирового и регионального развития, при решении актуальных задач охраны окружающей среды, биоразнообразия и промышленной безопасности.*

**Ключевые слова:** сложные системы, анализ данных, моделирование, феноменологические модели, математическое и программное обеспечение.

### Введение

Сегодня феноменологические методы получили широкое распространение в физике сплошных сред и термодинамике. Данное направление в науке и технике имеет большое значение, так как позволяет предложить методы описания объектов и систем многомерной размерности, к которым относятся все природные, биологические и социальные системы, а также сложные технические объекты. Решение данной проблемы возможно в случае наличия данных наблюдений или опыта, которые могут быть представлены в виде обширных структурированных массивов количественной информации. Однако, кроме этого, требуются также новые методы описания такой информации и вычислительные средства для ее обработки и анализа.

Последнее время в целом ряде областей знаний много внимания уделяется созданию универсальных методов моделирования. На повестке дня стоит вопрос создания новой методологии прикладного моделирования, которая позволяла бы использовать общую структурно-логическую схему анализа и построения моделей данных по отношению к различным классам систем и явлений, исходя из применения фундаментальных принципов, общесистемных гипотез и закономерностей в развитии природы и общества. Несмотря на множество исследований в данной области,

существенного прогресса в решении данной проблемы пока не наблюдается.

Развитие методологии моделирования, охватывающей разные классы объектов и явлений, позволило бы разработать универсальные алгоритмы анализа данных и моделирования процессов и создать программные продукты, использование которых давало бы возможность исследователю создавать модели изучаемых систем.

Известно, что такие модели отличаются высоким уровнем формализации и универсальностью представления, они могут быть ориентированы на описание самых различных проблемно-ориентированных массивов количественной информации. На основе феноменологических моделей могут быть созданы средства прикладного описания систем, использующие большие массивы данных, а также разработано математическое обеспечение и вычислительные среды для анализа данных и моделирования различных классов систем. Все это в перспективе позволит привлечь множество ученых, экспертов и аналитиков в самых разных областях научной деятельности к анализу опытных и статистических данных и моделированию систем различной природы.

Объектом исследования в данной статье являются массивы данных в виде временных рядов количественных показателей, характеризующих процессы изменения и развития систем различной природы. В свою очередь, целью исследования является теория

прикладного феноменологического анализа таких данных и методы моделирования состояний систем, для которых имеется обширная совокупность результатов наблюдений или опыта.

### **Некоторые направления в области создания моделей данных**

В климатологии, глобалистике, оценке социально-экономического развития стран и регионов, охране окружающей природной среды и техногенной безопасности сегодня накоплены большие базы данных, позволяющие вести речь об установлении закономерностей процессов изменения и развития систем. Например, анализ данных социально-экономического развития стран и регионов мира не мыслим без информационных систем обработки данных. В этой области исследователь оперирует массивами данных, которые содержат сотни статистических показателей. Современная карта мира включает около 200 стран, многие из которых имеют административное деление на десятки регионов, республик, областей, округов, штатов, провинций, земель и т.д. В свою очередь, ретроспективная глубина данных может составлять десятки лет по каждому объекту с разбивкой на кварталы и даже месяцы. Аналогичным образом, в области изучения данных о климате планеты исследователь вынужден работать с файлами информации объемом от 5 до 20 терабайт, в которых хранятся данные о десятках величин в виде временных рядов с лагами в один час и ретроспективой в десятки лет.

Сегодня данные наблюдений или опыта обрабатывают в одном из известных программных продуктов для анализа информации: среда R, Statistica, SPSS, EpiInfo или в других программах для обработки специализированных данных. Подобный подход используется большинством исследователей, аналитиков и экспертов при анализе данных.

Ряд зарубежных ИТ-компаний разрабатывают методы описания и моделирования больших данных [1]. Например, в США в таких программах участвует ряд государственных организаций и частных компаний, тесно связанных с деятельностью Разведывательного сообщества. Такие разработки, как правило, относятся к продукции двойного назначения. В этой области наиболее известны продукты компаний Cloudera и Palantir Technologies, которые ведут работы по сбору и анализу данных о сетевой активности, изучению данных методами data mining, исследованию метаданных, выполнению аналитических работ в различных областях деятельности и осуществлению прогностических исследований.

Технологическая деятельность компании Palantir (<http://www.palantir.com>) связана с интеграцией содержимого различных баз данных для социальных и финансовых систем, выделением связанных фрагментов и получением аналитических выводов. Заказчиками на выполнение таких работ, чаще всего, являются армейские, военно-морские, и финансовые службы, а также полиция.

Технологически подобные продукты объединяют методы интеграции и представления разнородных данных по общей форме в одной базе данных, используют поисковые механизмы и разные способы составления запросов, применяют различные аналитические алгоритмы (генетические алгоритмы, эвристические алгоритмы поиска, нейронные алгоритмы, статистические методы и т.д.). Это позволяет предложить эксперту простой в использовании инструмент для анализа данных. Окончательные выводы по решению задачи принимаются экспертом или группой экспертов. Программное обеспечение компании Palantir рассчитано на высококвалифицированных экспертов, имеет открытый интерфейс, расширяемую архитектуру и возможности адаптации к прикладной области.

Вторым важным примером является проект Recorded Future, который в 2010 году начал выполняться за счет средств Google и инвестиционного фонда Разведывательного сообщества In-Q-Tel. Данный проект предполагает использование поисковика третьего поколения, который может вести поиск объектов и отражать связи между объектами и их характеристиками, осуществляет структурирование всего информационного поля поиска по интересующим событиям, мнениям и реакциям людей на эти события и дает возможность исследовать явные и латентные связи, анализировать тренды и вести оценку отношений и связей на информационном поле. В настоящее время Recorded Future используется в разведке и госбезопасности, а также в сфере бизнеса и финансов.

Третьим примером аналитических систем нового поколения является платформа Quid, которая позволяет вести научно-техническое прогнозирование и поиск исполнителей для решения задач в сфере развития технологий, используя патентные данные ведущих стран мира и информацию открытых научно-технических баз данных. Данная система уже построена с учетом качественной модели развития технических и технологических решений, которая получила название «техноценоза». Клиентами данной системы являются ведущие корпорации, разведывательные и военные структуры США.

Сегодня можно уже говорить о новых возможностях создания моделей данных применительно к некоторым видам баз данных. Например, компания Palantir Technologies в своих продуктах применяет онтологические модели данных, под которыми понимается логический подход к формализации знаний в определенной предметной области в виде схемы, отражающей структуру данных, состоящую из объектов, поделенных на классы, связей между ними, а также из правил и ограничений, принятых в этой области. Компания Quid Inc. применяет в известном продукте анализа данных Quid модель изучаемых систем, которая получила название «техноценоза». Компания Google формирует модели данных путем структурирования всего информационного поля изучаемых данных.

Авторы данной статьи предлагают в предметных областях использовать феноменологические модели данных в виде сред моделирования, для которых на основе изучаемых данных в каждом конкретном случае устанавливаются модельные зависимости и параметры. Все это позволяет предлагать новые методы анализа данных и создавать модели данных в прикладных областях. Подобные подходы широко используются в физике сплошных сред и термодинамике.

Данную идею образно можно пояснить на примере. Предположим, что мы имеем большую базу данных термодинамических свойств различных веществ, но не имеет теории их описания, то есть количественные модели данных отсутствуют. Применение существующих методов обработки данных не позволило бы разработать теорию термодинамики, которая интегрирует знания, полученные поколениями ученых. Статистические методы обработки данных, методы интеллектуального анализа данных и т.п. являются итерационным средством для поиска различных закономерностей, а модели количественных данных уже требуют значительного интеллектуального труда в течение длительного времени, благодаря чему определяются основные закономерности. Однако, так как теория термодинамики разработана, имеются эффективные алгоритмы, которые построены с учетом существующих термодинамических зависимостей и которые позволяют с высокой степенью достоверности определять термодинамические свойства веществ. Данные алгоритмы реализуются сегодня в различных современных программных продуктах для определения свойств веществ.

Исходя из имеющихся количественных данных в прикладных областях, необходимо развивать практику использования в исследованиях биологических и социальных

процессов естественнонаучных и информационных методов, основанных на феноменологических подходах анализа и описания опытных данных. Это будет способствовать повышению научного и технического уровня обработки опытной и статистической информации.

### **Примеры данных и источники информации**

В сети Интернет имеются структурированные данные для систем различной природы. Такие данные можно получить там, где есть стандартизованные методики сбора и обработки информации и применяются различные модели для оценки их точности и достоверности, используются методы сглаживания, описания и ассимиляции данных и т.д. Например, так формируются архивы климатических данных Всемирного климатического центра. Данные проходят сложные процедуры ассимиляции исходных данных, в результате чего создаются архивы повторного анализа данных (AMIP/DOE Reanalysis aka NCEP/NCAR R2, ERA-Interim, MERRA, 20CR – 20 Century Reanalysis).

В науках об обществе можно использовать данные международных организаций, которые приведены в таблице 1. Информация должна быть структурирована по общей форме и интегрирована в массив данных. Среди региональных баз данных социально-экономических величин в качестве примера можно выделить базу данных Государственной автоматизированной системы ГАС «Управление» Российской Федерации, которая включает в себя более 20 компонентов и аспектов развития, в которые сведены свыше 6000 социально-экономических показателей развития для всех регионов в территориальном разрезе и в динамике с 1995 года.

При изучении биоразнообразия, могут быть использованы следующие базы данных:

- глобальная база данных по биоразнообразию – GBIF. – Электр. ресурс. URL: <http://data.gbif.org/welcome.htm/>;
- The Animal Ageing and Longevity Database. – Электр. ресурс. URL: <http://genomics.senescence.info/species/>.

При изучении данных о характеристиках звезд могут быть использованы базы данных космических звездных каталогов, например, каталоги Hipparcos, Tycho, Tycho-2 и др. Существует также обширная база данных (<https://www.quandl.com>), где представлено более 12 миллионов временных рядов различных процессов и явлений.

Для указанных выше баз данных возможно создание феноменологических моделей данных.

Таблица 1. – Некоторые статистические базы данных о развитии стран мира

Название	Краткая характеристика	Адрес доступа
Статистика ООН	Статистика глобального и национального уровня, собранная ООН по различным аспектам развития стран	<a href="http://data.un.org">http://data.un.org</a>
Статистика Конференции ООН по торговле и развитию	Статистика в области международной торговли, инвестиций и развития экономики	<a href="http://unctad.org/en/Pages/Statistics.aspx">http://unctad.org/en/Pages/Statistics.aspx</a>
Статистика Международного валютного фонда	Статистические данные по всевозможным финансовым и экономическим показателям	<a href="http://www.imf.org/external/data.htm">http://www.imf.org/external/data.htm</a>
База данных Программы развития ООН	Статистические данные Программы развития ООН	<a href="http://hdr.undp.org/en/data">http://hdr.undp.org/en/data</a>
Статистика ВТО	База данных статистики для стран мира по торговой политике, доступам на рынки, экспорту и импорту	<a href="https://www.wto.org/english/res_e/status_e/status_e.htm">https://www.wto.org/english/res_e/status_e/status_e.htm</a>
Статистика Всемирного банка	Более 2000 показателей развития стран мира ретроспективной до 50 лет	<a href="http://data.worldbank.org/">http://data.worldbank.org/</a>
Справочник ЦРУ по странам мира	Подробная статистика и фактическая информация по всем странам мира	<a href="https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/">https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/</a>
Статистика Международного энергетического агентства (МЭА)	База данных стран мира по производству и потреблению основных источников энергии	<a href="http://www.iea.org/statistics">http://www.iea.org/statistics</a>
Статистика ООН по вопросам образования, науки и культуры (ЮНЕСКО)	Более 1000 индикаторов и данных по вопросам образования, грамотности, науки и технологий для более 200 стран	<a href="http://www.uis.unesco.org/Pages/default.aspx">http://www.uis.unesco.org/Pages/default.aspx</a>
Статистика статистической службы ЕС	Базы статистических данных по странам Евросоюза	<a href="http://ec.europa.eu/eurostat/help/new-eurostat-website">http://ec.europa.eu/eurostat/help/new-eurostat-website</a>
Базы данных Trading economics	Статистические данные по 196 странам для 300 000 показателей	<a href="http://Tradingeconomics.com">http://Tradingeconomics.com</a>

### **Предлагаемые методы анализа и моделирования данных**

Предлагаемые методы ориентированы на данные, представленные в виде таблично-временных массивов информации. Для целого ряда систем самой разной природы возможно формирование таких массивов информации. Обычно такие данные имеют структуру таблиц в виде матриц «объекты – параметры», причем множество таблиц ( $t$ ) упорядочено по времени, например, годам, месяцам, часам, секундам и т.д. В качестве объектов для систем определенной природы выступают однотипные объекты, например, вещества, организмы, биологические виды или особи, изделия, устройства, установки, здания, природные объекты одного класса, технические системы, близкие по технологии производства, профильные предприятия, города, районы, страны, граждане государств и т.д. В качестве параметров (показателей), отражающих свойства определенных видов систем, могут быть различные физические, химические, биологические, социально-экономические, природно-ресурсные, технологические или идентификационные величины, имеющие количественное измерение.

Исходя из сказанного выше, для определенного объекта каждый параметр в таблично-временном массиве данных будет представлен временным рядом из опытных точек в количестве ( $t$ ), которые задаются с определенным лагом. Структура таблично-временных данных показана на рисунке 1.

Таким образом, каждый объект в определенный момент наблюдения находится в некотором состоянии и характеризуется совокупностью параметров. Состояния объектов изменяются с течением времени. Подобный подход позволяет определить состояние объекта как совокупность его наблюдаемых свойств, параметры которых формируются под действием условий окружающей среды в конкретный момент времени.

На рисунке 2 показано место моделей данных в общем процессе построения модели объекта или процесса. Если процесс построения теории прикладной науки разделить условно на этапы: получение опытных данных, установление закономерностей, разработка теории, то модели данных являются составной частью феноменологии данной науки.



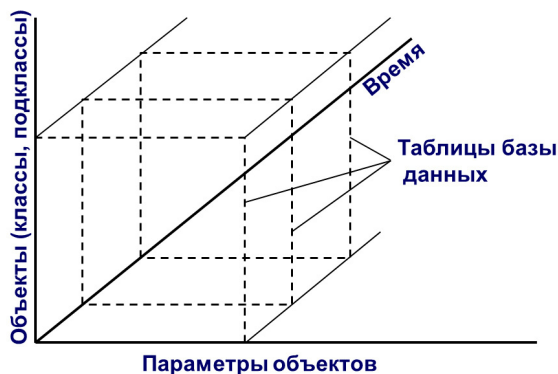


Рисунок 1. – Структура таблично-временных массивов данных

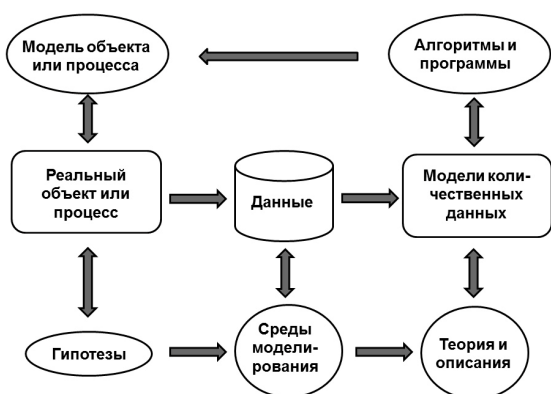


Рисунок 2. – Модели данных и модели объектов и процессов

Предположим, что для  $k$  однотипных объектов, формирующих систему определенной природы, в таблично-временных массивах данных содержится количественная информация о  $m$  параметрах, характеризующих множество самых различных свойств данной системы. Выберем из общего числа  $m$  всех параметров  $n$  атрибутивных показателей ( $n < m$ ), которые характеризуют базовые свойства изучаемых объектов, тогда имеющиеся массивы данных опыта или наблюдений могут быть отражены в  $n$ -мерном пространстве атрибутивных переменных  $p$  точками, где  $p = k \cdot t$ .

Перечень атрибутивных показателей определяется сложившимися в научном сообществе представлениями о поведении изучаемой системы, корреляционным анализом данных или другими методами установления наиболее значимых переменных. Количество объектов, параметров и таблиц не ограничивается и определяется только ресурсами вычислительной системы.

Любое множество  $n$  переменных для параметров свойств задает  $n$ -мерное пространство  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , являющееся

декартовым произведением областей значений всех переменных  $z_k$  данного множества. Точки этого пространства соответствуют  $n$ -мерным наборам значений всех переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . Таким образом, состояние любого объекта в  $n$ -мерном пространстве в каждый момент времени будет отображаться многомерной точкой  $M = M(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , процесс изменения состояния объекта во времени – многомерной кривой, которая описывается точкой  $M$  в этом пространстве.

Рассмотрим сложное совместное событие  $A_i$  одновременного наблюдения  $n$  параметров и определим, что состояние определенного объекта в заданный момент времени будет характеризоваться не только совокупностью параметров свойств для этого объекта, которые отображаются точкой  $M_i$ , но и данным наблюдаемым событием. Будем считать, что существует вероятность данного события. Назовем данную статистическую вероятность вероятностью состояния изучаемой системы. Статистические вероятности для сложного события  $A_i$  одновременного наблюдения  $n$  заданных параметров могут быть найдены с использованием различных алгоритмов перебора, группировки и подсчета частот благоприятных событий в общей выборке наблюдений. Существуют вычислительные алгоритмы, позволяющие для выборки из  $p$  наблюдений определить статистическую вероятность события  $A_i$  для каждой опытной точки  $M_i$  в наблюдаемом  $n$ -мерном пространстве переменных [2]. Основное условие для определения статистической вероятности связано с тем, что количество данных наблюдений должно быть достаточно большим, соизмеримым с числом  $N = d \cdot f^n$ , где  $f$  – число интервалов группирования данных для одной переменной, которое обычно принимается равным от 10 до 15, а  $d$  – число опытных данных на одном интервале группирования ( $d = 5 - 7$ ).

Существование статистических вероятностей сложных событий является основной вероятностной закономерностью реальной действительности и связано со свойством устойчивости относительных частот событий. Данное свойство справедливо для систем различной природы и является универсальной особенностью в поведении всех систем. Так как мы можем по обширным совокупностям результатов наблюдений алгоритмически определить статистическую вероятность состояния изучаемой системы, то в таблично-временных массивах данных можно искать вероятностные связи.

Следует отметить, что статистические вероятности наиболее характерных событий, отражающих особенности в изменении и развитии конкретных систем, могут выступать как некоторые комплексные характеристики систем. Поэтому каждой  $n$ -мерной точке в пространстве  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$  могут быть поставлены в соответствие вероятности различных характерных событий.

Можно пойти дальше и считать, как и в статье [3], что имеются самые разные комплексные характеристики, определяющие состояния систем наряду с параметрами свойств. Аналогичным образом каждой  $n$ -мерной точке могут быть поставлены в соответствие некоторые эмпирические величины, которые комплексно отражают состояния объектов и связаны с параметрами свойств. В общем случае назовем подобные величины эмпирической мерой состояний системы. Будем считать, что эмпирическая мера  $W$  может определяться в опыте на основе некоторых процедур измерений, оценок или расчетов. Величина  $W$  не может являться параметром одного из свойств системы  $z_1, z_2, \dots, z_n$ . В качестве эмпирической меры могут выступать различные комплексные величины, например, вероятность различных характерных событий, количество теплоты, температура, стоимость объектов, различные индексы, определяемые экспертным путем, опытные величины, имеющие тесную связь со многими параметрами свойств системы, и т.д.

Таким образом, на основе переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$  можно сформировать  $n$ -мерное пространство координат  $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ , в котором возможные состояния системы образуют некоторую область  $\Omega_n$ , охватывающую все наблюдаемые в опыте точки. Каждой точке  $M_i$  можно поставить в соответствие некоторую эмпирическую меру состояния  $W_i$ .

Первая фундаментальная гипотеза, которая принимается при построении количественных моделей данных, состоит в том, что мы предполагаем непрерывность области  $\Omega_n$ . Это означает, что в пространстве состояний  $\Omega_n$  существует бесконечное множество состояний для некоторой генеральной совокупности объектов системы определенной природы и точки состояний  $M(z_1, z_2, \dots, z_n)$  непрерывно заполняют это пространство. Будем также считать, что опытные точки  $M(z_1, z_2, \dots, z_n)$  являются ограниченной выборкой наблюдений из данной генеральной совокупности.

Вторая фундаментальная гипотеза предполагает существование некоторой эмпирической меры для комплексной оценки состояний изучаемой системы. Для построения моделей количественных данных принимаем гипотезу о непрерывности эмпирической меры в области  $\Omega_n$ . Другими словами мы предполагаем существование скалярного поля эмпирической меры в многомерном пространстве  $\Omega_n$  вида  $W = W(M)$ .

Все сказанное выше позволит сформулировать следующие аксиомы.

1. Пусть в пространстве состояний  $\Omega_n$  некоторой системы каждой точке  $M$  поставлено в соответствие действительное число  $W$ , которое будем называть эмпирической мерой состояния системы.

2. Величина  $W = W(M)$  является функцией точки и образует скалярное поле, которое является непрерывным в области  $\Omega_n$ .

Для построения модели описания процессов системы можно использовать гипотезу, что скалярное поле эмпирической меры  $W$  может быть аналитически описано в окрестности произвольной точки  $M$ . Будем считать, что вблизи точки  $M$  осуществляется процесс изменения состояния системы. Для задания скалярного поля эмпирической меры  $W = W(M)$  как функции независимых переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$  необходимо определить функцию точки. Предположим, что в области  $\Omega_n$  можно задать аналитическую непрерывную функцию  $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , на основе которой будет формироваться математическая модель. При известном виде функции  $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$  и значениях переменных  $z_1, z_2, \dots, z_n$  в области  $\Omega_n$  можно построить еще одно скалярное поле, которое будем называть средой моделирования.

Исходя из этого, в общем случае для построения феноменологической модели изучаемой системы сформулируем аксиому.

3. Пусть в пространстве состояний  $\Omega_n$  некоторой системы скалярные поля величин  $W$  и  $\theta$  однозначно связаны между собой. Если в окрестности любой точки  $M$  объект системы осуществляет некоторый процесс  $l$ , то для линии процесса  $l$  справедливо соотношение  $dW = c_l \cdot d\theta$ , где  $c_l$  – эмпирические величины, которые являются функциями процесса.

В ряде работ авторами показано, что аксиом (1) – (3) достаточно для построения феноменологических описаний данных, представленных таблично-временными массивами информации. Данные описания связаны с уравнениями Пфаффа вида [2, 3]:

$$dW = c_1 \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_1} \right) dz_1 + \dots + c_n \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial z_n} \right) dz_n, \quad (1)$$

где феноменологические величины  $c_l$  определяются по имеющимся данным наблюдений. Для многих классов функций  $\theta(z_1, z_2, \dots, z_n)$  решения уравнений Пфаффа позволяют получить общие интегралы, которые по своему виду близки к функциям состояния и широко используются в термодинамике – это энтропия и термодинамические потенциалы. Энтропия является характеристической функцией пространства состояний системы. Также в пространстве  $\Omega_n$  для целого ряда функций существует общий интеграл  $U(z_1, z_2, \dots, z_n) = C$ , который может выступать потенциалом пространства состояний системы.

Энтропия  $s$  и потенциал  $U$  являются естественными криволинейными координатами пространства состояний пространстве  $\Omega_n$  и могут быть приняты в качестве обобщенных характеристик для комплексной оценки состояния систем различной природы. Их наиболее важной особенностью является то, что данные величины являются функциями состояния системы при справедливости условия существования скалярного поля эмпирической меры  $W$ . Изменение данных функций зависит только от начального и конечного состояния системы и не зависит от пути перехода системы между этими состояниями.

В данном варианте построения теории важным является выбор среды моделирования  $\theta$ . В общем случае среда моделирования в области  $\Omega_n$  может быть представлена виде различных функциональных зависимостей относительно атрибутивных параметров: мультипликативными, степенными, аддитивными, экспертными или иными зависимостями, входящими в классы однородных или мультипликативных функций. Установлено [2], что при этих условиях среда моделирования  $\theta$  в пространстве  $\Omega_n$  для многих переменных позволяет при феноменологических описаниях использовать квазилинейные многомерные уравнения в частных производных первого порядка, которые тесно связаны с уравнениями Пфаффа.

Существует множество способов формирования различных сред моделирования и исследователь должен выбирать эти среды, исходя особенностей предметной области, принятых гипотез или предположений, сложившихся в научном сообществе представлений или интуитивных подходов.

Например, среда моделирования может быть представлена как многомерная геометрическая вероятность, как

мультипликативная степенная функция относительно параметров  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , из геометрических представлений однородности пространства  $\Omega_n$ , в виде экспертных зависимостей, т.е. соответственно в виде:

$$\theta = \beta \cdot \frac{z_1}{z_{10}} \cdot \frac{z_2}{z_{20}} \cdot \dots \cdot \frac{z_n}{z_{n0}}; \quad (2)$$

$$\theta = \beta \cdot \left( \frac{z_1}{z_{10}} \right)^{\alpha_1} \cdot \left( \frac{z_2}{z_{20}} \right)^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot \left( \frac{z_n}{z_{n0}} \right)^{\alpha_n}; \quad (3)$$

$$\theta = (z_1 - z_{10})^2 + (z_2 - z_{20})^2 + \dots + (z_n - z_{n0})^2; \quad (4)$$

$$\theta = \beta_1 \cdot \frac{z_1}{z_{10}} + \beta_2 \cdot \frac{z_2}{z_{20}} + \dots + \beta_n \cdot \frac{z_n}{z_{n0}}, \quad (5)$$

где  $z_{k0}$  – некоторые опорные значения переменных;  $\beta_k$  – весовые или стандартизированные коэффициенты. Может быть также предложено множество других видов сред моделирования.

Функции (2) – (5) входят в класс однородных функций, поэтому для них существуют решения уравнения (1). Для каждой такой функции определяется свой вид зависимости для энтропии и потенциала. Например, для среды моделирования (2) энтропия и потенциал имеют следующий вид:

$$s - s_0 = c_1 \cdot \ln \left( \frac{z_1}{z_{10}} \right) + \dots + c_n \cdot \ln \left( \frac{z_n}{z_{n0}} \right); \quad (6)$$

$$U - U_0 = \frac{z_1^2 - z_{10}^2}{c_1} + \dots + \frac{z_n^2 - z_{n0}^2}{c_n}. \quad (7)$$

Естественно, что при разработке программных продуктов необходимо создание библиотеки для выбора сред моделирования.

Из сказанного выше видно, что предлагаемый метод феноменологического анализа данных для массивов количественной информации тесно связан с логикой построения теории термодинамики, так как изначально вводятся феноменологически определяемые величины  $c_l$ , характеризующие процессы изменения состояний объектов. Множество данных величин для каждой элементарной области пространства  $\Omega_n$  определяется из соотношений  $dW = c_l \cdot d\theta$  при условии, что задана система определения величин  $W$  и  $\theta$ . Это позволяет с высокой точностью моделировать процессы изменения состояний систем различной природы на основе использования проблемно-ориентированных массивов информации и феноменологических описаний данных, особенно в случаях, когда имеется обширная совокупность результатов наблюдений или опыта.

Особенность предложенного подхода заключается в том, что исходные гипотезы могут быть приняты или отвергнуты на основе обработки данных опыта или наблюдений, характеризующих поведение той или иной системы. Подобная проверка носит итерационный характер и связана с перебором различных сред моделирования, определением феноменологических констант и оценкой критериев, определяющих точность моделей.

Данный подход, принятый при построении моделей данных, широко используется в термодинамике и физике сплошных сред. Естественно, что он может быть реализован и в других предметных областях. Например, для социально-экономических данных Программы развития ООН и Всемирного банка авторами в качестве примера была разработана методика и показана возможность построения феноменологических моделей развития стран в пространстве многих переменных. Решение отдельных тестовых задач при изучении развития стран мира показало, что данный метод позволяет построить феноменологическую теорию развития стран мира [4].

Аналогичным образом, были построены феноменологические модели при анализе и описании токсикологических данных, полученных при негативных воздействиях вредных веществ на животных и человека [2]. Все это указывает на перспективность данного направления исследований, ориентированного на построение моделей данных.

При справедливости принятых гипотез, которые могут быть проверены на исходной информации, изучаемые массивы данных могут служить основой для создания базы знаний в виде соотношений, характеризующих системы определенной природы.

### **Предложения по созданию программных продуктов для анализа данных**

Предложенные методы могут быть реализованы в программных продуктах, связанных с анализом данных. Работая с такой вычислительной средой эксперты и аналитики могут не только искать закономерности в данных, но и строить модельные описания данных, тем самым, создавая феноменологическую теорию для изучаемого класса систем. В процессе выполнения работ по построению феноменологических моделей данных необходимо провести большой объем вычислительных работ. Это связано с необходимостью перебора различных сред моделирования, алгоритмическим расчетом значений эмпирических мер, изучением различных связей в массивах информации и

определением феноменологических констант, поиском оптимальных моделей для описания данных, выполнением определенного набора однотипных расчетов для каждой таблицы базы данных. Поэтому видна необходимость автоматизации таких расчетов. Подобный программный продукт должен интегрировать несколько приложений и сред для хранения, обработки, анализа и описания данных:

- хранилище массивов данных для систем различной природы;
- приложение, которое обеспечивает ввод и импорт данных, характеризующих системы различной природы, а также преобразование входных количественных данных в формат для работы со средой анализа данных  $R$  и в собственный формат данных для работы с моделирующей средой продукта;
- среду анализа данных  $R$ , которая позволяет осуществить визуализацию данных, их предварительный анализ, провести исследование данных с целью установления особенностей и закономерностей, использовать более 5000 различных функций визуализации, обработки и анализа данных и т.д.;
- приложение для выделения атрибутивных параметров и формирования перечней таких параметров на основе методов установления значимых переменных;
- библиотеку для выбора сред моделирования при решении прикладных задач;
- вычислительную среду для анализа данных, поиска феноменологических закономерностей и моделирования процессов изменения систем различной природы;
- интерфейс для взаимодействия сервисов и работы вычислительной среды.

Исходя из сказанного выше, можно разработать математическое обеспечение и специальный программный продукт для феноменологического анализа данных и моделирования различных классов систем.

### **Выводы**

Таким образом, как видно из приведенного материала, для целого ряда предметных областей можно разработать феноменологические модели изучаемых систем. Предложенные методы позволяют разработать математическое обеспечение и вычислительные средства для описания количественных данных наблюдений или опыта. Это будет способствовать повышению научного и технического уровня обработки больших объемов количественной информации. Создание моделей данных позволит повысить эффективность деятельности ученых, аналитиков и экспертов при исследовании различных процессов и явлений.

### Литература

1. Аналитика двойного назначения // Открытые системы, № 10, 2013.
2. Аверин Г.В. Системодинамика. – Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с. – Электр. ресурс. URL: <http://www.chronos.msu.ru/ru/rrules/item/sistemodinamika-2> (05.07.14).
3. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Взаимосвязь термодинамической и информационной энтропии при описании состояний идеального газа // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. Донецк: Друк-инфо, 2013. №1 (4) – 2 (5). – С. 46 – 55. – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (11.07.14).
4. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины // Геотехническая механика. Днепропетровск, 2013. – Выпуск 112. – С. 257 – 270. – Электр. ресурс. URL: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru/2013-god/vypusk-112> (06.06.14).

### References (transliteration)

1. Analitika dvojnogo naznachenija [Analysis of dual purpose] // Otkrytye sistemy, no 10, 2013.
2. Averin G.V. Sistemodinamika [Systemdynamics]. – Doneck: Donbass, 2014. – 405 p. – Elektr. resurs. URL: <http://www.Chronos.msu.ru/ru/rrules/item/sistemodinamika-2> (05.07.14).
3. Averin G.V. and Zvjaginceva A.V. Vzaimosvjaz' termodinamicheskoi i informacionnoj jentropii pri opisani sostojanij ideal'nogo gaza [The relationship of the thermodynamic entropy and information in the description of the ideal gas] // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. Doneck: Druk-info, 2013. – no 1 (4) – 2 (5). – pp. 46 – 55. – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (11.07.14).
4. Primenenie metodov intellektual'nogo analiza dannyh pri ocenke razvitija Ukrainy [The use of data mining techniques in the evaluation of the development of Ukraine] // Geotekhnicheskaja mehanika. Dnepropetrovsk, 2013. – Issue 112. – pp. 257 – 270. – Elektr. resurs. URL: <http://geotm.dp.ua/index.php/ru/2013-god/vypusk-112> (06.06.14).

*Аверін Г.В., Звягінцева Г.В. «Моделі даних для окремих проблемно-орієнтованих баз даних». Вивчаються методи та засоби феноменологічного аналізу даних для масивів емпіричної або статистичної інформації, яка відображає у вигляді часових рядів процеси зміни й розвитку систем різної природи. Основна гіпотеза дослідження пов'язана з можливістю створення на основі таблично-тимчасових даних безлічі моделей у вигляді феноменологічних описів процесів і явищ, що відрізняються багатовимірним польовим поданням масивів кількісної інформації, а також існуванням скалярних полів емпіричних заходів для комплексної оцінки станів систем. Дана гіпотеза може бути прийнята або відкинута на основі обробки наявних даних, найбільш адекватні моделі можуть бути обрані з безлічі моделей з використанням напіваавтоматичних алгоритмів моделювання. Надано пропозиції щодо створення програмних продуктів для феноменологічного аналізу даних. Створення моделей даних дозволить підвищити ефективність діяльності вчених, аналітиків та експертів при дослідженні природних процесів і явищ, при аналізі процесів світового та регіонального розвитку, при вирішенні актуальних завдань охорони навколишнього середовища, біорізноманіття та промислової безпеки.*

**Ключові слова:** складні системи, аналіз даних, моделювання, феноменологічні моделі, математичне та програмне забезпечення.

*Averin G.V., Zviagintseva A.V. "Data models for certain problem-oriented databases". The paper studies phenomenological analysis methods and tools applicable to empirical or statistical information that in the form of time series reflects the change and development processes of different nature systems. The main research hypothesis is related to the possibility of using tabular-temporal data to create the set of models in the form of phenomenological descriptions of processes and events. The models differ from others by representing quantitative information with multidimensional field as well as existence of scalar fields of empirical measures for complex assessment of the system states. This hypothesis may be accepted or rejected based on the processing of available data. The most adequate models may be selected among the set of models using supervised modeling algorithms. The paper gives the proposals for creating phenomenological analysis software. The creation of data models may help to increase the effectiveness of the work conducted by researchers, analysts and experts during the exploration of natural processes and events, analyses of global and regional development processes, solving tasks of environmental protection, biodiversity and industrial safety.*

**Keywords:** complex systems, data analysis, modeling, phenomenological models, mathematical and software support.

Статья поступила в редакцию 07.08.2014  
Рекомендована к публикации д-ром техн. наук Ф.В. Недопекиным

## ***Раздел 4***

### ***Аналитические обзоры и обобщения***

## Системы оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха: попытка обобщения подходов

Звягинцева А.В.

Донецкий национальный технический университет

anna\_zv@ukr.net

**Звягинцева А.В. «Системы оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха: попытка обобщения подходов».** Дана характеристика существующих подходов к оценке опасности при загрязнении атмосферного воздуха, которые сформировались в экологическом и социально-гигиеническом мониторинге. Первый подход дает сравнительную оценку опасности по отношению к заданным нормируемым уровням загрязнения воздуха химическими веществами. Вторым подходом связан с оценкой опасности по данным проявления токсического процесса, исходя из непосредственно нанесенного вреда биологическим объектам. Анализируются основные положения, принципы и методы оценки опасности для обеих концепций. Оценка опасности в экологическом мониторинге основана на определении ограниченного перечня приоритетных веществ, контроле их содержания в воздухе, использовании санитарно-гигиенических норм и расчете индивидуальных и комплексных показателей загрязнения атмосферы. Оценка опасности при социально-гигиеническом мониторинге основана на анализе риска для здоровья человека при воздействии на него химических веществ, загрязняющих воздух и связана в основном с изучением характеристик и параметров токсических процессов и их проявлений. Оба подхода в конечной своей цели выходят на вероятностную оценку опасности на основе определения рисков негативных событий загрязнения воздуха или негативных эффектов при реализации этих событий. Анализируются также методы оценки риска при загрязнении атмосферы, исходя из определения вероятности сложных опасных событий, связанных как с превышением нормативных уровней загрязнения воздуха, так и с негативным действием вредных веществ на реципиентов. Сделана попытка обобщения существующих представлений об опасности загрязнения воздуха, а также охарактеризованы некоторые перспективные направления исследований в этой области.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферного воздуха; принципы, подходы и методы оценки опасности; экологический и социально-гигиенический мониторинг; анализ риска негативных воздействий.

*Наука начинается тогда, когда человек подходит к явлениям природы с числом и мерою*

*В.И. Вернадский*

### Введение

Системный подход в области охраны окружающей среды начал использоваться с начала 70-ых годов. Этому послужила публикация известной работы Ю. Одума «Основы экологии», в которой системный анализ экологических проблем был положен в основу изучения и охраны окружающей среды. Приблизительно в это же время широко стал применяться термин «мониторинг», под которым понимали систему наблюдений, позволяющую оценить изменения в состоянии биосферы под влиянием человеческой деятельности. Наблюдения за состоянием окружающей среды и биологическими организмами и системный подход к анализу проблем охраны природы свойственны всем современным экологическим исследованиям.

При этом следует отметить, что изучение загрязнения атмосферного воздуха занимает в этих исследованиях особое место, так как атмосферный воздух является самой важной жизнеобеспечивающей природной средой, а загрязнение приземной атмосферы – это основной, постоянно действующий фактор негативного воздействия как на человека, так и на биосферу в целом и все ее экологические системы. Выделение в атмосферу в глобальном масштабе все возрастающих количеств потенциально вредных газов и твердых частиц, а также ряд произошедших на протяжении последних столетий знаковых событий определили приоритетность охраны атмосферного воздуха.

Следует также отметить, что согласно данным ЮНЕП загрязнение атмосферы приводит к смерти 500 тыс. человек в год. Загрязненный воздух служит основной причиной возникновения 4–5 млн. новых случаев хронического бронхита ежегодно и многих миллионов случаев других заболеваний.

Экономические потери в связи с загрязнением воздуха составляют от 0,5 до 2,5% мирового ВВП.

В XX веке первым случаем трагической гибели людей при загрязнении атмосферы стала ситуация с выбросами вредных веществ в декабре 1930 года льежскими заводами в Бельгии, когда от отравления умерло шестьдесят человек и пострадало более тысячи.

В декабре 1948 года в городе Донора (США) от смога пострадало более двух тысяч человек. В течение полутора суток было зарегистрировано два десятка смертельных случаев среди населения города, сотни жителей чувствовали себя очень плохо. Спустя четыре года в декабре 1952 еще более трагический случай произошел в Лондоне. Из-за загрязнения воздуха угарным газом за пять дней погибло более 4000 человек, ещё 8000 человек погибло в последующие месяцы, более 100 тысяч человек заболели. Были приняты экстренные меры по охране атмосферного воздуха, однако, спустя десять лет, ситуация повторилась в декабре 1962 года. В эти дни многие жители Лондона впервые одели противогазы из-за смога. Число погибших достигло 106 человек.

В истории катастрофических аварий самым известным и масштабным случаем, связанным с загрязнением атмосферного воздуха, является Бхопальская катастрофа (1984). В результате аварийного выброса паров метилизоцианата на химическом заводе в индийском городе Бхопал погибло и умерло в последствии от болезней более 25 тысяч человек, а еще несколько сотен тысяч пострадали, причем многие стали инвалидами.

Поэтому за последние 40 – 50 лет, исходя из реальной опасности загрязнения атмосферы, проблеме охраны атмосферного воздуха уделялось особое внимание. В этой области выполнено множество научных исследований, сделаны важные открытия, разработаны методологии оценки опасности, предложены системы управления качеством атмосферного воздуха, разработано большое количество нормативных актов и затрачены колоссальные ресурсы на решение соответствующей проблемы.

Краткая история основных событий, исследований и разработок в области охраны атмосферного воздуха приведена в таблице 1.

Исходя из исторических данных видно, что научное направление, связанное с охраной атмосферы, является междисциплинарным и прикладным, так как сформировалось на стыке различных научных дисциплин: биологии, экологии, инженерной экологии, токсикологии, медицины, экологического мониторинга и наблюдений за состоянием окружающей среды, а также опыта и практики применения приборов и средств контроля. Все это привело к тому, что в этой области сформировались различные подходы к оценке опасности загрязнения

атмосферного воздуха, которые во многих аспектах пересекаются. Данные подходы привели к формированию целых научных и практических направлений, непосредственно связанных с экологическим и социально-гигиеническим мониторингом.

Экологический мониторинг как государственная система наблюдения, анализа, оценки и прогнозирования состояния окружающей природной среды является, с одной стороны, основой для обоснования управленческих решений, а с другой – системой, представляющей сведения о реальных параметрах и характеристиках окружающей среды [1 – 11]. Риск загрязнения природной среды оценивается на основе сравнения концентраций химических веществ, определенных при экологическом мониторинге, с безопасными уровнями, которые характеризуют различные виды воздействий на объекты.

Социально-гигиенический мониторинг направлен на установление, предупреждение, устранение или уменьшение факторов и условий вредного влияния среды обитания на здоровье человека в целях обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения [12 – 20]. Риск для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду, оценивается на основе определения значений вероятности развития и степени выраженности неблагоприятных последствий для здоровья нынешних и будущих поколений.

Целью данной статьи является анализ основных положений, принципов, существующих подходов и методов оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха химическими веществами, а также анализ различных концепций оценки опасности и риска в данной области.

Процедуры оценки опасности и риска при загрязнении атмосферного воздуха имеют большое значение, так как позволяют предупредить увеличение заболеваемости населения в крупных промышленных городах, сохранить биологические ресурсы промышленных регионов и предотвратить деградацию природных экосистем.

### ***Существующие подходы к оценке опасности загрязнения воздуха***

Анализ имеющейся литературы и исследований в области охраны атмосферы [21 – 49] позволяет выделить два основных концептуальных подхода при оценке опасности:

- оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга;
- оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсического процесса у биологических объектов.



Таблица 1. – Хронология основных событий, исследований и разработок в области оценки опасности и охраны атмосферного воздуха

Периоды и даты	События, исследования и разработки
1	2
IV–III век до н.э.	Первые упоминания об опытах на животных в сочинениях древних греков. Аристотель и Эразистрат одними из первых провели токсические опыты на животных.
37 – 68 годы н.э.	Римлянин Диоскорид классифицировал яды, выделив среди них животные, растительные и минеральные.
79 год н.э.	Во время извержения Везувия в Помпее от ядовитых выбросов погибло более 2000 человек.
1273	В средневековой Англии принят первый законодательный акт в истории охраны воздушной среды – закон о запрещении использования угля для отопления.
1493 – 1541	Врач-алхимик средневековья Парацельс (Геофраст фон Гогенгейм) выполнил первые исследования в области токсикологии и показал, что яд – это химическое вещество. В своих сочинениях он впервые пытался связать болезни рудокопов и литейщиков с профессиональными отравлениями свинцом, ртутью и сурьмой.
Середина XVII века	При Петре I в России приняты первые указы об охране воздуха, начаты ежедневные визуальные наблюдения за погодой.
1725	Созданы первые метеорологические наблюдательные сети России. Впервые проведены инструментальные метеонаблюдения академиком Ф. Х. Майером.
XVIII век	Первый трактат в области патологии и гигиены труда Б. Рамаццини «О болезнях ремесленников» (1700). Начало изучения состава воздуха и исследований различных газов на токсичность. Известный английский хирург Персиваль Потт (1786 – 1859) указал на токсичность сажи и риск заболеваний раком легких у трубочистов. Впервые стали преподавать токсикологию как самостоятельную дисциплину (Г.И. Блосфельд).
Начало XIX века	В России создана служба регулярных гидрометеорологических и магнитных наблюдений (академик А. Купфер, исследователи Ф. Литке, Ф. Врангель, М. Рейнеке и др.)
1824	Немецкий ученый Гольдфельд ставит опыты, в которых с помощью электричества осаждаются взвешенные в газах аэрозоли и твердые частицы.
1852	Английский химик Роберт Ангес Смит опубликовал данные по химическому составу дождей, выпадавших в окрестностях Манчестера в Англии, и впервые в своей книге «Воздух и дождь: начало химической климатологии» (1872) употребил термин «кислотный дождь».
1872 – 1880, 1882 – 1892	В Лондоне наблюдались отяжелевшие от дыма, копоти и химических выбросов туманы, получившие позднее название «смог».
1876	Парламентом Великобритании принят первый закон об опытах на животных.
1882	Учреждена Международная метеорологическая организация (ММО).
1883	Впервые токсикологом Максом Грубером установлены допустимые уровни воздействия монооксида углерода на животных и человека.
1882 – 1886	Созданы циклонный очиститель и рукавный фильтр для очистки выбросов на заводах.
1886	Токсикологом К. Б. Леманном и другими учеными начаты масштабные эксперименты на животных для определения допустимых уровней воздействия аммиака, хлористого водорода, хлорированных углеводородов и некоторых других вредных веществ.
1890-е годы	Создание в России метеорологических сетей Морского министерства, Министерства путей сообщения, сетей Уральского, Харьковского и Одесского общества естествоиспытателей и др. В начале 1890-х годов в стране насчитывалось 943 метеорологические станции.
1892	Исследованы многочисленными заболеваниями раком кожи среди рабочих, занятых в производстве каменноугольной смолы и дегтя.
1896	Первые работы по нормированию загрязнения атмосферного воздуха, выполненные Хиртом (США), который предложил использовать в качестве ПДК хлористого водорода в атмосферном воздухе значение 160 мг/м <sup>3</sup> .
1905	Впервые доктором Генри Антуаном де Во использован термин «смог» в статье «Туман и дым». Инженером Ф. Котрелем создан электрофильтр для цементной промышленности.
1911	Вышел в свет первый в России учебник по токсикологии Д.П. Косоротова.
1912	Ученым Кобертом опубликована таблица, содержащая информацию о предельных уровнях острого воздействия для 20 вредных веществ.
1921	В экспериментах на животных установлены допустимые нормы воздействий для 33 веществ, встречающихся на промышленных производствах.
1922	В СССР впервые в мире регламентированы предельно допустимые концентрации в воздухе рабочей зоны для трех веществ, а к 1941 году установлены ПДКр.з. для 80 веществ.

Продолжение таблицы 1

1	2
1920-е годы	Развитие отечественной промышленной токсикологии под руководством Н. В. Лазарева (1895 – 1974) и Н. С. Правдина (1882 – 1954).
1929	Создана Единая гидрометеорологическая служба СССР.
1930	Министерством труда СССР установлены максимально допустимые концентрации для 12 токсичных промышленных веществ.
1930 – 1950	В СССР заложены основы методологии гигиенического нормирования веществ в атмосферном воздухе населенных мест.
1934	Ученым Гэддэмом выполнены исследования зависимостей «доза-эффект» и проведена обработка опытных данных для некоторых вредных веществ. Блисс предложил для учёта уничтоженных пестицидами вредителей использовать метод пробит-анализа. Н. С. Правдиным выпущено в свет первое отечественное руководство по промышленной токсикологии.
1935	Токсикологи Сэйерс и Дэл Вэл описали физиологические эффекты, возникающие при воздействии 37 химических веществ при низких и высоких концентрациях.
1938	В СССР Н. В. Лазаревым изданы монография «Общие основы промышленной токсикологии» и фундаментальный справочник «Вредные вещества в промышленности».
1939, 1940	Подготовлены первые списки максимально допустимых концентраций (MACs) при воздействии химических веществ в промышленности.
1941	Составлен первый достаточно полный список норм максимально допустимых концентраций для почти 60 веществ, встречающихся на рабочих местах (ACGIH).
1945	На Международной конференции ООН в Сан-Франциско принято решение о создании Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ). Опубликован список MACs для 132 промышленных загрязняющих веществ, содержащихся в воздухе (Кук).
1947	Создана Всемирная метеорологическая организация ООН (WMO), осуществляющая глобальный мониторинг окружающей среды.
1949	В СССР сформулированы основные принципы санитарно-гигиенического нормирования химических веществ (А.Н. Сысин и С.Н. Черкинский). Составлен первый перечень ПДК для шести веществ (пыль, диоксид серы, монооксид углерода и др.). К 1968 году стандарты качества воздуха официально приняты в восьми, а к 1973 году – в 22 государствах.
1951	В СССР утверждены первые санитарно-гигиенические нормы ПДК вредных веществ в атмосферном воздухе (для 10 наиболее распространенных загрязнителей – сернистый газ, взвешенные вещества, диоксид азота, оксид углерода и др.).
1952	От смога при интенсивном сжигании угля в Лондоне скончалось за 5 дней более 4000 человек, ещё 8000 человек погибло позднее.
1957	Состоялась первая конференция ВОЗ по вопросам охраны здоровья населения в связи с загрязнением атмосферного воздуха.
1961	Управление по пищевым и лекарственным веществам США (FDA) предложило первую редакцию методики оценки риска канцерогенеза, обусловленного действием химвеществ.
1963	На базе сети наблюдений Гидрометеослужбы СССР начат контроль загрязнения атмосферы.
1965	В Чикаго (США) создана одна из первых автоматизированных систем контроля загрязнения атмосферного воздуха.
1966	В США принят первый закон о защите экспериментальных животных.
1971	Экспертами Научного комитета по проблемам окружающей среды предложен термин «мониторинг окружающей природной среды» (авторство принадлежит Р. Манну).
1972	В СССР создана общегосударственная служба наблюдений и контроля за загрязнением объектов природной среды (ОГСНК).
1975	Организована Глобальная система мониторинга окружающей среды под эгидой ООН.
1980	В США приняты национальные стандарты качества воздуха на содержание 6 веществ.
1984	Авария на заводе американской компании по производству пестицидов в г. Бхопал (Индия). В результате попадания в атмосферу 30 тонн метилизоцианата в течении суток погибло 3 тысячи человек, 11500 людей госпитализировано с тяжелой формой отравления.
1986	В Камеруне озеро Ниос при оползне выбросило большое облако диоксида углерода. В результате в ближайших селах задохнулось 1700 человек и 3500 голов скота. Ядерная катастрофа на Чернобыльской АЭС. Радиационному загрязнению подверглась площадь 131 тыс. км <sup>2</sup> с населением около 4 млн. чел. Впервые в Москве запущены в промышленную эксплуатацию три автоматических поста контроля загрязнения атмосферного воздуха.
1987	ВОЗ выпущено первое издание Критериев качества атмосферного воздуха.
1993	Сформирована Единая государственная система экологического мониторинга России (ЕГСЭМ).

В основе первого концептуального подхода лежит оценка опасности событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха, исходя из применения существующих гигиенических и санитарных норм [23 – 25, 27, 30, 50 – 59]. В этой области сформировались основные научные школы, которые направлены на исследования в области мониторинга воздушной среды, метеорологии, экологического нормирования, контроля загрязнения воздуха, изучения физико-химических процессов в атмосфере, теории опасности и риска и т.д.

Второй концептуальный подход основан на оценке опасности событий, связанных с возникновением негативных эффектов у биологических объектов при загрязнении воздуха [18 – 20, 41, 45 – 48, 60 – 83].

Здесь можно выделить научные школы, связанные с оценкой опасности токсического действия веществ, изучением характера и форм проявления токсических процессов на разных уровнях организации жизни, оценкой и характеристикой токсического процесса при ингаляционных воздействиях на человека, животных и растения, анализом рисков негативных воздействий и последствий для биологических организмов и т.д.

Сравнивая данные подходы, отметим, что граница разделения между ними относительно условна. Многие результаты, полученные в токсикологических и эпидемиологических исследованиях, используются при мониторинге атмосферного воздуха и оценке опасности уровня загрязнения. В свою очередь, данные о распространении атмосферных загрязнителей широко используются при оценке рисков токсикологических воздействий и анализе последствий токсических процессов у биологических объектов. Однако основное отличие заключается в том, что в первом случае преобладают физико-химические и экологические методы, а также естественнонаучные методы теории опасности и риска, которые применяются по отношению к основному объекту исследования – атмосферному воздуху, процессам изменения его состояния и связанными с этими процессами опасными событиями. Биологическая оценка уровня негативных воздействий вводится при данном подходе в методологию и практику через систему санитарно-гигиенического нормирования. Во втором случае применяются эпидемиологические, медицинские, биологические и токсикологические исследования, а также методы анализа опасности и риска по отношению к объекту исследования, в качестве которого выступают биологические организмы. Все это привело к тому, что в практической деятельности сформировались два прикладных направления, которые соответственно называют экологическим и социально-гигиеническим мониторингом. Эти направления отличаются

различной методологией, связанной с оценкой опасности при загрязнении воздуха, хотя многие методические положения обоих подходов являются общими.

Например, в основе обоих подходов лежат общие базовые понятия, в которых под *опасностью* обычно понимают совокупность постоянно действующих и случайно возникающих факторов в результате некоторого инициирующего события, либо при некотором стечении обстоятельств или формировании условий окружающей среды, оказывающих негативное воздействие на реципиентов. При этом *реципиент* – это объект живой или неживой природы (человек, животные, растения, биосфера, природные среды, ресурсы, здания, сооружения и т.п.). Используются также следующие общие определения.

*Опасный фактор* – физические, химические, биологические компоненты и явления живой и неживой природы, ресурсы или условия окружающей среды, способные вызвать неблагоприятные эффекты и негативные последствия у объектов воздействия при реализации опасности.

*Воздействие* – действие опасного фактора окружающей среды на уровне, создающем неблагоприятные эффекты и негативные последствия у реципиентов.

*Объект воздействия* – реципиенты, на которые воздействует опасный фактор окружающей среды.

*Окружающая среда* – совокупность природных, экономических, социальных, техногенных и других условий, в которых находится объект воздействия.

*Вредное вещество (примесь)* – вещество, которое при контакте с биологическим организмом может вызвать заболевания или другие неблагоприятные последствия в состоянии.

Применительно к вредному веществу используют следующие основные понятия.

*Порог вредного действия* – минимальная концентрация или доза вещества, при воздействии которой при определенных условиях в организме возникают изменения, выходящие за пределы физиологических приспособительных реакций, или скрытая (временно компенсированная) патология.

*Предельно допустимая концентрация* – содержание вредного вещества в окружающей среде на уровне границы безопасного воздействия, превышение которой может нанести непоправимый ущерб и вред реципиентам, а также качеству окружающей их среды.

*Токсичность* – способность вещества при его воздействии в определенных количествах на биологический организм вызывать негативные последствия различной степени тяжести (токсические эффекты, заболевания, повреждения, гибель).

*Неблагоприятный (вредный) эффект* – изменения в морфологии, физиологии, росте, развитии или продолжительности жизни организма, популяции или экологической системы, проявляющиеся в ухудшении функциональной способности или способности компенсировать дополнительный стресс, или в увеличении чувствительности к другим воздействиям факторов окружающей среды.

*Зависимость «доза-эффект»* – связь между дозой/концентрацией и степенью выраженности эффекта в экспонированной популяции.

Таким образом, опасность окружающей среды реализуется через опасный фактор, который может характеризоваться несколькими параметрами, например, концентрацией вещества в воздухе и временем его действия.

Оценка опасности часто осуществляется на основе определения риска, при этом *риск* – это вероятность возникновения неблагоприятных эффектов или негативных последствий у живого или материального объекта через действие опасных факторов окружающей среды.

*Ущерб (вред)* – наблюдаемое или ожидаемое нарушение состояния здоровья человека или негативные последствия для жизнедеятельности животных, растений или биосферы в целом, обусловленные воздействием неблагоприятных факторов окружающей среды.

Существуют также другие самые разные определения и понятия, свойственные, например, экологическому мониторингу – посты наблюдений (стационарные, маршрутные, передвижные); станции (сети, пункты) наблюдений; автоматизированные системы контроля; репрезентативность наблюдений; программы наблюдений (полная, неполная, сокращенная, суточная); приоритетные (основные, критериальные, обязательные, индикаторные) и специфические загрязняющие вещества; фоновое загрязнение; наблюдаемые и приземные концентрации; субъекты мониторинга и т.п.

В свою очередь, в социально-гигиеническом мониторинге применяют следующие важные определения и понятия – факторы среды обитания; вредные воздействия; референтные дозы/концентрации; санитарно-гигиенические нормативы; медико-демографические показатели; пороги действия, патологический процесс; интенсивность воздействия, степень тяжести; хроническое/острое/подострое воздействие; смертельные дозы/концентрации; допустимые уровни воздействия; экспозиция; вероятность неблагоприятного эффекта; параметры зависимости «доза-эффект»; риск (индивидуальный, приемлемый, канцерогенный, популяционный); факторы риска и т.д.

В целом обоим подходам свойственны общий и специфический понятийно-категорийный аппарат, общепринятая научная и практическая методология, спектр методов и методик исследования, свой определенный перечень нормативных актов и нормативно-методических документов, принятие систем управления качеством окружающей среды и т.д.

Рассмотрим более подробно указанные выше два подхода к оценке опасности загрязнения воздуха.

### **Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга**

Данный метод оценки опасности основан на определении перечня приоритетных и специфических веществ, контроле их содержания в воздухе населенных мест, использовании санитарно-гигиенических норм, оценке опасности загрязнения воздуха по различным характеристикам и параметрам изменения состояния загрязнения воздуха. Ведется также мониторинг опасных событий, связанных с загрязнением атмосферы. Конечным результатом данного подхода является комплексная оценка загрязнения атмосферы и получение исходных данных для разработки мероприятий по охране атмосферного воздуха.

Обычно государственные и ведомственные программы мониторинга качества атмосферного воздуха включают обязательный контроль приоритетных загрязняющих веществ на стационарных и передвижных постах. Например, в Украине в этот перечень входят пыль в виде взвешенных частиц, диоксид и монооксид азота, диоксид серы и оксид углерода. Среди специфических веществ осуществляется обязательный контроль формальдегида, бенз(а)пирена, тяжелых металлов. В России к этому списку приоритетных веществ добавляются также взвешенные вещества с размером 10 мкм и менее (PM<sub>10</sub>) и 2,5 мкм и менее (PM<sub>2,5</sub>), озон, а также углеводороды. В соответствии с местными особенностями населенных пунктов на стационарных постах ведется также наблюдение за специфическими загрязняющими веществами (например, аммиак, бензол, фенол, сероводород, фтористый водород, толуол и прочее). Контроль качества воздуха проводится в соответствии с утвержденным перечнем вредных веществ, который принят для каждого города в отдельности.

В США в число индикаторных загрязняющих воздух веществ (criteria pollutants) включены озон, монооксид углерода, диоксид азота, диоксид серы, взвешенные вещества и свинец. В свою очередь, в качестве приоритетных загрязнителей воздуха Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рекомендует контролировать взвешенные

(твердые) вещества, диоксид азота, диоксид серы, озон и другие фотохимические оксиданты.

Считается, что наиболее опасными загрязнителями воздуха являются тяжелые металлы. Наиболее приоритетными для химико-токсикологического анализа среди них являются: свинец (Pb), ртуть (Hg), никель (Ni), кадмий (Cd), цинк (Zn), кобальт (Co), медь (Cu), обладающие высокой токсичностью и миграционной способностью [22]. В США в число наиболее опасных включены также асбест, бериллий и винилхлорид [84].

Сегодня в Украине контроль загрязнения атмосферного воздуха ведется в 53 городах на 162 контрольных постах. При этом наблюдения за концентрациями пыли, диоксида азота и диоксида серы проводятся в 53 городах, оксида углерода – в 48 городах, формальдегида – в 43 городах, тяжелых металлов и бенз(а)пирена – в 50 городах, фенола и аммиака – в 23 городах, фтористого водорода – в 14, сероводорода – в 16, хлористого водорода – в 11 городах, сажи – в 6, растворенных сульфатов – в 19, серной кислоты, бензола, толуола, этилбензола и ксилола – в 2 городах, а также анилина в 1 городе.

В России в настоящее время сеть мониторинга качества воздуха включает 260 городов, в которых работает 710 станций, регулярные наблюдения Росгидромета проводятся в 226 городах на 649 станциях.

В Беларуси сеть мониторинга атмосферного воздуха охватывает 18 крупнейших городов и включает более 60 стационарных постов. На данных постах контролируется более 40 загрязняющих веществ.

Полученные фактические данные наблюдений по концентрациям веществ сравниваются с нормативами качества атмосферного воздуха. В области охраны атмосферного воздуха нормативы устанавливаются различными документами государственного уровня, например, [10, 19, 23 – 29, 54 – 59, 63, 85 – 87]. Стандарты качества воздуха, принятые в различных странах по отношению к человеку, приведены в таблице 2 [10, 23 – 25, 28 – 30, 56, 58, 59].

Исторически сложилось, что система экологического и санитарно-гигиенического нормирования, определяющая качество атмосферного воздуха и регламентирующая воздействие на биологические организмы загрязняющих веществ, в основном ориентируется на несколько видов объектов – человека, животных, растения, деревья, а также биоферу в целом. При этом для предотвращения негативных последствий в процессе нормирования определяются безопасные уровни воздействия. Научно

обоснованные безопасные уровни законодательно утверждаются в каждой стране, благодаря чему они переводятся в ранг национальных санитарно-гигиенических и экологических нормативов.

В странах бывшего СССР к гигиеническим нормативам допустимого содержания веществ в атмосферном воздухе относятся: предельно допустимые концентрации (ПДК), ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) и различные комплексные показатели.

В Украине, России и в большинстве стран постсоветского пространства система ПДК загрязняющих веществ для оценки качества атмосферного воздуха является наиболее апробированной. ПДК устанавливаются как для каждого вещества в отдельности, так и для совместного присутствия определенного сочетания вредных веществ в атмосферном воздухе [10, 23 – 30, 50 – 54, 56, 58, 59, 63]. Предельно-допустимые концентрации веществ в атмосферном воздухе населенных мест регламентируются в виде среднесуточной и максимально-разовой ПДК.

Среднесуточная предельно допустимая концентрация (ПДК<sub>с.с.</sub>) – это концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, которая не должна оказывать на человека прямого или косвенного воздействия при неограниченно долгом (годы) вдыхании. Таким образом, данная концентрация рассчитана на все группы населения и на неопределенно долгий период воздействия и, следовательно, является самым жестким санитарно-гигиеническим нормативом, устанавливающим концентрацию вредного вещества в воздушной среде. Величина ПДК<sub>с.с.</sub> в настоящее время выступает в качестве порога нормы для оценки благополучия воздушной среды в жилой зоне.

В свою очередь, максимально-разовая предельно допустимая концентрация (ПДК<sub>м.р.</sub>) – это концентрация вредного вещества в воздухе населенных мест, которая при вдыхании в течение 20 – 30 минут не должна вызывать рефлекторных (в том числе, субсенсорных) реакций в организме человека. Данную концентрацию устанавливают для тех веществ, которые обладают в большей степени рефлекторным и раздражающим действием. ПДК<sub>м.р.</sub> необходимы для предупреждения рефлекторных реакций у человека (ощущение запаха, изменение биоэлектрической активности головного мозга, световой чувствительности глаз и др.) при кратковременном воздействии вредных атмосферных примесей. Величина ПДК<sub>м.р.</sub> используется при установлении научно-технических нормативов – предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ.

Таблица 2. – Стандарты качества воздуха в разных странах мира

Загрязнитель	Вид нормативного значения за установленный период времени	Численное значение для страны, мг/м <sup>3</sup>									Рекомендации ВОЗ, мг/м <sup>3</sup>	
		Армения	Азербайджан	Беларусия	Грузия	Молдова	Россия	Украина	ЕС	США		
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	тах за 20 мин.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,35**		0,5 <sup>/</sup>
	среднее за 24 ч.	0,05	0,05	0,2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,125	0,365	0,125
	среднегодовое	–	–	0,05	0,02	–	–	–	–	0,05	0,087	0,02
Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )	тах за 20 мин.	0,085	0,085	0,25	0,20	0,085	0,20	0,20	0,20	0,20**		0,20**
	среднее за 24 ч.	0,04	0,04	0,10	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04		0,04
	среднегодовое			0,04					–	0,04	0,1	0,04
Твердые частицы, ТЧ <sub>10</sub>	тах за 20 мин.	–	–	0,15	–	–	0,30	–	–			
	среднее за 24 ч.			0,05		0,05	0,06	–	0,05	0,15	0,05	0,05
	среднегодовое			0,04				–	0,04	0,08	0,02	0,02
Твердые частицы, ТЧ <sub>2,5</sub>	тах за 20 мин.	–	–	0,065	–	–	0,16	–	–			
	среднее за 24 ч.	–	–	0,025	–	–	0,035	–	–	0,035	0,025	0,025
	среднегодовое			0,015			0,025	–	0,025	0,015	0,01	0,01
Пыль (суммарные взвешенные частицы)	тах за 20 мин.	0,5	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5			–
	среднее за 24 ч.	0,15	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15			–
	среднегодовое	–	–	0,10	–	–	–	–	–			–
Свинец (Pb)	тах за 20 мин.	–	0,001	0,001	0,001	–	0,001	0,001	–			
	среднее за 24 ч.	0,003	0,0003	0,0003	0,0003	–	0,0003	0,0003	–			
	среднегодовое			0,0001	0,00006				0,0005	0,0015 <sup>x</sup>	0,0005	0,0005
Оксид углерода (CO)	тах за 20 мин.	5	5	5	5	5	5	5	10 <sup>//</sup>	10 <sup>*</sup>		100 <sup>xx</sup>
	среднее за 24 ч.	3	3	3	3	3	3	3	–	40 <sup>**</sup>		30 <sup>**</sup>
	среднегодовое	–	–	0,5	–	–	–	–	–	–		10 <sup>*</sup>
Бензол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	тах за 20 мин.	1,5	1,5	0,1	–	–	0,3	1,5	–			
	среднее за 24 ч.	0,1	0,1	0,04	–	–	0,1	0,1	–			
	среднегодовое	–	–	0,01	–	–	–	–	0,005			0,006
Озон (O <sub>3</sub> )	среднее за 1 ч.	0,16	0,06	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,18	0,238		0,15 – 0,2
	среднее за 8 ч.			0,12					–	0,12 <sup>//</sup>	0,148	0,1
	среднее за 24 ч.	0,03	0,03	0,09	0,03	0,03	0,03	0,03	–			
Мышьяк (As)	тах за 20 мин.	–	–	0,008	–	–	–	–	–			
	среднее за 24 ч.	0,003	–	0,003	–	–	0,0003	0,003	–			
	среднегодовое			0,0008					6·10 <sup>-6</sup>			1,5·10 <sup>-6</sup>
Кадмий (Cd)	тах за 20 мин.	–	–	0,003	–	–	–	–	–			
	среднее за 24 ч.	0,0003	0,0003	0,001	–	–	0,0003	0,0003	–			
	среднегодовое			0,0003					5·10 <sup>-6</sup>			5·10 <sup>-6</sup>
Никель (Ni)	тах за 20 мин.	–	–	0,01	–	–	–	–	–			
	среднее за 24 ч.	0,001	–	0,004	–	–	0,001	0,001	–			
	среднегодовое			0,001					2·10 <sup>-5</sup>			
Бенз(а)пирен (C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> )	тах за 20 мин.	–	–	–	–	–	–	–	–			
	среднее за 24 ч.	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	5·10 <sup>-6</sup>	–	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	–			–
	среднегодовое			10 <sup>-6</sup>					–	10 <sup>-6</sup>		–

<sup>/</sup> – среднее за 10 мин.; <sup>xx</sup> – среднее за 15 мин.; <sup>\*\*</sup> – среднее за 1 час; <sup>\*</sup> – среднее за 8 часов; <sup>x</sup> – среднее за 3 месяца; <sup>//</sup> – максимальная концентрация в течении суток, рассчитанная по концентрациям, измеренным с 8-часовым осреднением; <sup>\</sup> – время осреднения: единичный риск/продолжительность жизни; ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения.

Важной характеристикой является также класс опасности вещества. Согласно ГОСТ 12.1.007-76 [88] все вредные вещества по степени воздействия на организм человека подразделяются на четыре класса опасности: 1 – чрезвычайно опасные, 2 – высокоопасные, 3 – умеренно опасные, 4 класс – малоопасные

В зависимости от показателя вредности атмосферные загрязнители подразделяются на 3 группы [60]:

- 1) преимущественно рефлекторного действия;
- 2) преимущественно резорбтивного действия;
- 3) рефлекторно-резорбтивного действия.

Для веществ первой группы устанавливается только одна максимальная разовая ПДК по рефлекторному действию, для веществ 2-ой группы – среднесуточная ПДК и в дополнение к ней максимальная разовая концентрация на уровне 98% вероятности ее появления в хроническом эксперименте, для веществ 3-ей группы устанавливаются максимальная разовая ПДК по рефлекторному действию и среднесуточная – по резорбтивному.

Под рефлекторным действием понимается реакция со стороны рецепторов верхних дыхательных путей: ощущение запаха, раздражение слизистых оболочек, задержка дыхания и т.д. Указанные эффекты возникают при кратковременном воздействии вредных веществ, поэтому рефлекторное действие лежит в основе установления ПДК<sub>м.р.</sub>

Под резорбтивным действием понимают возможность развития общетоксических, гонадотоксических, эмбриотоксических, мутагенных, канцерогенных и других эффектов, возникновение которых зависит не только от концентрации вещества в воздухе, но и от длительности его вдыхания. С целью предупреждения развития резорбтивного действия устанавливается ПДК<sub>с.с.</sub> или максимальная 24-часовая и/или средняя за длительный период (год и более).

В настоящее время в России разработаны и утверждены предельно допустимые концентрации в атмосферном воздухе населенных мест для 614 вредных веществ [56], а для более чем 1500 веществ приняты ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) [57]. В Белоруссии установлены нормативы ПДК загрязняющих веществ в атмосферном воздухе для 570 веществ и ОБУВ загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения для 1500 веществ [58]. В свою очередь, в Украине регламентированы нормативы ПДК для 509 веществ [23] и ОБУВ для 1326 веществ.

Следует различать понятия ПДК (предельно допустимые концентрации) и

предельные концентрации (целевые нормативы качества или предельные показатели).

В Европейском союзе нормирование качества атмосферного воздуха осуществляется путем установления именно стандартов качества, основанных на предельных величинах или целевых показателях. Принято, что страны-участницы ЕС могут ввести более строгие предельные или целевые показатели. Например, стратегия качества атмосферного воздуха 2007 года, реализуемая в Великобритании, устанавливает жесткие целевые показатели качества воздуха: с 2009 года предельные значения среднегодовой концентрации свинца установлены на уровне 0,25 мкг/м<sup>3</sup>, в то время как для большинства других стран ЕС это значение составляет 0,50 мкг/м<sup>3</sup>; в Шотландии предельное значение среднегодовой концентрации ТЧ<sub>2,5</sub> с 2010 года составляет 12 мкг/м<sup>3</sup>, в то время как для большинства стран ЕС – 25 мкг/м<sup>3</sup> и т.п.

В США установлены и приняты к использованию первичные и вторичные стандарты качества атмосферного воздуха. Первичными называются стандарты качества атмосферного воздуха, установленные и подлежащие соблюдению с целью охраны здоровья населения, включая чувствительные группы (к таковым отнесены, например, люди, страдающие астмой, дети, престарелые люди). Вторичными называются стандарты, установленные с целью защиты имущества людей, включая сокращение видимости, ущерб животным, урожаю, растениям и зданиям.

Допустимые нормы или правила, которые постепенно стали широко применяться как в Соединенных Штатах, так и в большинстве других стран, – это нормы, ежегодно издаваемые Американской конференцией гигиенистов государственной промышленности (American Conference of Governmental Industrial Hygienists – ACGIH), в ряде случаев они называются предельно допустимыми концентрациями (ПДК, англ. – *TLV<sub>s</sub>* (threshold limit value – величина порогового предела)) (LaNier 1984; Cook 1986; ACGIH 1994), [65].

В настоящее время в зарубежных странах (США, Канада) и международных организациях (ВОЗ, ФАО/ВОЗ, Комиссия европейского сообщества, Организация по экономическому сотрудничеству и развитию и др.) для человека разработаны референтные уровни воздействия для почти 1000 химических соединений. Причем около 20% референтных концентраций обоснованы с использованием клинических и эпидемиологических данных. Для химических веществ, загрязняющих атмосферный воздух населенных мест, референтные концентрации дифференцированы в зависимости от

продолжительности воздействия (от 5 минут до 24 часов) и степени тяжести возможных изменений состояния здоровья чувствительных подгрупп.

Важным биологическим объектом, для которого осуществляется нормирование качества воздуха, является растительность. В большинстве случаев растительность более чувствительна к вредным газам, чем человек [27, 52, 63, 78, 89 – 92].

Основой для определения потенциального вредного воздействия

загрязнения атмосферы на растительность является безопасный уровень, который представляет собой физические показатели загрязнения воздуха, ниже которых, в соответствии с нынешним уровнем знаний, не наблюдается значительного отрицательного воздействия на эти объекты. В таблицах 3 и 4 представлены показатели опасности и нормативы безопасных уровней воздействия загрязнителей воздуха на растения, принятые в постсоветских странах [27, 52, 63] и странах ЕС [30, 86, 93, 94].

Таблица 3. – Безопасные уровни и показатели опасности некоторых веществ при негативных воздействиях на биосферу, растительность и деревья вследствие загрязнения атмосферного воздуха, принятые в постсоветских странах

Название вещества (химическая формула)	Предельно допустимые концентрации (ПДК <sub>био</sub> , мг/м <sup>3</sup> ) по критерию вредного воздействия					
	Биосфера		Растительность		Деревья	
	средне-суточные	максимально-разовые	средне-суточные	максимально-разовые	средне-суточные	максимально-разовые
Фтор (F)	0,003	0,020	–	–	0,003	0,020
Формальдегид (НСОН)	0,003	0,020	–	0,020	0,003	0,020
Диоксид серы (SO <sub>2</sub> )	0,015	0,020	–	0,020	0,015	0,300
Хлор (Cl <sub>2</sub> )	0,015	0,025	–	0,025	0,015	0,025
Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )	0,020	0,040	0,020	–	0,040	0,040
Аммиак (NH <sub>3</sub> )	0,040	0,050	–	0,050	0,040	0,100
Сероводород (H <sub>2</sub> S)	0,080	0,080	–	0,080	0,080	0,080
Серная кислота (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	0,030	0,100	–	0,100	0,030	0,100
Бензол (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	0,050	0,100	–	0,100	0,050	0,100
Озон (O <sub>3</sub> )	–	0,100	–	0,100	–	–
Пыль	0,050	0,200	0,050	0,200	0,050	0,200
Оксид углерода (CO)	1,000	1,000	–	3,000	1,000	3,000

Таблица 4. – Нормативы ЕС по воздействию на растения

Объект воздействия	Годовая и зимняя средняя величина диоксида серы, мкг/м <sup>3</sup>	Среднегодовая величина оксидов азота (NO + NO <sub>2</sub> ), мкг/м <sup>3</sup>	Средняя за 20 дней за календарный год величина озона, мкг/м <sup>3</sup> ·ч
Посевы	30	–	–
Леса/растения	20	–	–
Чувствительные леса/растения	15	–	–
Лишайники	10	–	–
Большинство видов растений	–	30	17 000

Кроме концентраций и времени действия важным при оценке опасности загрязнителей воздуха является полная характеристика химического вещества, которая включает в себя химический класс вещества, знания о строении и особенностях молекул вещества, его физико-химических свойствах, общепринятых показателях опасности и т.д.

Общая оценка опасности проводится по характеристикам и параметрам изменения состояния загрязнения атмосферного воздуха,

по статистическим оценкам опасных событий, связанным с превышением показателей загрязнения санитарных норм, по интегральным показателям и комплексным характеристикам опасности смесей веществ, которые присутствуют в атмосферном воздухе и т.д.

Статистические оценки вероятности опасных событий и основные методы статистического анализа данных при мониторинге атмосферного воздуха определены Руководящим документом [10]. При этом



данные наблюдений за концентрациями примесей на стационарных и маршрутных постах, а также под факелами промышленных предприятий рассматриваются как совокупность случайных величин – единичных разовых показателей загрязнения атмосферы. Для систематизации и оценки уровня загрязнения атмосферы за рассматриваемый период обычно применяются различные статистические характеристики, например, среднее арифметическое значение концентрации примеси; среднее квадратическое отклонение результатов измерений от среднего арифметического значения; максимальное значение концентрации примеси; коэффициент вариации, показывающий долю изменчивости от среднего арифметического значения; а также другие статистические характеристики.

Кроме статистических характеристик в разных странах мира существует также множество интегральных и комплексных показателей загрязнения атмосферного воздуха, например, комплексный индекс загрязнения атмосферы (*КИЗА*), показатель загрязнения (*ПЗ*), предельно допустимое загрязнение (*ПДЗ*), суммарный показатель загрязнения атмосферного воздуха (*P*), индекс качества атмосферного воздуха *AQI* (Air Quality Index), *AQHI* (Air Quality Health Index), общий индекс качества воздуха *CAQI* (Common Air Quality Index), индексы *АТМО*, *ВЕЛАТМО*, *API*, *Z*, *Q*, *HI*, *H* и т.д. [10, 18, 19, 23, 34, 36, 43, 44, 95].

Например, в постсоветских странах для соответствующей оценки широко используется комплексный индекс загрязнения атмосферы [10]:

$$КИЗА = \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_i}{ПДК_{с.с.i}} \right)^{\beta_i}, \quad (1)$$

где  $n$  – число загрязняющих атмосферу веществ, учитываемых при определении индекса (обычно 5),  $C_i$  – среднегодовая концентрация  $i$ -ой примеси в воздухе;  $\beta_i$  – показатель вредности  $i$ -ой примеси, зависящий от класса опасности вещества (для веществ 1-го класса опасности равен 1,7; для веществ 2-го – 1,3; третьего – 1,0; четвертого – 0,9).

Данный индекс, как интегральный показатель, определяет не абсолютный, а относительный уровень загрязнения атмосферного воздуха изучаемой местности. Согласно принятой классификации по показателю *КИЗА* выделяют четыре категории опасности: класс нормы ( $КИЗА \leq 5$ ), класс риска ( $5 < КИЗА \leq 8$ ), класс кризиса ( $8 < КИЗА \leq 15$ ) и класс бедствия ( $5 < КИЗА \leq 8$ ). Таким образом, показатель *КИЗА* дает экспертную оценку уровня опасности загрязнения воздуха и никак не

связан с риском неблагоприятных эффектов при воздействиях на человека.

В Беларуси после 2006 года указанный индекс практически не используется для оценки интегрального загрязнения атмосферы (сейчас там применяют суммарный показатель загрязнения атмосферного воздуха  $P$  [44]). В то же время в других странах СНГ использование *КИЗА* продолжается. В частности, в России и Украине принципы интегральной оценки состояния воздушной среды по-прежнему базируются на расчете комплексного индекса (*ИЗА*), который связан методически с *КИЗА* [10].

В Украине, в соответствии с нормативным документом [23], введенным в действие МОЗ Украины в 1997 году, оценка загрязнения атмосферного воздуха проводится также с учетом кратности превышения показателя загрязнения (*ПЗ*) относительно нормативного значения предельно допустимого загрязнения (*ПДЗ*). Индекс *ПЗ* рассматривается уже как относительный интегральный критерий оценки загрязнения атмосферного воздуха, который характеризует интенсивность и характер совместного влияния всей совокупности присутствующих в нем вредных примесей. Оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха проводится путем сопоставления показателя загрязнения одним веществом или суммарного показателя загрязнения смесью веществ с показателем *ПДЗ*, который нормируется, исходя из пяти диапазонов опасности. Из расчета значений *ПЗ* определяется уровень и степень опасности загрязнения воздуха. Если значение  $ПЗ \leq 1,0 ПДЗ$ , то степень опасности загрязнения воздуха считается безопасной; если же  $1,0 ПДЗ < ПЗ \leq 2,0 ПДЗ$ , то степень опасности загрязнения – слабо опасной; если  $2,0 ПДЗ < ПЗ \leq 4,4 ПДЗ$  – умеренно опасной; если  $4,4 ПДЗ < ПЗ \leq 8,0 ПДЗ$  – опасной; и, наконец, если  $ПЗ > 8,0 ПДЗ$  – степень опасности загрязнения воздуха является очень опасной. *ПДЗ* определяется согласно ДСП-201-97 [23] с учетом перечня веществ, присутствующих в воздушной среде и экспериментально определенных и утвержденных в установленном порядке коэффициентов комбинированного действия.

Показатель загрязнения рассчитывается по формуле:

$$ПЗ = \sum_{i=1}^n \frac{ПЗ_i}{K_i}, \quad ПЗ_i = \left( \frac{C_i}{ПДК_{с.с.i}} \right), \quad (2)$$

где  $K_i$  – значения коэффициентов, которые учитывают класс опасности  $i$ -ого вещества и принимаются равными: для веществ 1-го класса опасности – 0,8; 2-го класса опасности – 0,9; 3-го класса опасности – 1,0; для веществ 4-го класса опасности – 1,1.

Показатель *ПЗ* может давать оценку уровня опасности загрязнения воздуха, однако норма кратности превышения *ПДЗ* введена временно, процесс накопления новых данных

идет очень медленно и субъекты государственного мониторинга данную норму используют существенно реже, чем комплексный индекс *КИЗА*.

В целом, все комплексные и интегральные показатели представляют собой расчетные величины на основе экспертных зависимостей, которые приняты в качестве нормируемых величин.

Как видно из приведенного материала, анализируемый в этом подразделе подход к оценке опасности ориентирован в основном на использование общепринятых санитарно-гигиенических норм (на приоритетности защиты прежде всего человека и возможности использования нормативов качества воздуха), а также на обязательном контроле приоритетных веществ и выборочном – специфических загрязнителей атмосферы. Все комплексные индексы представляют собой практически средневзвешенные количественные оценки опасности, основанные на применении тех или иных видов экспертных зависимостей. Причем данные зависимости определяют опасность нескольких воздействующих веществ, исходя из уровня загрязнения воздуха по отношению к действующим нормам.

Определенное распространение при комплексной оценке и анализе безопасности загрязнения атмосферного воздуха получила оценка риска по отдельным опасным событиям. В качестве событий рассматриваются случаи загрязнения воздуха, связанные с превышением установленных норм (например, среднесуточных или максимально-разовых ПДК) и заданных уровней загрязнения, равных пятикратному и десятикратному превышению предельно допустимых концентраций. Могут также рассматриваться случаи превышения показателей загрязнения относительно нормативных значений интегральных критериев. Для многих указанных выше случаев загрязнения воздуха определяются относительные частоты наблюдаемых событий, которые также являются оценкой опасности загрязнения атмосферного воздуха.

Оценка риска также может проводиться по изучению комплексных характеристик опасности смесей химических веществ с учетом изменения эффекта биологического действия при совместном воздействии двух и более веществ одновременно (аддитивное, синергетическое, антагонистическое действия). Однако, такая оценка проводится на основе экспертных методик, обобщающих некоторые наблюдения сложных опасных событий, связанных с загрязнением воздуха.

Подход, связанный с оценкой рисков опасных событий, отличается наличием

определенных методических обоснований и тесной связью с натурными наблюдениями [10]. Методика оценки рисков опасных событий загрязнения воздуха, а также самые разные статистические характеристики, которые применяются для оценки, приведены в Руководстве [10]. Однако область оценки рисков опасных событий в экологическом мониторинге развивается преимущественно как описательная наука, позволяющая устанавливать закономерности загрязнения атмосферного воздуха на основе обширного опытного материала. Работ, направленных на оценку рисков, связанных с превышением установленных норм, в зависимости от влияния различных факторов очень мало. Это связано с тем, что соответствующие эмпирические распределения могут быть определены для конкретных объектов (городов, территорий, постов) по временным рядам загрязнения воздуха, при этом влияющие факторы не всегда могут быть однозначно выделены и обобщены.

Поэтому основные проблемы в области оценки рисков опасных событий загрязнения атмосферного воздуха связаны с исключительным многообразием изучаемых факторов, проблемами классификации опасных событий и их вероятностей, неопределенностью и неоднозначностью многих данных наблюдений, а также широким многообразием математических моделей, направленных на описание рисков и их распределений. В настоящее время пока не существует общей методологии оценки риска опасных событий, которая могла бы быть использована в экологическом мониторинге, т.к. такая методология связана с комплексным анализом процессов загрязнения атмосферного воздуха по их вероятностным характеристикам.

Существующий подход к оценке опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным экологического мониторинга представлен в таблице 5. В данной таблице дается характеристика загрязняющих веществ и их свойств, а также приводятся существующие подходы к оценке опасности загрязнения воздуха.

Особо отметим, что данный подход не определяет опасность воздействия на биологические объекты исходя из непосредственно нанесенного вреда, а дает сравнительную оценку по отношению к заданным нормируемым уровням, средним условиям загрязнения или косвенно определяемым возможным эффектам воздействия. В каждой стране исторически данный подход представляет собой первый и очень важный этап при создании систем управления качеством атмосферного воздуха.

Таблица 5. – Система оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха химическими веществами по данным мониторинга загрязнения атмосферного воздуха

Загрязняющие вещества	Характеристика и свойства загрязняющих веществ	Оценка опасности загрязнения воздуха
<p>1) <i>приоритетные</i> (основные, критериальные, обязательные, индикаторные): взвешенные твердые частицы (пыль), диоксид серы (SO<sub>2</sub>), оксид углерода (CO), диоксид (NO<sub>2</sub>) и монооксид (NO) азота;</p> <p>2) <i>специфические</i>: фенол, аммиак, формальдегид, сероводород, бенз(а)пирен, тяжелые металлы (Pb, Hg, Cd, Cu, Zn, Fe, Mn, Ni, Cr), сажа, озон и другие фотохимические окислители, кислоты (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HF, HCl, HNO<sub>3</sub> и др.), углеводороды, например, бензол и его производные (толуол, этилбензол, ксилол, анилин) и другие ЛОС, а также CO<sub>3</sub> (фураны, диоксины, хлорорганические пестициды, инсектициды – всего 24 наименования).</p>	<p>1) химический класс;</p> <p>2) строение и особенности пространственной организации молекул вещества;</p> <p>3) физико-химические свойства вещества (молекулярная масса, агрегатное состояние, упругость пара, летучесть, растворимость, реакционная способность, стабильность, трансформация в атмосферном воздухе, фактор биоконцентрирования или биоаккумуляции, период полусуществования вещества, коэффициент диффузии);</p> <p>4) показатели опасности вещества (кас токсичности (опасности), степень вредности);</p> <p>5) концентрация и время нахождения загрязняющего вещества в атмосферном воздухе.</p>	<p>1) по приоритетности веществ, повсеместности и постоянству их присутствия;</p> <p>2) по характеристикам и параметрам изменения состояния загрязнения воздуха:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– по уровню концентрации за установленный период времени по сравнению с нормами;</li> <li>– по статистическим характеристикам наблюдаемых величин (среднее, среднеквадратическое отклонение, коэффициент вариации, максимальное) за год, за отдельные месяцы, за ряд лет (чаще всего 5);</li> <li>– по максимальным и средним наблюдаемым концентрациям в мг/м<sup>3</sup> (% , ppm, ppb), в долях ПДК/TLV;</li> <li>– по фоновым и приземным максимальным концентрациям примеси;</li> <li>– по тенденциям уровня загрязнения с учетом ретроспективных данных;</li> <li>– по комплексу показателей для приоритетных / наиболее опасных веществ (индексы ИЗА, КИЗА, ПДЗ, ПЗ, ПЗА, Р, Z, СИ, q, Q, HI, H, AQI, AQNI, BELATMO, CAQI, API, MAPI);</li> </ul> <p>3) по опасным событиям / по вероятности наблюдаемых опасных событий:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– по числу случаев превышения (за год, за месяц, по постам, по городу) разовыми (восьмичасовыми, среднесуточными, среднегодовыми) концентрациями: <ul style="list-style-type: none"> <li>а) установленных норм (ПДК/TLV);</li> <li>б) заданных уровней (5ПДК, 10ПДК);</li> </ul> </li> <li>– по повторяемости (наибольшей) концентраций в воздухе (% случаев за год, за месяц) выше: <ul style="list-style-type: none"> <li>а) установленных норм (ПДК);</li> <li>б) заданных уровней (5ПДК, 10ПДК);</li> </ul> </li> <li>– по кратности превышения (% случаев) показателей загрязнения (ПЗ) нормативных значений относительных интегральных критериев (ПДЗ);</li> </ul> <p>4) по комплексным характеристикам опасности смесей химических веществ с учетом изменения эффекта биологического действия при совместном воздействии двух и более веществ одновременно (аддитивное, синергетическое, антагонистическое действия).</p>

### Оценка опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсического процесса у биологических объектов

Наряду с описанным выше подходом оценки опасности в практике применяются подходы, основанные на оценке рисков воздействий загрязнителей атмосферы на биологические объекты. В некоторых странах существуют системы управления в области охраны атмосферного воздуха, которые связаны с изучением рисков токсического действия вредных веществ и заболеваемости населения.

Данный метод оценки опасности при воздействии на биологические объекты основан на изучении проявлений токсических

процессов. Токсичность проявляется и может быть изучена в процессе воздействия на биологические объекты разного уровня организации (органы, организмы, группы организмов, популяции и т.д.). В качестве объектов воздействия обычно рассматривается человек, животные, растения и биосфера. В настоящее время методики определения безопасных уровней воздействий (*ПДК*, *RfC*) построены на основе проведения токсикологических экспериментов на животных и иногда на людях [18 – 20, 37, 41, 45 – 48, 60, 61, 64 – 69, 73 – 77, 79 – 83, 100]. Для основных биологических объектов виды воздействий и принятые критерии для оценки риска обобщены в таблице 6.

Таблица 6. – Объекты негативного воздействия и критерии оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха

Объекты воздействия	Негативные эффекты	Виды воздействий	Количественные критерии и показатели для оценки опасности
человек	болезни органов дыхания, крови, заболеваемость сердечно-сосудистой и центральной нервной системы	хроническое	предельно допустимая среднесуточная концентрация вещества в атмосферном воздухе ( <i>ПДК<sub>с.с.</sub></i> ); максимально недействующая концентрация ( <i>МНК</i> ); референтная концентрация ( <i>RfC</i> ); пороговый уровень воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ( <i>NOAEL<sub>ch</sub></i> ).
		острое	референтный уровень острых ингаляционных воздействий на население ( <i>ARfC</i> ); пороговый уровень острого воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ( <i>NOAEL<sub>ac</sub></i> ).
	рефлекторные реакции	рефлекторное	предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе ( <i>ПДК<sub>м.р.</sub></i> ); порог ощущения запаха вещества
	онкологические заболевания, новообразования	канцерогенное	единичный риск ( <i>UR</i> ) для оценки канцерогенного действия вредного вещества или фактор канцерогенного потенциала ( <i>SF<sub>i</sub></i> ) при ингаляционных воздействиях
животные	отклонения биологических показателей и характеристик состояния организма от нормы или уровня фона; заболеваемость органов дыхания, крови, заболеваемость сердечно-сосудистой и центральной нервной системы и т.д.	хроническое	порог хронического общетоксического действия ( <i>P<sub>ch</sub></i> ); пороговый уровень воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ( <i>NOAEL<sub>ch</sub></i> )
		острое	пороговый уровень острого воздействия, при котором не наблюдается вредный эффект ( <i>NOAEL<sub>ac</sub></i> )
растительность, деревья	скрытые и хронические повреждения, снижение устойчивости фитоценозов	хроническое	предельно допустимая среднесуточная концентрация вещества в атмосферном воздухе для растительности ( <i>ПДК<sub>с.с.</sub></i> )
	острые повреждения и существенное снижение фиторазнообразия	острое	предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе для растительности ( <i>ПДК<sub>м.р.</sub></i> )
Биосфера	повреждение среды обитания и снижение устойчивости биосферы	хроническое	предельно допустимая среднесуточная концентрация вещества в атмосферном воздухе для биосферы ( <i>ПДК<sub>с.с.</sub></i> )
	значительные нарушения среды обитания и снижение биоразнообразия	острое	предельно допустимая максимально разовая концентрация вещества в атмосферном воздухе для биосферы ( <i>ПДК<sub>м.р.</sub></i> )

Оценка опасности негативного воздействия веществ связана с изучением характеристик и параметров токсического процесса на основе зависимостей «доза-эффект». Каждое вещество может отличаться широким спектром проявлений токсического процесса, особенностями воздействия на объекты и спецификой действия, основным видом токсического действия (общетоксическое, раздражающее, канцерогенное, аллергенное, мутагенное и т.д.), особенностями появлений токсического процесса, количественными показателями зависимости «доза-эффект» и т.д.

Оценка зависимости «доза-эффект» осуществляется чаще всего путем проведения экспериментов на животных [45, 47, 48, 53, 60 – 62, 64 – 68, 73, 74]. Такие эксперименты направлены на установление количественных характеристик и параметров этой зависимости, которая представляет собой связь между дозой/

концентрацией и степенью выраженности того или иного эффекта при токсическом воздействии.

Риск возникновения того или иного эффекта оценивают по частоте возникновения характерных опасных событий [60]. На основании опытных данных определяются параметры зависимости «доза-эффект», которая представляет собой логнормальную кривую, где процент животных с положительной реакцией на воздействие является функцией концентрации и времени действия вещества. В общем виде такая зависимость в координатах «логарифм концентрации – вероятность эффекта» имеет вид S-образной кривой, как это показано на рисунке 1. Основным параметром зависимости является величина среднеэффективной концентрации ( $EC_{50}$ ), при которой наблюдается негативный эффект у 50-ти процентах подопытных животных.

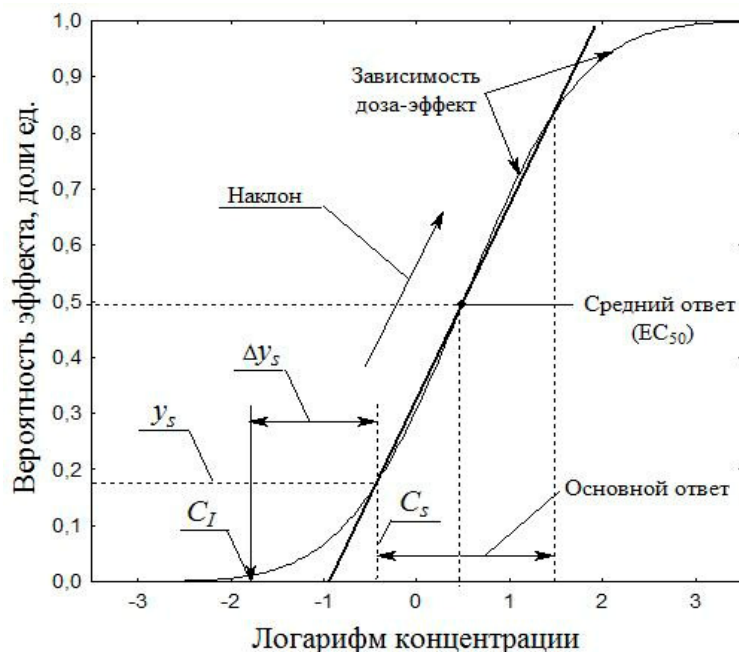


Рисунок 1. – Пример типовой зависимости «доза-эффект»

На основе методики, которую разработал Годдам [20], по зависимости «доза-эффект» можно оценить максимально недействующую концентрацию вредного вещества. Для этого на графике S-образной кривой выделяют участок, в пределах которого зависимость имеет линейный характер. Далее находят крутизну этой прямой ( $b$ ) по отношению к оси абсцисс и определяют пороговый эффект ( $y_s$ ) и безопасную концентрацию ( $C_l$ ):

$$y_s = t \cdot \delta ; \log(C_l) = \log(C_s) - \Delta y_s ; \Delta y_s = 6 \cdot \frac{\delta}{b}, (3)$$

где  $t$  – коэффициент Стьюдента;  $\delta$  – величина стандартного отклонения, определяемая из опыта. Максимально недействующую концентрацию ( $MHK$ ) принимают равной значению безопасного уровня  $C_l$ . Концентрацию  $C_s$  определяют по значению величины  $y_s$  [20, 60].

По интенсивности воздействия вероятностные зависимости «доза-эффект» определяются для различных видов воздействий, при этом реакции на загрязнение атмосферы могут иметь различные формы. В зависимости от времени и концентрации воздействия различают острое, подострое, хроническое воздействие [60].

Острое воздействие – кратковременное действие вредного или опасного фактора окружающей среды (не более 24 часов) на объекты живой природы, приводящее к резкому изменению биологических показателей на уровне целостного организма, которые выходят за пределы приспособленческих физиологических реакций, или такое действие, что вызывает необратимую деградацию экосистемы. Для данного вида воздействия данные о зависимости «доза-эффект» собираются в опыте при высоких значениях концентраций и малых временах действия вредного вещества.

Подострое воздействие характеризуется максимальной длительностью подострых экспозиций, которая составляет 10 – 12% средней продолжительности жизни, что соответствует для человека 8 годам, для крыс и мышей – 13 неделям. Концентрации веществ при подостром воздействии обычно меньше концентраций наблюдаемых при остром воздействии, но выше чем при хроническом.

Хроническое воздействие – длительное воздействие вредных или опасных факторов окружающей среды (превышающее 10 – 12 % средней продолжительности жизни), создающее угрозу жизни или приводящее к хроническим заболеваниям, скрытым повреждениям или физическим дефектам у объектов воздействия или наносящее им вред. Хроническое отравление связано с постепенным накоплением яда в органах и тканях. В данном случае данные о зависимости «доза-эффект» собираются в опыте при невысоких значениях концентраций и значительных временах действия вредного вещества (для мышей это 3 – 4 месяца).

По характеру воздействия на организм согласно ГОСТ 12.0.003-74 вещества подразделяются на:

- общетоксические – вызывающие отравление всего организма или поражающие отдельные системы (центральную нервную систему, систему кроветворения), а также вызывающие патологические изменения печени и почек (угарный газ, свинец, ртуть, бензол);

- раздражающие – вызывающие раздражение слизистых оболочек дыхательных путей, глаз, легких, кожных покровов (хлор, аммиак, оксиды серы и азота, озон);

- сенсibiliзирующие – действующие как аллергены (формальдегид, растворители, нитролаки);

- мутагенные – приводящие к нарушению генетического кода, изменению наследственной информации (свинец, марганец, радиоактивные изотопы);

- канцерогенные – вызывающие различные злокачественные опухоли и новообразования (ароматические углеводороды, хром, никель, асбест);

- влияющие на репродуктивную функцию (ртуть, свинец, стирол).

Три последних вида воздействия вредных веществ – мутагенное, канцерогенное, репродуктивное, а также ускорение старения, относят к отдаленным последствиям влияния химических соединений на организм. Подобное специфическое действие проявляется спустя годы, и даже десятилетия.

По характеру действия на организм также выделяют нейротропные и цитотоксические химические вещества.

Параметры токсикометрии вредных веществ лежат в основе их классификации по степени опасности. Как указывалось выше, промышленные яды в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 подразделяются на четыре класса опасности.

Принадлежность химических веществ к соответствующему классу опасности определяется величинами семи показателей (табл. 7, [60]). Определяющим является тот показатель, который свидетельствует о наибольшей степени опасности токсикометрии. Данные показатели позволяют также оценить параметры зависимости «доза-эффект» при различных видах воздействий.

В целом считается, что более опасны долговременные воздействия малых концентраций, чем кратковременные, но высокие значения концентраций веществ [22].

Самой сложной проблемой в токсикологии является проблема оценки порогов для всех видов воздействий вредных веществ как основы для гигиенического нормирования, особенно таких, как мутагенное, бластомогенное или сенсibiliзирующее действие химических веществ.

Таким образом, оценка опасности токсического действия загрязнителей атмосферного воздуха проводится по показателям, видам и характеристикам вредности химических веществ, по продолжительности и порогам вредного действия веществ, по характеристикам и параметрам зависимости «доза-эффект».

Таблица 7. – Параметры токсикометрии, используемые для установления опасности химических загрязнителей атмосферного воздуха

Показатели токсикометрии	Обозначение	Количественные критерии для класса опасности			
		I	II	III	IV
Средняя смертельная концентрация, мг/м <sup>3</sup>	$CL_{50}$	< 500	500 – 5000	5001 – 50000	> 50000
Средняя смертельная доза, мг/кг	$DL_{50}$	< 15	15 – 150	151 – 1500	> 1500
Зона острого действия	$Z_{ac}$	< 6	6 – 18	18,1 – 54	> 54
Зона хронического действия	$Z_{ch}$	> 625	625 – 126	125 – 25	< 25
Зона биологического действия	$Z_{biol}$	> 50000	50000 – 5001	5000 – 500	< 500
Зона специфического действия	$Z_{sp}$	> 9	9 – 3,1	3 – 1,0	< 1,0
Значение наименьшей величины порога хронического действия, мг/м <sup>3</sup>	$Lim_{ch}$	< 0,01	0,01 – 0,1	0,11 – 1,0	> 1,0
Значение максимально недействующей или минимально неэффективной концентрации (с учетом спонтанного фона), мг/м <sup>3</sup>	$MHK$	< 0,001	0,001 – 0,01	0,011 – 0,5	> 0,5

В целом существующий подход к оценке опасности загрязнения атмосферного воздуха по данным проявления токсического процесса представлен в таблице 8.

Анализируемый выше подход к оценке опасности токсического воздействия на биологические объекты ориентирован на использование сравнительно полной информации о токсическом воздействии веществ на различные организмы в широком диапазоне изменения времени воздействия и концентрации загрязняющего вещества.

Положительным фактом данного подхода является его информативность, связанная с использованием обширной информации о различных спектрах негативных воздействий на различных реципиентов. Если область применения предыдущего подхода к оценке опасности ограничена определенными рамками используемых санитарно-гигиенических норм, ориентированных на человека, то область применения подхода, основанного на изучении проявлений токсического процесса, существенно шире. Основным недостатком подхода является пока что слабая изученность зависимостей «доза-эффект» и существенная неопределенность в данных для многих веществ по отношению ко многим биологическим объектам. Сложность этой задачи связана с

необходимостью изучения токсического действия широкого спектра веществ по отношению к человеку, животным и растениям, при самых разных временах и концентрациях действия веществ, а также при изучении различных форм проявлений токсического процесса на разных уровнях организации жизни. Именно поэтому, полная характеристика зависимостей «доза-эффект» существует пока для ограниченного списка веществ.

Данный подход использует вероятностную оценку опасности, на основе определения рисков негативных эффектов в зависимости от времени и концентраций воздействия вещества, причем опасность воздействия на биологические объекты определяется исходя из непосредственно нанесенного вреда. Конечным результатом данного методологического подхода является полное представление о загрязнении атмосферного воздуха для широкого перечня вредных веществ и оценка рисков заболеваемости населения или возникновения других негативных эффектов при реализации опасных событий, связанных с загрязнением атмосферного воздуха. Это позволяет разрабатывать мероприятия по охране здоровья населения.

Таблица 8. – Система оценки опасности при загрязнении атмосферного воздуха химическими веществами по данным проявления токсического процесса у биологических объектов

Характер действия и формы проявления токсического процесса при воздействии	Характеристик и параметры токсического процесса	Оценка опасности токсического действия
<p>1) на человека и животных:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– болезни химической этиологии (интоксикации, отравления);</li> <li>– транзиторные токсические реакции (состояния, сопровождающиеся кратковременной утратой дееспособности – раздражение глаз, дыхательных путей);</li> <li>– аллобиоз (стойкие изменения реактивности организма на воздействие факторов среды, психические и физические нагрузки (аллергия, иммуносупрессия, повышенная утомляемость);</li> <li>– специальные токсические процессы (развиваются у части популяций в особых условиях – канцерогенез, эмбриотоксичность, нарушение репродуктивных функций).</li> </ul> <p>2) на растительность: нарушение регуляторных функций биологических мембран, разрушение и подавление синтеза пигментов, инактивация важных ферментов из-за распада белков, подавление фотосинтеза, активация окислительных ферментов и дыхания, увеличение транспирации и изменение соотношения форм воды в клетке, что ведет к нарушению строения хлоропластов, к плазмолизу клетки, повреждению ассимиляционных органов, усилению старения, развитию видимых симптомов повреждения (хлорозы и некрозы) тканей листа.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– по пороговому и беспороговому принципу действия;</li> <li>– по времени (продолжительности) воздействия токсиканта на биообъект (острая, подострая, хроническая формы проявления токсического процесса);</li> <li>– по локализации патологического процесса (местный, общий, смешанный или избирательный характер действия);</li> <li>– по интенсивности воздействия токсиканта, определяющейся дозозависимыми особенностями действия (тяжелая, средняя и легкая степень тяжести проявления токсического эффекта).</li> </ul>	<p>1) по показателям, видам и характеристикам вредности химических веществ:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– по лимитирующему (определяющему) показателю вредности;</li> <li>– по специальным видам токсического действия (иммунотоксичность, мутагенез, канцерогенез, тератогенез и влияние на репродуктивную функцию), а также сенсibiliзирующему действию;</li> <li>– по классам опасности/канцерогенности, факторам канцерогенного потенциала <math>SF_i</math>;</li> <li>– по показателям кумулятивности (коэффициент кумуляции <math>K_k = \sum LD_{50} / LD_{50}</math>, степень кумуляции <math>S = LD_{50} / \sum LD_{50}</math>, %);</li> </ul> <p>2) по продолжительности и порогам вредного действия вещества:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– по периодам времени (за ожидаемую продолжительность жизни человека – 70 лет, период усреднения для хронических воздействий для взрослых – 30 лет, для детей в возрасте до 6 лет – 6 лет, для условий кратковременного непрерывного воздействия продолжительностью экспозиции от 5 – 30 мин. до 6 – 8 или 24 часов), 10 – 12 % средней продолжительности жизни, что составляет для человека 8 лет, для крыс и мышей – 13 недель;</li> <li>– по порогам: острого <math>Lim_{ac}</math> (<math>PK_{oemp.}</math>), острого избирательного (специфического) <math>Lim_{ac\ sp}</math>, подострого <math>Lim_{sub\ ac}</math>, хронического общетоксического <math>Lim_{ch\ int}</math> (<math>PK_{xp.}</math>), хронического специфического (отдаленных эффектов) <math>Lim_{ch\ sp}</math>, сенсibiliзирующего <math>Lim_{al}</math>, раздражающего <math>Lim_{ir}</math> действий; ощущения неспецифического запаха <math>Lim_{olf}</math> и т.д.</li> </ul> <p>3) по характеристикам и параметрам зависимости «доза-эффект»:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– по концентрациям веществ, вызывающим заданный % неблагоприятных эффектов в группе биообъектов (смертность, заболеваемость) при определенной экспозиции (2 – 4 ч. – в остром эксперименте; 10 – 15 % времени жизни животного (для белых крыс – 3 мес.) – в хроническом эксперименте для выявления общетоксического действия; не менее трети продолжительности жизни (для наиболее распространенных экспериментальных животных (мыши, крысы) – 12 мес.) – в хроническом опыте для выявления канцерогенного действия и т.д.): <math>CL_{100}, CL_{95}, CL_{50}, CL_{84}, CL_{16}, CL_5, CL_0</math>);</li> <li>– по различным критериям оценки уровней неблагоприятных воздействий: а) по доверительным границам концентрации/дозы, рассчитанной с заданной вероятностью эффекта: порог обнаружения запаха; б) по концентрациям, не вызывающим/вызывающим неблагоприятные эффекты: <math>LOAEL, LOEL, NOAEL, NOEL, FEL, AEL, REL, WEEL, EAL, RfC, A\ RfC, A\ EGL</math> (уровни острого воздействия, США), <math>ADD</math> (пожизненная средняя суточная доза) <math>ПДК/TLV, ПДУ/PEL, OELs, OES, MAR, ADI, TDI, HA, PNEL, LARC, ADC, MHK, МДК</math>;</li> <li>– по комплексу показателей выражения эффективной токсичности (коэффициент опасности ингаляционного отравления (<math>KВИО</math>), коэффициент варибельности смертельных концентраций <math>CL_{84}/CL_{16}</math>, функция <math>S = ((CL_{84}/CL_{50}) + (CL_{50}/CL_{16}))/2</math> угла наклона кривой смертельных концентраций к абсцисс, величина зоны острого (<math>Z_{ac} = CL_{50}/Lim_{ac}</math>), хронического (<math>Z_{ch} = Lim_{ac}/Lim_{ch}</math>) и биологического (<math>Z_{biol} = CL_{50}/Lim_{ch}</math>) действия и т.д.</li> </ul>



### **Опасные события и их риски при загрязнении атмосферного воздуха**

Анализ риска представляет собой системную науку, охватывающую разные области жизнедеятельности человека и существующую на стыке многих областей знаний. В научно-методологическом плане данное направление является частью теории систем, в свою очередь, в научно-практическом плане оно связано с теорией и практикой безопасности систем. Анализ рисков предусматривает предупреждение опасных и негативных последствий действий опасности на объекты воздействия и обоснование управленческих решений по снижению уровня риска. Известно, что анализ риска состоит из трех взаимосвязанных процедур: оценки риска, управления риском и информирования о риске. Данные процедуры рассматривают в качестве важных системообразующих элементов мониторинга окружающей среды и социально-гигиенического мониторинга.

Несмотря на развитие многих областей научных исследований, ряд методологических и теоретических вопросов в области изучения опасности и риска проработан крайне слабо. Ещё в работе Маршала [96] отмечалось, что одно из наиболее существенных затруднений в обсуждении проблемы опасности и риска связано с отсутствием общей теории, построенной на использовании аналитических методов. Это объясняется тем, что опасности могут существовать во многих формах и проявлять свой разрушительный или вредный потенциал разными способами, а вероятности реализации опасностей изучены явно недостаточно, в связи с крайне ограниченным объемом опытных данных и случайностью наблюдения опасных событий.

Формирование процессов во многих природных, технических и антропогенных системах связано с изменением во времени их состояний. В зависимости от внешних и внутренних условий, в таких системах могут реализовываться различные процессы и наблюдаться разные события. Иногда возникают состояния, которые по определенным событиям, факторам или параметрам могут считаться неблагоприятными или опасными. Поэтому понятия опасности и риска характеризуют особые состояния природно-антропогенных и технических систем, которые по факторам безопасности требуют соответствующих методов их распознавания.

В этом плане основные проблемы в области экспериментального анализа опасностей и рисков связаны с установлением границ (уровней, порогов), когда процесс изменения состояния системы может быть отнесен по заданным факторам к безопасному

или опасному процессу. В свою очередь теоретические проблемы лежат в изучении вероятностных закономерностей формирования неблагоприятных и опасных событий при различных воздействиях, разработке подходов, представлений и гипотез для развития теорий, создании теоретических и аналитических методов анализа опасностей, построении вероятностных моделей риска и т.д.

Исходя из этого, создание теории опасности и риска возможно на основе обобщения экспериментально установленных закономерностей формирования опасных и неблагоприятных процессов в различных системах и вероятностных оценок опасных событий. В данной области имеется много нерешенных проблем, которые существуют как в системе понятий и определений, так и в анализе опытных данных, построении теорий и использовании математического аппарата. Имеющаяся терминология обладает целым рядом недостатков. Так, в настоящее время есть более 25 определений риска и порядка 10 наиболее употребляемых определений опасности, отображающих разные подходы к данной проблеме [109].

Тем не менее, сегодня выработан ряд общепризнанных понятий и положений, являющихся основой для развития теории систем, которые могут находиться в неблагоприятных и опасных состояниях. На основе рассмотрения окружающей среды и объекта воздействия как целостной системы можно сформировать основные положения и определения, которые позволят прийти к теоретическому описанию опасных систем. Некоторые такие определения и понятия были приведены в начале статьи.

Весь анализ опасностей, связанных с природными явлениями и деятельностью человека, основан на опыте и практике изучения опасных событий. Для того, чтобы иметь возможность применить феноменологические методы анализа событий при оценке опасности, сформируем понятие опасной системы в следующем виде.

Опасная система – концептуальная совокупность окружающей среды, формирующей опасность, и объекта воздействия, находящегося под действием опасного фактора среды, который с течением времени обеспечивает появление у данного объекта неблагоприятных эффектов и негативных последствий или приводит к наблюдению других опасных или нежелательных событий.

Таким образом, опасность, в целом, являясь, важной категорией теории опасности и риска, определяется множеством опасных состояний системы, соответствующим образом

выделенных по значениям параметров фактора опасности и факторам риска из общего множества всех состояний, при этом опасное событие во всех случаях является первостепенным.

Известно, что подавляющее большинство физических, экологических, природно-антропогенных, экономических и социальных систем относится к категории сложных. Каждая из таких систем характеризуется своим определенным набором свойств и закономерностей, перечнем характерных параметров, а также особенностями перехода из одного состояния в другое. В процессе смены состояний любой сложной системы происходит последовательное изменение её параметров во времени. При этом, многие системы могут находиться либо в опасном, либо в безопасном состоянии. В любой момент времени состояние системы будет определено совокупностью наблюдаемых значений ее параметров. Причем опасность состояния системы может определяться по совокупности значений ее параметров, которые превышают или не достигают заданных пороговых значений, а также возможно попадают в определенные нежелательные диапазоны. Если исходить из предложенного представления о состоянии системы, то вполне можно определить области опасных или неблагоприятных состояний. Для этого следует указать уровни, пороги или диапазоны опасных (безопасных) изменений количественных параметров, характеризующих ту или иную систему. Данная задача методически в экспериментальном плане практически решена. Однако не для всех опасных систем имеется необходимых объем опытных данных, который бы позволил с высокой достоверностью найти указанные выше уровни, пороги или диапазоны для широких областей определения параметров, характеризующих состояния систем.

Кроме того, оценка риска проводится на основе событий, которые отражают появление некоторых неблагоприятных или опасных состояний, эффектов или последствий. При загрязнении атмосферного воздуха такая оценка обычно проводится по двум параметрам фактора опасности – концентрации вредного вещества и времени его воздействия на биологический объект. При построении функций риска оценивают вероятности указанных выше совместных событий одновременного наблюдения параметров опасности, а также других индикаторных неблагоприятных событий – эффектов, связанных с катастрофическим загрязнением воздуха, заболеваемостью, смертностью и т.д.

В экологическом и социально-гигиеническом мониторинге подобные события

могут быть систематизированы на основе общего подхода оценки рисков опасных событий следующим образом.

1. При загрязнении воздуха одним вредным веществом в момент наблюдения реализуется событие, связанное с определением концентрации вещества в атмосферном воздухе, как характеристической величины данного события. Наблюдения осуществляются на постах и все последовательности наблюдений представляются временными рядами, каждый из которых относится к определенному объекту – посту контроля загрязнения атмосферы. Все события являются несовместными.

Для случайной величины вероятность события, что наблюдаемая концентрация  $C$  вредного вещества меньше некоторого заданного значения  $c$ , определяется из функции распределения  $P(c) = P(C < c)$ , которая находится по данным наблюдений. Данная функция распределения чаще всего подчиняется логнормальному закону распределения.

На одном контрольном посту все наблюдаемые события (за год, месяц, сутки, с периодичностью 6 часов и т.д.) образуют полную группу. Для дискретных событий

$$\sum_{i=1}^k P_i = 1, \text{ для непрерывных случайных величин}$$

$$\int_0^{\infty} f(c)dc = 1, \text{ где } i - \text{ текущий номер}$$

наблюдения событий в разные моменты времени,  $k$  – количество наблюдений, а  $f(c)$  – функция распределения случайной величины, причем  $c \geq 0$ .

Все события, связанные с загрязнением воздуха, могут быть оценены по фактору опасности, исходя из безопасной границы, опасного процесса путем определения коэффициента опасности:

$$HI = c / I, \quad (4)$$

где  $I$  – порог (уровень) безопасного воздействия при загрязнении атмосферного воздуха (хронического, острого и т.д.), заданный в тех же единицах, что и концентрация вещества. Это позволяет сортировать опасные события и провести их ранжирование по степени опасности. Такая оценка обычно производится для определенного вида негативного воздействия, на основе использования различных безопасных уровней (например,  $ПДК_{с.с.}$ ,  $ПДК_{м.р.}$ ,  $RfC_{ch}$ ,  $RfC_{ac}$  и т.д.). Вероятность таких событий может выступать в виде рисков нарушения качества атмосферного воздуха.

Если ведутся наблюдения одного вредного вещества на нескольких постах (например, на территории города), то все события также образуют полную группу или их

вероятности могут быть нормируемы. Для дискретных событий  $\sum_{i=1}^m P_i = 1$ , для непрерывных случайных величин  $\int_0^{\infty} f(c)dc = 1$ , где  $i$  – номер контрольного поста наблюдения,  $c$  – среднегодовая (среднемесячная, среднесуточная) концентрация,  $m$  – количество контрольных постов наблюдения, а  $f(c)$  – функция распределения случайной величины, которая оценивается по данным для всех контрольных постов. Все события в данном случае можно рассматривать как совместные, так как они привязываются к одному и тому же моменту времени – суткам, месяцам, годам.

Аналогичным образом могут быть оценены вероятности событий при загрязнении атмосферного воздуха в различных городах. В этом случае значения концентраций (например, среднегодовых, среднемесячных) относятся к объектам, в качестве которых выступают города или населенные пункты, где ведутся наблюдения. События в этом случае также можно считать совместными.

Вероятности указанных выше событий наблюдений концентрации одного вредного вещества (на одном посту, на группе постов, в группе городов) изучаются при решении задач экологического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

2. При загрязнении воздуха несколькими вредными веществами на контрольном посту (в населенном пункте) реализуется совместное событие одновременного наблюдения суммарного загрязнения.

Для данного совместного события, в случае если все события независимы, вероятность сложного события равна произведению вероятностей более простых событий

$$P_n(c) = P(c_1) \cdot P(c_2) \cdot \dots \cdot P(c_n), \quad (5)$$

где  $c_1, \dots, c_n$  – концентрации различных вредных веществ.

Для зависимых событий вероятность сложного события будет равна

$$P_n(c) = P(c_1) \cdot P_{c_1}(c_2) \cdot \dots \cdot P_{c_{n-1}}(c_n), \quad (6)$$

где условные вероятности  $P_{c_{i-1}}(c_i)$ , вычисляются в предположении, что все предыдущие события, связанные с загрязнением воздуха, произошли. Вероятности таких событий могут быть оценены по опытным данным путем определения распределений сложных и более простых событий и изучения взаимосвязей между ними.

Все подобные совместные события, связанные с загрязнением воздуха, могут быть оценены по фактору опасности, исходя из

классификации состояния загрязнения атмосферы, например, путем использования комплексных индексов и выделения категорий опасности (1). Это позволяет классифицировать сложные совместные события и провести их ранжирование по степени опасности. Такая оценка производится на основе использования безопасных уровней для каждого из контролируемых веществ. Вероятность таких событий также может выступать в виде рисков нарушения качества атмосферного воздуха по комплексу показателей. Вероятности указанных выше совместных событий изучаются при решении задач экологического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

3. При загрязнении воздуха одним вредным веществом и наблюдении в воздухе некоторой опасной концентрации за определенный период времени может реализоваться сложное событие  $j$  возникновения негативного эффекта у биологического объекта (например, физиологическое отклонение, заболевание, смерть).

Экспериментально такая оценка проводится в группе особей по частоте событий  $j$ , которая превышает некоторое пороговое значение вероятности (например, 5 %), чтобы исключить спонтанные эффекты. Вероятность спонтанных эффектов определяется в опыте с контрольной группой, которая находится при безопасных условиях окружающей среды. Вероятность опасного события  $j$  определяется в виде функции риска для определенного вида воздействия (хронического, острого, канцерогенного и т.д.)

$$R_j(c) = w_j(c) \cdot P(c), \quad (7)$$

где  $w_j(c)$  – условная вероятность нанесения вреда человеку (биосистеме, объекту) в случае реализации опасности наступлении негативных событий  $j$  при загрязнении атмосферного воздуха вредным веществом с концентрацией величиной  $c$ ;  $P(c)$  – вероятность загрязнения воздуха вредным веществом с концентрацией величиной  $c$ .

В качестве условной вероятности может выступать экспериментально определенная зависимость «доза-эффект» для изучаемого вредного вещества и заданного вида негативного воздействия.

Вероятности сложных событий  $j$  изучаются преимущественно при решении задач социально-гигиенического мониторинга загрязнения атмосферного воздуха.

4. При загрязнении воздуха одним вредным веществом и наблюдении в воздухе различных опасных концентраций этого

вещества в разные моменты времени может реализоваться сложное событие  $j$  возникновения негативного эффекта у биологического объекта. Вероятность такого сложного опасного события  $j$  определяется в виде функции риска для определенного вида воздействия (хронического, острого, канцерогенного и т.д.)

$$R_j(c) = \sum_{i=1}^m w_j(c_i) \cdot P(c_i), \quad (8)$$

где  $w_j(c)$  – условная вероятность нанесения вреда человеку (биосистеме, объекту) в случае реализации опасности наступлении негативных событий  $j$  при загрязнении атмосферного воздуха вредным веществом с концентрацией величиной  $c_i$ ;  $P(c_i)$  – вероятность загрязнения воздуха вредным веществом с концентрацией величиной  $c_i$ ,  $i$  – текущий номер наблюдения событий в разные моменты времени,  $m$  – количество наблюдений. При этом события загрязнения воздуха образуют полную группу несовместных событий, т.е.  $\sum_{i=1}^m P(c_i) = 1$ .

В данном случае в качестве условных вероятностей  $w_j(c_i)$  также может выступать зависимость «доза-эффект» для изучаемого вредного вещества и заданного вида негативного воздействия. Вероятности таких событий изучаются в задачах оценки риска загрязнения атмосферного воздуха. Для оценки вероятностей достаточно иметь опытные данные по мониторингу загрязнения воздуха на контрольном посту или в населенном пункте и полную информацию о параметрах зависимости «доза-эффект» для определенного вещества.

5. При загрязнении воздуха несколькими вредными веществами на контрольном посту (в населенном пункте) и наблюдении в воздухе опасных концентраций веществ за определенный период времени может реализоваться сложное совместное событие  $j$  возникновения кумулятивного негативного эффекта у биологического объекта.

Экспериментально такая оценка проводится довольно редко, однако имеются сведения о совместном действии аммиака и сероводорода; аммиака, сероводорода и формальдегида; диоксида азота и диоксида серы; озона, диоксида азота и формальдегида; оксида свинца и диоксида серы; оксида углерода и пыли цементного производства и т.д. Подобное комбинированное действие установлено для порядка 60 смесей [23, 56].

Известно, что комбинированное действие вредных веществ – это одновременное или

последовательное действие на организм нескольких ядов при одном и том же пути поступления их в биологический организм.

Различают несколько различных видов комбинированного действия вредных веществ (табл. 2):

- аддитивное действие представляет собой феномен суммированных эффектов; при этом суммарный эффект равен сумме эффектов действующих компонентов;

- потенцированное действие (синергизм) отличается усилением вредного эффекта; Компоненты смеси действуют при этом так, что одно вещество усиливает действие другого; эффект комбинированного действия при синергизме больше аддитивного;

- антагонистическое действие представляет собой воздействие, при котором суммарный эффект меньше ожидаемого; Компоненты смеси действуют так, что одно вещество ослабляет действие другого, а общий эффект меньше аддитивного.

- независимое действие формирует комбинированный эффект, который не отличается от изолированного действия каждого вредного вещества в отдельности; преобладает эффект наиболее токсичного вещества.

Без опытных данных оценить риски таких событий можно только для аддитивного и независимого действия веществ и то при условии введения некоторых гипотез о виде событий. Если считать, что соответствующие события загрязнения воздуха являются независимыми, а эффект биологического действия обладает простым свойством аддитивного действия, то риск такого совместного опасного события  $j$  определяется в виде функции риска для определенного вида воздействия (хронического, острого, канцерогенного и т.д.)

$$R_j(c) = R_{j,1}(c_1) \cdot R_{j,2}(c_2) \cdot \dots \cdot R_{j,n}(c_n), \quad (9)$$

где риски воздействия могут определяться согласно (8), а зависимости «доза-эффект»  $w_{j,i}(c_i)$  задаются для каждого вредного вещества и вида негативного эффекта в отдельности. Здесь  $n$  – количество воздействующих вредных веществ.

Следует отметить, что при оценке риска подобные задачи решаются достаточно редко, что связано с недостаточностью знаний о возникновении различных негативных эффектов при совместном действии нескольких вредных веществ.

Из приведенного выше материала следует, что изучение связей между опасностью и риском возможно при наличии описания поведения изучаемой системы в виде многомерных распределений случайных

величин и опасных событий, которые могут быть представлены в виде функций состояния систем относительно комплекса показателей. Так как параметры загрязнения воздуха и вероятность различных событий тесно связаны между собой такой функцией состояния, то достаточно нормировать только или параметры фактора опасности или вероятность наблюдаемых событий. В каждом конкретном случае данный вопрос должен решаться исходя из особенностей изучаемой системы и имеющихся опытных данных.

Таким образом, безопасное состояние системы можно рассматривать как множество состояний, при которых значения всех параметров соответствуют определенно заданным требованиям. В свою очередь, опасное состояние системы – это множество состояний, при которых значение хотя бы одного параметра не соответствует требованиям, заданным по показателям безопасности. Это также справедливо, если регламентирована вероятность характерных наблюдаемых событий, тогда задаются области безопасных и опасных изменений параметров системы, исходя из заданного значения порога вероятности наблюдения неблагоприятного эффекта или опасного события. Как показано выше, на основе имеющихся опытных данных о загрязнении атмосферного воздуха и информации о зависимости «доза-эффект» может быть определена функция состояния системы, которая представляет собой многомерное распределение. Примеры построения таких функций по опытным данным с использованием методов системодинамики [106] приведены в статьях автора [107, 108]. На основе применения понятия функции состояния системы, представленной в виде вероятностей

или рисков  $R_j = R_j \left( \frac{p_1}{p_{10}}, \frac{p_2}{p_{20}}, \dots, \frac{p_n}{p_{n0}} \right)$

относительно параметров фактора опасности  $p_i$ , опасных событий  $j$  и безопасных уровней  $p_{i0}$  возможно создание общей теории, основанной на применении аналитических методов, о которой, в свое время, упоминал Маршал [96]. Подобная теория может охватывать системы, где наблюдаются опасные процессы загрязнения окружающей среды.

Поэтому, исходя из приведенного выше материала, можно сформулировать несколько актуальных направлений научных исследований в области изучения таких опасных систем:

- **обобщение** существующих представлений об опасности и риске загрязнения окружающей среды, исходя из единого подхода вероятностной оценки состояний систем по совокупности показателей;

- классификация неблагоприятных и опасных событий при загрязнении окружающей среды и разработка теоретических и алгоритмических методов оценки вероятностей таких сложных событий для построения функций состояния опасных систем;

- разработка теории опасности и риска на основе применения феноменологических методов анализа опытных и статистических данных;

- разработка для практического применения феноменологических моделей опасных систем, где осуществляются процессы загрязнения окружающей среды.

### Выводы

Сегодня в области загрязнения окружающей среды и оценки воздействий на биологические объекты накоплен огромный экспериментальный материал, который позволяет применить феноменологические методы анализа и описания данных, полученных в процессе наблюдений или опыта. Именно феноменология может дать возможность разработать теорию опасности и риска. Для этого существует несколько причин:

- имеются обширные массивы опытных данных в виде временных рядов показателей загрязнения окружающей среды и данные о негативных воздействиях факторов опасности на различные объекты. Сегодня не так уж много предметных областей, связанных с опасностями, где имеются подобные структурированные количественные данные;

- существуют феноменологические закономерности и зависимости, описывающие опытные данные и возможность применения апробированных феноменологических методов к совокупности результатов наблюдений или опыта. Подобные методы получили широкое распространение в физике сплошных сред и термодинамике;

- имеются реальные примеры разработки многомерных системодинамических моделей систем, состояния которых описываются комплексом природных, экологических, антропогенных, технологических и социальных параметров. Подобные модели позволяют предложить аналитические методы комплексной оценки систем, исходя из вероятностного анализа имеющихся опытных данных.

Все это указывает на реальность построения теории опасности и риска для природно-антропогенных систем, где наблюдаются процессы загрязнения окружающей среды.

**Список литературы**

1. Израэль Ю.А. Концепция мониторинга состояния биосферы: Уч. для вузов / Ю.А. Израэль – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 560 с.
2. Герасимов И.П. Научные основы мониторинга окружающей среды: уч. для вузов / И.П. Герасимов – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 560 с.
3. Кузнецова О.А. Научные основы экологического мониторинга. – Красноярск: СФУ, 2008. – 110 с.
4. Бочаров В.Л. Мониторинг природно-технических экосистем / В.Л. Бочаров, Ю.М. Зинюков, Л.А. Смоляницкий. Воронеж: Истоки, 2000. – 226 с.
5. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды / Под ред. В.К. Донченко. – С.-Пб.: Эколого-аналитич. информац. центр «Союз», 1998. – 896 с.
6. Черных Н.А., Сидоренко С.Н. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере. – М.: РУДН, 2003. – 430 с.
7. Сюткин В.М. Экологический мониторинг административного региона (концепция, методы, практика на примере Кировской области). – Киров: ВГПУ, 1999. – 232 с.
8. ГОСТ 17.2.3.01-86. Охрана природы. Атмосфера. Правила контроля качества воздуха населенных пунктов. Введен в действие 01.01.87, переизд. 01.07.05. М.: Стандартинформ. – 4 с.
9. Драмлич М., Иованович Курепа М. Автоматическая мониторинг-система наблюдения за загрязнением атмосферы воздушных бассейнов. Пер. ВИНТИ. М., 1982. – 14 с.
10. РД 52.04.186-89. Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М.: Госком. СССР по гидрометеорологии – Минздрав СССР. 1991. – 691 с.
11. Monitoring Ambient Air Quality for Health Impact Assessment / Text editing: David Breuer. WHO Regional Publications, European Series, No. 85.2. WHO, 1999. – 216 p.
12. Основные принципы организации и проведения социально-гигиенического мониторинга: инструкция по применению. Утв. 15.02.07, № 179-1206. – Минск, 2007. – 41 с.
13. МУ 2.1.6.792-99. Выбор базовых показателей для социально-гигиенического мониторинга (атмосферный воздух населенных мест). – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2000. – 28 с.
14. Briggs, David. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies. Geneva: Nene Centre for Research, University College Northampton, WHO. 1999. Available online at: [http://www.who.int/environmental\\_information/Information\\_resources/documents/Indicators/EHIndicators.pdf](http://www.who.int/environmental_information/Information_resources/documents/Indicators/EHIndicators.pdf) (04.05.14).
15. Методические указания по вопросам сбора, обработки и порядка представления данных об изменении в состоянии здоровья населения, связанных с загрязнением окружающей природной среды. МЗ СССР, Госкомгидромет, № 3861-85, 1985. – 44 с.
16. Положение о социально-гигиеническом мониторинге, приложенное к Приказу Госкомсанэпиднадзора России № 145. Утв. 06.10.94, № 1146.
17. Меренюк Г.В. Загрязнение окружающей среды и здоровье населения. – Кишинев: Штиница, 1984. – 144 с.
18. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Г.Г. Онищенко, С.М. Новиков, Ю.А. Рахманин, С.Л. Авалиани, К.А. Буштуева. – М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. – 408 с.
19. Р 2.1.10.19920-04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2004. – 143 с.
20. Куценко С.А. Основы токсикологии. – С.-Пб.: Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, 2002. – 395 с. – Электр. ресурс. URL: [http://biochem.vsmu.edu.ua/biochem\\_common\\_u/toxycology.pdf](http://biochem.vsmu.edu.ua/biochem_common_u/toxycology.pdf); <http://optimalist.narod.ru/z-83.pdf> (17.05.14).
21. Израэль Ю.А. Проблемы охраны природной среды и пути их решения. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 48 с.
22. Бретшнайдер Б., Курфюрст И. Охрана воздушного бассейна от загрязнений: технология и контроль. Пер. с англ. / Под ред. А.Ф. Туболкина. – Л.: Химия, 1989. – 288 с.
23. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами) ДСП-201-97. МОЗ України: Затв. 09.07.97, № 201. – К., 1997. – 40 с.
24. СанПиН 2.1.6.1032-01. Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест. Утв. 17.05.01, № 14. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2001. – 14 с.
25. Санитарные нормы, правила и гигиенические нормативы «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных пунктов и мест отдыха населения». Утв. Минздравом Республики Беларусь 30.06.09, № 77 – 3 с.
26. ДБН А.2.2.-1-2003. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. К.: Держбуд України, 2004. – 22 с.

27. Посібник до розроблення матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (до ДБН А.2.2.1-2003). Харків: УкрНДІПТБ, 2005. – 332 с.
28. Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series No. 23. – Copenhagen: WHO, Regional Office for Europe, 1987. – 425 p.
29. Рекомендации по качеству воздуха в Европе. / Пер. с англ. – М.: Весь мир. – 2004. – 312 с.
30. Фомин Г.С., Фомина О.Н. Воздух. Контроль загрязнения по международным стандартам. Справочник. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Протектор, 2002. – 432 с.
31. Новиков Г.В., Дударев А.Я. Санитарная охрана окружающей среды современного города. – Л.: Медицина, 1978. – 216 с.
32. Гудериан Р. Загрязнение воздушной среды. Пер. с англ. / Р. Гудериан, У. Мэннинг, Р. Шуберт – М.: Мир, 1979. – 198 с.
33. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / Под ред. Е.Н. Теверовского. Пер. с англ., М.: Мир, 1980. – 544 с.
34. Хоружая Т.А. Оценка экологической опасности. – М.: Книга-сервис, 2002. – 208 с.
35. Реввель П., Реввель Ч. Среда нашего обитания: В 4 кн. Кн. 2. Загрязнения воды и воздуха. Пер. с англ. – М.: Мир, 1995. – 296 с.
36. Пинигин М.А. Гигиенические основы оценки суммарного загрязнения воздуха населенных мест // Гиг. и сан. – 1985, 1. – С. 66 – 69.
37. Покатилов Ю.Г. Биохимия биосферы и медико-биологические проблемы – Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1993. – 155 с.
38. Введение в химию окружающей среды / Дж. Андруз, П. Бримблекумб, Т. Джикелс, П. Лисс. Пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – 271 с.
39. Геохимия окружающей среды / Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. и др. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
40. Экологическая химия // Ф. Корте, М. Бахадир, В. Клайн, Я.П. Лай, Г. Парлар, И. Шайнет и др.; Под ред. Ф. Корте / Пер. с нем. – М.: Мир, 1997. – 396 с.
41. Ревич Б.А., Авалиани С.Л., Тихонова Г.И. Экологическая эпидемиология. – М.: Академия, 2004. – 384 с.
42. Elsom D.M. Atmospheric Pollution: A Global Problem (2nd edition). – Oxford: Blackwell Publishers, 1995. – 422 p.
43. Данилов-Данильян В.И., Залиханов М.Ч., Лосев К.С. Экологическая безопасность. Общие принципы и российский аспект. – М.: МНЭПУ, 2001. – 330 с.
44. Какарека С.В. Методические подходы к оценке суммарного загрязнения атмосферного воздуха // Природопользование: Сб. научн. тр. – Минск: СтройМедиаПроект, институт природопользования, 2014. – Вып. 25. – С. 61 – 69. – Электр. ресурс. URL: [http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA\\_25\\_1.pdf](http://ecology.basnet.by/journal/priroda25/PRIRODA_25_1.pdf) (24.05.14).
45. Токсикометрия химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Под ред. Каспарова А.А., Санюцкого И.В. – М.: Центр международных проектов ГКНТ, 1986. – 417 с.
46. Современные методы оценки влияния вредных факторов окружающей среды на здоровье населения // Н.В. Лебелева, В.Д. Фурман, В.А. Кислицин, Г.М. Земляная. – Электр. ресурс URL: <http://ehc.hut.ru/txt/rus/ariclour/art21.htm> (30.12.13).
47. Филов В.А. Вредные вещества в окружающей среде. Т. 8. 1992. – 328 с.; Т.10 1994. – 468 с.
48. Грушко Я.М. Вредные неорганические соединения в промышленных выбросах в атмосферу. Справочник. Л.: Химия, 1987. – 191 с.
49. Биоиндикация загрязнения наземных экосистем // Э. Вайнерт, Р. Вальтер, Т. Ветцель и др. – М.: Мир, 1988. – 350 с.
50. Сборник санитарно-гигиенических нормативов и методов контроля вредных веществ в объектах окружающей среды. – М.: Международный фонд конверсии, 1991. – 370 с.
51. Occupational exposure limits for airborne toxic substances a tabular compilation of values from selected countries. – Geneva: International Labour Office, 1993. – 455 p.
52. Николаевский В.С. Биологические основы газоустойчивости растений. – Новосибирск: Наука. 1979. – 278 с.
53. Справочник по токсикологии и гигиеническим нормативам (ПДК) потенциально опасных химических веществ // Ред. Кушнева В.С., Горшкова Р.Б. – М.: ИздАТ, 1999. – 272 с.
54. ГН 2.2.5.1313-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Утв. Минздравом России. 27.04.03. – 200 с.
55. ГН 2.2.5.2308-07. Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Утв. Минздравом России 19.12.07, № 89. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2008 – 59 с.
56. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утв. Минздравом России 21.05.03. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Минздрава РФ, 2003. – 86 с; ГН 2.1.6.2326-08 (дополнения и изменения к ГН 2.1.6.1338-03). Утв. Минздравом России 04.02.08, № 6. – 3 с.

57. ГН 2.1.6.1339-03. Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утв. Минздравом России 21.05.03. М.: Российский регистр потенциально опасных химических и биологических веществ Министерства здравоохранения Российской Федерации, 2003. – 174 с.
58. Нормативы предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и ориентировочно безопасных уровней воздействия загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных пунктов и мест массового отдыха населения. Утв. Минздравом республики Беларусь 30.06.09, № 75. – 138 с.
59. European Community-Environment-Air-Стандарты качества воздуха. – Электр. ресурс. URL: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (23.06.14).
60. Временные методические указания по обоснованию предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. – М.: Минздрав СССР; Главное санитарно-эпидемиологическое управление. Утв. Минздравом СССР 15.06.88, № 4681–88. 1989. – 110 с.
61. Методические указания к постановке исследований для обоснования санитарных стандартов вредных веществ в воздухе рабочей зоны: МУ 2163-80. М.: Минздрав СССР, 1980. – 21 с.
62. Гигиенические критерии для обоснования необходимости разработки ПДК и ОБУВ (ОДУ) вредных веществ в воздухе рабочей зоны, атмосферном воздухе населенных мест, воде водных объектов: ГН 1.1.701-98. М.: Госсанэпиднадзор России, 1998. – 6 с.
63. Николаевский В.С., Николаевская Т.В. Методика определения предельно допустимых концентраций вредных газов для растительности. – М.: МЛИ Госкомплес СССР, 1988. – 15 с.
64. Киселев А.В., Фридман К.Б. Оценка риска здоровью. Подходы к использованию в медико-экологических исследованиях и практика управления качеством окружающей среды. – С.-Пб.: Дейта, 1997. – 100 с.
65. Саноцкий И.В., Уланова И.П. Критерии вредности в гигиене и токсикологии при оценке опасности химических соединений. М.: Медицина, 1975. – 328 с.
66. Основы общей промышленной токсикологии: Руководство / Под ред. Н.А. Толоконцева, В.А. Филова. – Л.: Медицина, 1976. – Т. 1 – 3.
67. Методы определения токсичности и опасности химических веществ (токсикометрия) / Под ред. И.В. Саноцкого. М.: Медицина, 1970. – 317 с. – Электр. ресурс. URL: <http://lib2.rus.ec.books.sci/sanotskij.rar> (10.04.14).
68. Общая токсикология // Ред. Б.А. Курляндский, В.А. Филова. – М.: Медицина, 2002 – 608 с.
69. Безель В.С., Большаков В.Н., Воробейчик Е.Л. Популяционная экотоксикология. – М.: Наука, 1994. – 80 с.
70. Голиков С.Н., Саноцкий И.В., Тиунов Л.А. Общие механизмы токсического действия. – Л.: Медицина, 1986. – 279 с.
71. Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Швыряев А.А. Теория и практика анализа риска в газовой промышленности. – М.: Олита, 1996. – 207 с.
72. МосМР 2.1.9.004-03. Критерии оценки риска для здоровья населения приоритетных химических веществ, загрязняющих окружающую среду. – М.: Санэпидмедиа, 2003. – 56 с.
73. Вредные химические вещества в промышленности. Справочник для химиков, инженеров и врачей // Н.В. Лазарев. – Т. 1 – 9 Л.: Химия, 1954 – 1977, 2015.
74. Голубев А.А., Люблина Е.И., Толоконцев Н.А., Филова В.А. Количественная токсикология. Л.: Медицина, 1973. – 288 с.
75. Общие вопросы промышленной токсикологии. // Ред. А.В. Роцин, И.В. Саноцкий. М.: Медицина, 1967. – 325 с.
76. Саноцкий И.В. Вопросы гигиенического нормирования при изучении отдаленных последствий воздействия промышленных ядов. – М.: Медицина, 1972. – 191 с.
77. Косоротов Д.П. Краткий учебник токсикологии. – С.-Пб.: Типогр. Я. Третья, 1907. – 264 с.
78. Влияние загрязнений воздуха на растительность. Причины, воздействие, ответные меры // С. Бортитц, Х.Г. Деслер, Х. Эндерляйн и др. – Л.: Лесная промышленность, 1981. – 181 с.
79. Лазарев Н.В. Основы промышленной токсикологии. – Л.: Медгиз, 1938. – 388 с.
80. Токсикологическая химия // С.А. Ерёмин, С.К. Ерёмин, Г.И. Калетин, Н.И. Калетина, А.Е. Коваленко, Е. Симонов, А. Скальный, Р.У. Хабриев; Под ред. Р.У. Хабриева, Н.И. Калетиной. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2010. – 752 с.
81. Оксенгендлер Г.И. Яды и организм. Проблемы химической опасности. – С.-Пб.: Наука, 1991 – 320 с.
82. Саноцкий И.В., Смирнова О.Н. Краткий обзор документов с перечнем данных о токсичности и опасности веществ, разработанных в разных странах // Гиг. тр. и профзабол. – 1989, 3. – С. 33 – 36.
83. Досон Р., Эллиот Д., Эллиот У., Джонс К. Справочник биохимика. Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 544 с.
84. National Emission Standards. US EPA, Washington, April 1978.



85. МР 2.2.12-142. Методичні рекомендації «Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря». 2007. Затв. Наказом МОЗ України 13.04.07 № 184. К.: М-во охорони здоров'я України, 2007. – 40 с.
86. Guidelines for Ecological Risk Assessment // U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, DC, 1998. – 114 p. – Электр. ресурс. URL: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recorddisplay.cfm?deid=12460> (21.06.14).
87. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Утв. Минздравом СССР 29.09.88 № 3388, издание 5. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 71 с.
88. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. Утв. 10.03.76 № 579. М.: Стандартиформ. – 5 с.
89. Андерсон Ф.К., Трешоу М. Загрязнения воздуха и жизнь растений. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 129 с.
90. Илькун Г.М. Газоустойчивость растений. – К.: Наук. думка, 1971. – 146 с.
91. Фролов А.К. Окружающая среда крупного города и жизнь растений в нем. С.-Пб.: Наука, 1998. – 328 с.
92. Капранов С.В., Капранова Г.В., Пенская Л.А. Растения в ноосфере и здоровье населения. – Луганск: Янтарь, 2008. – 256 с.
93. Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide or oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air, available at: <http://europa.eu.int> (15.01.2014).
94. Air quality guidelines for Europe. Second edition. Regional publications. – Copenhagen: WHO Regional office for Europe, 2000. – 288 p.
95. Методические рекомендации по определению реальной нагрузки на человека химических веществ, поступающих с атмосферным воздухом, водой и пищевыми продуктами. Утв. Минздравом СССР 30.03.82, № 2983-84 М. 1986. – 41 с.
96. Маршал В. Основные опасности химических производств. М.: Мир. – 1989. – 672 с.
97. Методика оценки последствий аварийных выбросов опасных веществ («Токси»). М.: Ростехнадзор, 2005. – 67 с. – Электр. ресурс. URL: <http://www.safety.ru> (20.12.13).
98. Руководство по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах». Утв. Ростехнадзором 13.05.15, № 188. – 57 с.
99. Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвычайные ситуации: опасности, угрозы, риски. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2001. – 344 с.
100. Методические указания по установлению ориентировочных безопасных уровней воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утв. Минздравом СССР 25.11.82, № 2630-82. М.: Минздрав СССР, 1982. – 21 с.
101. Обґрунтування гігієнічних нормативів шкідливих хімічних речовин у різних середовищах на основі системного підходу: Методичні вказівки: МВ 1.1.5-088-02. Затв. Минздравом України 12.04.02 р., № 14. – К., 2002. – 55 с.
102. Toxicology and Risk Assessment. Principles, Methods, and Applications. Anna M. Fan, Louis W. Chang. 1996.
103. Risk vs. Risk. Tradeoffs in Protecting Health and the Environmental. Edited by John D. Graham and Jonathan Baert Wiener. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1995. – 337 pp.
104. Методические рекомендации «Организация исследований, связанных с оценкой экологического риска факторов городской среды для здоровья населения». Минприроды, 1993.
105. ДСТУ 2156-93. Безпечність промислових підприємств. Терміни та визначення. К.: Держстандарт України, 1994. – 31 с.
106. Аверин Г.В. Системодинамика. Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с. – Электр. ресурс. URL: <http://www.chronos.msu.ru/ru/news/item/sistemodinamika> (20.05.14).
107. Zviagintseva A.V. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2014. – №1 (6) – 2 (7). – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org>.
108. Звягинцева А.В., Аверин Г.В. 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. – 2013. – №1(4) – 2(5). – С. 46 – 55. – Электр. ресурс. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (17.05.14).
109. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Закономерности формирования опасных процессов в сложных системах // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка, випуск 9 (132). – Донецьк: ДонНТУ. 2008 – С. 221 – 232.

**References (transliteration)**

1. Izrajel' Ju.A. Konceptcija monitoringa sostojanija biosfery: Uch. dlja vuzov [Konceptcija monitoringa sostojanija biosfery: Textbook for universities] / Ju.A. Izrajel' – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – 560 p.
2. Gerasimov I.P. Nauchnye osnovy monitoringa okružhajushhej sredy: uch. dlja vuzov [Scientific basis of environmental monitoring: Textbook for universities] / I.P. Gerasimov – L.: Gidrometeoizdat, 1987. – 560 p.
3. Kuznecova O.A. Nauchnye osnovy jekologičeskogo monitoringa [Scientific basis of environmental monitoring]. – Krasnojarsk: SFU, 2008. – 110 p.
4. Bocharov V.L. Monitoring prirodno-techničeskikh jekosistem [Monitoring of natural-technical ecosystems] / V.L. Bocharov, Ju.M. Zinjukov, L.A. Smoljanickij. Voronezh: Istoki, 2000. – 226 p.
5. Kontrol' himičeskikh i biologičeskikh parametrov okružhajushhej sredy [Monitoring of chemical and biological parameters of the environment] / Pod red. V.K. Dončenko. – S.-Pb.: Jekologo-analitič. informac. centr “Sojuz”, 1998. – 896 p.
6. Chernyh N.A., Sidorenko S.N. Jekologičeskij monitoring toksikantov v biosfere [Environmental monitoring of toxicants in the biosphere]. – M.: RUDN, 2003. – 430 p.
7. Sjutkin V.M. Jekologičeskij monitoring administrativnogo regiona (konceptcija, metody, praktika na primere Kirovskoj oblasti) [Environmental monitoring Administrative Region (concepts, methods, practice on the example of the Kirov region)]. – Kirov: VGPU, 1999. – 232 p.
8. GOST 17.2.3.01-86. Ohrana prirody. Atmosfera. Pravila kontrolja kachestva vozduha naselennyh punktov [The Nature Conservancy. Atmosphere. Rules of air quality of human settlements]. Vveden v dejstvie 01.01.87, pereizd. 01.07.05. M.: Standartinform. – 4 p.
9. Dramlich M., Iovanovich Kurepa M. Avtomatičeskaja monitoring-sistema nabljudenija za zagržazneniem atmosfery vozdušnyh bassejnov [Automatic monitoring system for monitoring atmospheric pollution of air basins]. Per. VINITI. M., 1982. – 14 p.
10. RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolju zagržaznenija atmosfery [Guidelines for the Control of air pollution]. M.: Goskom. SSSR po gidrometeorologii – Minzdrav SSSR. 1991. – 691 p.
11. Monitoring Ambient Air Quality for Health Impact Assessment / Text editing: David Breuer. WHO Regional Publications, European Series, No. 85.2. WHO, 1999. – 216 p.
12. Osnovnye principy organizacii i provedenija social'no-gigieničeskogo monitoringa: instrukcija po primeneniju [The basic principles of the organization and conduct of public health monitoring: Instructions for Use]. Utv. 15.02.07, no. 179-1206. – Minsk, 2007. – 41 p.
13. MU 2.1.6.792-99. Vybor bazovyh pokazatelej dlja social'no-gigieničeskogo monitoringa (atmosfera vozduh naselennyh mest) [The choice of benchmarks for public health monitoring (ambient air of populated areas)]. – M.: Federal'nyj centr gossanjepidnadzora Minzdrava Rossii, 2000. – 28 p.
14. Briggs, David. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies. Geneva: Nene Centre for Research, University College Northampton, WHO. 1999. Available online at: [http://www.who.int/environmental\\_information/Information\\_resources/documents/Indicators/EHIndicators.pdf](http://www.who.int/environmental_information/Information_resources/documents/Indicators/EHIndicators.pdf) (04.05.14).
15. Metodičeskie ukazanija po voprosam sbora, obrabotki i porjadka predstavlenija dannyh ob izmenenii v sostojanii zdorov'ja naselenija, svjazannyh s zagržazneniem okružhajushhej prirodnoj sredy [Guidance on the collection, processing and presentation of data on changes in health status associated with environmental pollution]. MZ SSSR, Goskomgidromet, no 3861-85, 1985. – 44 p.
16. Polozhenie o social'no-gigieničeskom monitoringe [Regulation on public health monitoring], prilozhennoe k Prikazu Goskomsanjepidnadzora Rossii no. 145. Utv. 06.10.94, no. 1146.
17. Merenjuk G.V. Zagržaznenie okružhajushhej sredy i zdorov'e naselenija [Environmental pollution and public health]. – Kishinev: Shtinica, 1984. – 144 p.
18. Osnovy ocenki riska dlja zdorov'ja naselenija pri vozdejstvii himičeskikh veshhestv, zagržaznjajushhij okružhajushhiju sredu [A framework for assessing health risk when exposed to chemicals that pollute the environment] / G.G. Onishhenko, S.M. Novikov, Ju.A. Rahmanin, S.L. Avaliani, K.A. Bushtueva. – M.: NII JeCh i GOS, 2002. – 408 p.
19. R 2.1.10.19920-04. Rukovodstvo po ocenke riska dlja zdorov'ja naselenija pri vozdejstvii himičeskikh veshhestv, zagržaznjajushhij okružhajushhiju sredu [Guidelines for the assessment of health risk when exposed to chemicals that pollute the environment]. – M.: Federal'nyj centr gossanjepidnadzora Minzdrava Rossii, 2004. – 143 p.
20. Kucenko S.A. Osnovy toksikologii [Fundamentals of toxicology]. – S.-Pb.: Voenno-medicinskaja akademija im. S.M. Kirova, 2002. – 395 p. – Elektr. resurs. URL: [http://biochem.vsmu.edu.ua/biochem\\_common\\_u/toxicology.pdf](http://biochem.vsmu.edu.ua/biochem_common_u/toxicology.pdf); <http://optimalist.narod.ru/z-83.pdf> (17.05.14).

21. Izrajel' Ju.A. Problemy ohrany prirodnoj sredy i puti ih reshenija [Problems of protection of the environment and ways of solving them]. L.: Gidrometeoizdat, 1984. – 48 p.
22. Bretshnajder B., Kurfjurst I. Ohrana vozdušnogo bassejna ot zagrjaznenij: tehnologija i kontrol' [Air protection from pollution: technology and control]. Per. s angl. / Pod red. A.F. Tubolkina. – L.: Himija, 1989. – 288 p.
23. Derzhavni sanitarni pravila ohoroni atmosfernogo povitryja naselenih misc' (vid zabrudnennja himichnimi ta biologichnimi rečovinami) [Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами)]. DSP-201-97. MOZ Ukraïni: Zatv. 09.07.97, no. 201. – K., 1997. – 40 p.
24. SanPiN 2.1.6.1032-01. Gigienicheskie trebovanija k obespečeniju kachestva atmosfernogo vozduha naselennyh mest [Hygienic requirements for quality assurance of atmospheric air of populated areas]. Utv. 17.05.01, no. 14. M.: Informacionno-izdatel'skij centr Minzdrava Rossii, 2001. – 14 p.
25. Sanitarnye normy, pravila i gigienicheskie normativy "Gigienicheskie trebovanija k obespečeniju kachestva atmosfernogo vozduha naselennyh punktov i mest otdyha naselenija" [Sanitary norms, rules and hygienic standards "Hygienic requirements for air quality of human settlements and places of recreation"]. Utv. Minzdravom Respubliki Belarus' 30.06.09, no. 77 – 3 p.
26. DBN A.2.2.-1-2003. Sklad i zmist materialiv ocinki vpliviv na navkolishne seredovishhe (OVNS) pri proektuvanni i budivnictvi pidpriemstv, budinkiv i sporud [The composition and content of impact assessment (EIA) in the design and construction of plants, buildings and structures]. K.: Derzhbud Ukraïni, 2004. – 22 p.
27. Posibnik do rozroblennja materialiv ocinki vpliviv na navkolishne seredovishhe (do DBN A.2.2.1-2003) [Guide to development impact assessment on the environment (with SBR A.2.2.1-2003)]. Harkiv: UkrNDIINTV, 2005. – 332 p.
28. Air Quality Guidelines for Europe. WHO Regional Publications, European Series no. 23. – Copenhagen: WHO, Regional Office for Europe, 1987. – 425 p.
29. Rekomendacii po kachestvu vozduha v Evrope [Guidelines for air quality in Europe]. / Per. s angl. – M.: Ves' mir. – 2004. – 312 p.
30. Fomin G.S., Fomina O.N. Vozduh. Kontrol' zagrjaznenija po mezhdunarodnym standartam [Control of Pollution by international standards]. Spravochnik. 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Protektor, 2002. – 432 p.
31. Novikov G.V., Dudarev A.Ja. Sanitarnaja ohrana okruzhajushhej sredy sovremennogo goroda [Sanitary protection of the environment of the modern city]. – L.: Medicina, 1978. – 216 p.
32. Guderai R. Zagrjaznenie vozdušnoj sredy [Air pollution]. Per. s angl. / R. Guderian, U. Mjenning, R. Shubert – M.: Mir, 1979. – 198 p.
33. Uork K., Uorner S. Zagrjaznenie vozduha. Istochniki i kontrol' [Air pollution. Sources and control]. Per. s angl. / Pod red. E.N. Teverovskogo. Per. s angl., M.: Mir, 1980. – 544 p.
34. Horuzhaja T.A. Ocenka jekologicheskoj opasnosti [Assessment of environmental hazard]. – M.: Kniga-servis, 2002. – 208 p.
35. Revvel' P., Revvel' Ch. Sreda nashego obitanija: V 4 kn. Kn. 2. Zagrjaznenija vody i vozduha [Our environment. Kn.2. Water and air pollution]. Per. s angl. – M.: Mir, 1995. – 296 p.
36. Pinigin M.A. Gigienicheskie osnovy ocenki summarnogo zagrjaznenija vozduha naselennyh mest [Hygienic bases of estimation of the total air pollution populated areas] // Gig. i san. – 1985, 1. – pp. 66 – 69.
37. Pokatilov Ju.G. Biohimija biosfery i mediko-biologicheskie problemy [Biochemistry of the biosphere and biomedical problems]. – Novosibirsk: Nauka. Sib. otd-nie, 1993. – 155 p.
38. Vvedenie v himiju okruzhajushhej sredy [Introduction to environmental chemistry]. / Dzh. Andruz, P. Brimblekumb, T. Dzhikels, P. Liss. Per. s angl. – M.: Mir, 1999. – 271 p.
39. Geohimija okruzhajushhej sredy [Environmental Geochemistry]. / Saet Ju.E., Revich B.A., Janin E.P. i dr. – M.: Nedra, 1990. – 335 p.
40. Jekologicheskaja himija [Environmental Chemistry] // F. Korte, M. Bahadir, V. Klajn, Ja.P. Laj, G. Parlar, I. Shajnet i dr.; Pod red. F. Korte / Per. s nem. – M.: Mir, 1997. – 396 p.
41. Revich B.A., Avaliani S.L., Tihonova G.I. Jekologicheskaja jepidemiologija [Environmental epidemiology]. – M.: Akademija, 2004. – 384 p.
42. Elsom D.M. Atmospheric Pollution: A Global Problem (2nd edition). – Oxford: Blackwell Publishers, 1995. – 422 p.
43. Danilov-Danil'jan V.I., Zalihanov M.Ch., Losev K.S. Jekologicheskaja bezopasnost'. Obshhie principy i rossijskij aspekt [Ecological safety. General principles and Russian dimension]. – M.: MNJePU, 2001. – 330 p.
44. Kakareka S.V. Metodicheskie podhody k ocenke summarnogo zagrjaznenija atmosfernogo vozduha [Methodical approaches to the estimation of the total air pollution]. // Prirodopol'zovanie: Sb. nauchn. tr. – Minsk: StrojMediaProekt, institut prirodopol'zovanija, 2014. – Issue. 25. – pp. 61 – 69. – Elektr. resurs. URL: [http://ecology.basnet.by/jornal/priroda25/PRIRODA\\_25\\_1.pdf](http://ecology.basnet.by/jornal/priroda25/PRIRODA_25_1.pdf) (24.05.14).

45. Toksikometrija himicheskih veshhestv, zagrijaznjajushhih okruzhajushhiju sredu [Toxicology of chemicals that pollute the environment]. / Pod red. Kasparova A.A., Sanockogo I.V. – M.: Centr mezhduнародnyh proektov GKNT, 1986. – 417 p.
46. Sovremennye metody ocenki vlijanija vrednyh faktorov okruzhajushhej sredy na zdorov'e naselenija [Modern methods of assessing the impact of environmental hazards on human health]. // N.V. Lebeleva, V.D. Furman, V.A. Kislicin, G.M. Zemljanaja. – Elektr. resurs. URL: <http://ehc.hut.ru/txt/rus/aricloud/art21.htm> (30.12.13).
47. Filov V.A. Vrednye veshhestva v okruzhajushhej srede [Harmful substances in the environment]. T. 8. 1992. – 328 p.; T. 10 1994. – 468 p.
48. Grushko Ja.M. Vrednye neorganicheskie soedinenija v promyshlennyh vybrosah v atmosferu. Spravochnik [Harmful inorganic compounds in industrial emissions into the atmosphere. Directory]. L.: Himija, 1987. – 191 p.
49. Bioindikacija zagrijaznenija nazemnyh jekosistem [Bioindication of pollution of terrestrial ecosystems] // Je. Vajnert, R. Val'ter, T. Vetcel' i dr. – M.: Mir, 1988. – 350 p.
50. Sbornik sanitarno-gigienicheskikh normativov i metodov kontrolja vrednyh veshhestv v ob'ektah okruzhajushhej sredy [Collection of sanitary standards and controls of hazardous substances in the environment]. – M.: Mezhdunarodnyj fond konversii, 1991. – 370 p.
51. Occupational exposure limits for airborne toxic substances a tabular compilation of values from selected countries. – Geneva: International Labour Office, 1993. – 455 p.
52. Nikolaevskij V.S. Biologicheskie osnovy gazoustojchivosti rastenij [Biological basis of gas resistance of plants]. – Novosibirsk: Nauka, 1979. – 278 p.
53. Spravochnik po toksikologii i higienicheskim normativam (PDK) potencial'no opasnyh himicheskih veshhestv [Handbook of Toxicology and hygienic standards (MAC) of potentially hazardous chemicals]. // Red. Kushneva V.S., Gorshkova R.B. – M.: Izdat, 1999. – 272 p.
54. GN 2.2.5.1313-03. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vrednyh veshhestv v vozduhe rabochej zony [The maximum permissible concentration (MPC) of harmful substances in the air of the working area]. Utv. Minzdravom Rossii 27.04.03. – 200 p.
55. GN 2.2.5.2308-07. Orientirovochnye bezopasnye urovni vozdeystvija (OBUV) vrednyh veshhestv v vozduhe rabochej zony [Exposure Limits (OEL) of harmful substances in the air of the working area]. Utv. Minzdravom Rossii 19.12.07, no. 89. M.: Federal'nyj centr gigieny i jepidemiologii Rospotrebnadzora, 2008 – 59 p.
56. GN 2.1.6.1338-03. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosfernom vozduhe naseleennyh mest [Maximum permissible concentration ((MPC) of pollutants in the ambient air of populated areas]. Utv. Minzdravom Rossii 21.05.03. M.: Rossijskij registr potencial'no opasnyh himicheskih i biologicheskikh veshhestv Minzdrava RF, 2003. – 86 p; GN 2.1.6.2326-08 (dopolnenija i izmenenija k GN 2.1.6.1338-03). Utv. Minzdravom Rossii 04.02.08, no. 6. – 3 p.
57. GN 2.1.6.1339-03. Orientirovochnye bezopasnye urovni vozdeystvija (OBUV) zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosfernom vozduhe naseleennyh mest [The occupational exposure limits (OEL) of pollutants in the ambient air of populated areas]. Utv. Minzdravom Rossii 21.05.03. M.: Rossijskij registr potencial'no opasnyh himicheskih i biologicheskikh veshhestv Ministerstva zdavoohranenija Rossijskoj Federacii, 2003. – 174 p.
58. Normativy predel'no dopustimyh koncentracij zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosfernom vozduhe i orientirovochno bezopasnyh urovnej vozdeystvija zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosfernom vozduhe naseleennyh punktov i mest massovogo otdyha naselenija [The maximum permissible concentrations of pollutants in ambient air and occupational exposure of pollutants in the ambient air of settlements and places of public recreation]. Utv. Minzdravom respubliky Belarus' 30.06.09, no. 75. – 138 p.
59. European Community-Environment-Air-Стандарты качества воздуха. – Elektr. resurs. URL: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (23.06.14).
60. Vremennye metodicheskie ukazanija po obosnovaniju predel'no dopustimyh koncentracij (PDK) zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosfernom vozduhe naseleennyh mest [Interim guidance on substantiation of maximum permissible concentration (MPC) of pollutants in the ambient air of populated areas]. – M.: Minzdrav SSSR; Glavnoe sanitarno-jepidemiologicheskoe upravlenie. Utv. Minzdravom SSSR 15.06.88, no. 4681-88. 1989. – 110 p.
61. Metodicheskie ukazanija k postanovke issledovanij dlja obosnovanija sanitarnyh standartov vrednyh veshhestv v vozduhe rabochej zony [Guidelines for the formulation of research to study the sanitary standards of harmful substances in the air of the working area]: MU 2163-80. M.: Minzdrav SSSR, 1980. – 21 p.
62. Gigienicheskie kriterii dlja obosnovanija neobhodimosti razrabotki PDK i OBUV (ODU) vrednyh veshhestv v vozduhe rabochej zony, atmosfernom vozduhe naseleennyh mest, vode vodnyh ob'ektov [Hygienic criteria for rating the necessity for setting up MACS and TSELS of harmful substances in the occupation air, the ambient air of residential areas and the water of water bodies. Hygienic norms]: GN 1.1.701-98. M.: Gossanjepidnadzor Rossii, 1998. – 6 p.

63. Nikolaevskij V.S., Nikolaevskaja T.V. Metodika opredelenija predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh gazov dlja rastitel'nosti [Method for determining maximum permissible concentrations of harmful gases for the vegetation]. – M.: MLI Goskomplex SSSR, 1988. – 15 p.
64. Kiselev A.V., Fridman K.B. Ocenka riska zdorov'ju. Podhody k ispol'zovaniju v mediko-jekologicheskikh issledovanijah i praktika upravlenija kachestvom okruzhajushhej sredy [Assessment of health risk. The approaches to be used in medical and environmental research and practice of environmental management]. – S.-Pb.: Dejta, 1997. – 100 p.
65. Sanockij I.V., Ulanova I.P. Kriterii vrednosti v gigiene i toksikologii pri ocenke opasnosti himicheskikh soedinenij [The criteria for hazard in hygiene and toxicology at the risk assessment of chemical compounds]. M.: Medicina, 1975. – 328 p.
66. Osnovy obshhej promyshlennoj toksikologii: Rukovodstvo [Foundations of general industrial toxicology Guide] / Pod red. N.A. Tolokonceva, V.A. Filova. – L.: Medicina, 1976. – T. 1 – 3.
67. Metody opredelenija toksichnosti i opasnosti himicheskikh veshhestv (toksikometrija) [Methods for determination of toxicity and hazards of chemicals (Toximeter)]. / Pod red. I.V. Sanockogo. M.: Medicina, 1970. – 317 p. – Elektr. resurs. URL: <http://lib2.rus.ec.books.sci/sanotskij.rar> (10.04.14).
68. Obshhaja toksikologija [General toxicology] // Red B.A. Kurljanskij, V.A. Filov. – M.: Medicina, 2002 – 608 p.
69. Bezel' V.S., Bol'shakov V.N., Vorobejchik E.L. Populjacionnaja jekotoksikologija [Population Ecotoxicology]. – M.: Nauka, 1994. – 80 p.
70. Golikov S.N., Sanockij I.V., Tiunov L.A. Obshhie mehanizmy toksicheskogo dejstvija [General mechanisms of toxic action]. – L.: Medicina, 1986. – 279 p.
71. Safonov V.S., Odisharija G.Je., Shvyrjaev A.A. Teorija i praktika analiza riska v gazovoj promyshlennosti [The theory and practice of risk analysis in the gas industry]. – M.: Olita, 1996. – 207 p.
72. MosMR 2.1.9.004-03. Kriterii ocenki riska dlja zdorov'ja naselenija prioritetnyh himicheskikh veshhestv, zagrjaznjajushhih okruzhajushhuju sredu [Criteria for assessing the risk to public health priority chemicals that pollute the environment]. – M.: Sanjepidmedia, 2003. – 56 p.
73. Vrednye himicheskie veshhestva v promyshlennosti. Spravochnik dlja himikov, inzhenerov i vrachej [Hazardous chemicals industry. Handbook for chemists, engineers and doctors]. // N.V. Lazarev. – T. 1 – 9 L.: Himija, 1954 – 1977, 2015.
74. Golubev A.A., Ljublina E.I., Tolokoncev N.A., Filov V.A. Kolichestvennaja toksikologija [Quantitative toxicology]. L.: Medicina, 1973. – 288 p.
75. Obshhie voprosy promyshlennoj toksikologii [General questions Industrial Toxicology]. // Red. A.V. Roshhin, I.V. Sanockij. M.: Medicina, 1967. – 325 p.
76. Sanockij I.V. Voprosy gigenicheskogo normirovanija pri izuchenii otdalennyh posledstvij vozdejstvija promyshlennyh jadov [Questions hygienic standardization in the study of long-term effects of industrial poisons]. – M.: Medicina, 1972. – 191 p.
77. Kosorotov D.P. Kratkij uchebnik toksikologii [A brief tutorial toxicology]. – S.-Pb.: Tipogr. Ja. Treja, 1907. – 264 p.
78. Vlijanie zagrjaznenij vozduha na rastitel'nost'. Prichiny, vozdejstvie, otvetnye mery [The effect of air pollution on vegetation. Causes, effects, responses] // S. Bortitc, H.G. Desler, H. Jenderljajn i dr. – L.: Lesnaja promyshlennost', 1981. – 181 p.
79. Lazarev N.V. Osnovy promyshlennoj toksikologii [Fundamentals of Industrial Toxicology]. – L.: Medgiz, 1938. – 388 p.
80. Toksikologicheskaja himija [Toxicological Chemistry]. // S.A. Erjomin, S.K. Erjomin, G.I. Kaletin, N.I. Kaletina, A.E. Kovalenko, E. Simonov, A. Skal'nyj, R.U. Habriev; Pod red. R.U. Habrieva, N.I. Kaletinoj. – M.: GJeOTAR-Media, 2010. – 752 p.
81. Oksengendler G.I. Jady i organizm. Problemy himicheskoi opasnosti [Poisons and body. Problems of Chemical Hazards]. – S.-Pb.: Nauka, 1991. – 320 p.
82. Sanockij I.V., Smirnova O.N. Kratkij obzor dokumentov s perechnem dannyh o toksichnosti i opasnosti veshhestv, razrabotannyh v raznyh stranah [Overview of documents to the list of data on toxic and hazardous substances developed in different countries]. // Gig. tr. i profzabol. – 1989, 3. – pp. 33 – 36.
83. Dason R., Jelliot D., Jelliot U., Dzhons K. Spravochnik biohimika [Reference biochemist]. Per. s angl. – M.: Mir, 1991. – 544 p.
84. National Emission Standards. US EPA, Washington, April 1978.
85. MR 2.2.12-142. Metodichni rekomendacii «Ocinka riziku dlja zdorov'ja naselennja vid zabrudnennja atmosfernogo povitlja» [Guidelines “Assessment of the risk to health from air pollution”]. 2007. Zatv. Nakazom MOZ Ukraini 13.04.07 no. 184. K.: M-vo ohoroni zdorov'ja Ukraini, 2007. – 40 p.
86. Guidelines for Ecological Risk Assessment // U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, DC, 1998. – 114 p. – Elektr. resurs. URL: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=12460> (21.06.14).
87. GOST 12.1.005-88. Sistema standartov bezopasnosti truda. Obshhie sanitarno-gigenicheskie trebovanija k vozduhu rabochej

- zony [Occupational safety standards system. General hygiene requirements to the working zone]. Utv. Minzdravom SSSR 29.09.88, no. 3388, izdanie 5. – M.: IPK Izdatel'stvo standartov, 2002. – 71 p.
88. GOST 12.1.007-76. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vrednye veshhestva. Klassifikacija i obshhie trebovanija bezopasnosti [Occupational safety standards system. Harmful substances. Classification and general safety requirements]. Utv. 10.03.76, no. 579. M.: Standartinform. – 5 p.
89. Anderson F.K., Treshou M. Zagrijaznenija vozduha i zhizn' rastenij [Air pollution and plant life]. – L.: Gidrometeoizdat, 1988. – 129 p.
90. Il'kun G.M. Gazoustojchivost' rastenij [Gas resistant plants]. – K.: Nauk. dumka, 1971. – 146 p.
91. Frolov A.K. Okruzhajushhaja sreda krupnogo goroda i zhizn' rastenij v nem [The environment of a large city and plant life in it]. S.-Pb.: Nauka, 1998. – 328 p.
92. Kapranov S.V., Kapranova G.V., Penskaja L.A. Rastenija v noosfere i zdorov'e naselenija [Plants in the noosphere and public health]. – Lugansk: Jantar', 2008. – 256 p.
93. Council Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide or oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air, available at: <http://europa.eu.int> (15.01.2014).
94. Air quality guidelines for Europe. Second edition. Regional publications. – Copenhagen: WHO Regional office for Europe, 2000. – 288 p.
95. Metodicheskie rekomendacii po opredeleniju real'noj nagruzki na cheloveka himicheskikh veshhestv, postupajushhih s atmosferym vozduhom, vodoj i pishhevymi produktami [Guidelines for the definition of the actual load on the person of chemicals coming from the atmospheric air, water and food]. Utv. Minzdravom SSSR 30.03.82, no. 2983-84 M. 1986. – 41 p.
96. Marshal V. Osnovnye opasnosti himicheskikh proizvodstv [The main danger of chemical production]. M.: Mir. – 1989. – 672 p.
97. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vybrosov opasnyh veshhestv ("Toksi") [Methods of assessing the consequences of accidental releases of hazardous substances ("Toxic").]. M.: Rostehnadzor, 2005. – 67 p. – Elektr. resurs. URL: <http://www.safety.ru> (20.12.13).
98. Rukovodstvo po bezopasnosti "Metodicheskie osnovy po provedeniju analiza opasnostej i ocenki riska avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ektah" [Safety Manual "Methodical bases to analyze hazards and assess the risk of accidents at hazardous production facilities"]. Utv. Rostehnadzorom 13.05.15, no. 188. – 57 p.
99. Akimov V.A., Novikov V.D., Radaev N.N. Prirodnye i tehnogennye chrezvychajnye situacii: opasnosti, ugrozy, riski [Natural and man-made emergencies: danger, threats, risks]. – M.: ZAO FID "Delovoj jekspres", 2001. – 344 p.
100. Metodicheskie ukazanija po ustanovleniju orientirovochnyh bezopasnyh urovnej vozdeystvija (OBUV) zagrijaznjajushhih veshhestv v atmosferym vozduhe naselennyh mest [Guidelines for the establishment of occupational exposure limits (OEL) of pollutants in the ambient air of populated areas]. Utv. Minzdravom SSSR 25.11.82, no. 2630-82. M.: Minzdravom SSSR, 1982. – 21 p.
101. Obruntuvannja gigienichnih normativiv shkidlivih himichnih rechovin u riznih seredovishhah na osnovi sistemnogo pidhodu [The substantiation of hygienic standards of harmful chemicals in different environments based on a systematic approach]: Metodichni vkazivki: MV 1.1.5-088-02. Zatv. Minzdravom Ukraïni 12.04.02 r., no. 14. – K., 2002. – 55 p.
102. Toxicology and Risk Assessment. Principles, Methods, and Applications. Anna M. Fan, Louis W. Chang. 1996.
103. Risk vs. Risk. Tradeoffs in Protecting Health and the Environment. Edited by John D. Graham and Jonathan Baert Wiener. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1995. – 337 pp.
104. Metodicheskie rekomendacii "Organizacija issledovanij, svjazannyh s ocenkoj jekologicheskogo riska faktorov gorodskoj sredy dlja zdorov'ja naselenija" [Guidelines "Research organization associated with the assessment of environmental risk factors of the urban environment to human health"]. Minprirody, 1993.
105. DSTU 2156-93. Bezpechnist' promislivih pidpriemstv. Terminy ta viznachennja [Safety industry. The terms and definitions]. K.: Derzhstandart Ukraïni, 1994. – 31 p.
106. Averin G.V. Sistemodinamika [System dynamics], Donetsk: Donbass. 2014. – 405 p., – Elektr. Resurs. URL: <http://www.chronos.msu.ru/ru/news/item/sistemodinamika> (20.05.14).
107. Zviagintseva A.V. Multiparameter ranking of areas based on the analysis of data about the condition of natural and anthropogenic systems // Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii v naukah o prirode i obshhestve. – 2014. – no. 1(6) – 2(7). – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org>.
108. Zvjaginceva A.V., Averin G.V. Strategicheskaja ocenka statusa Ukrainy v sovremennom mire po dannym mezhdunarodnyh organizacij. Chast' 2: Primery analiza i rezul'taty [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*. – 2013. – no 1(4) – 2(5). – pp. 46 – 55. – Elektr. resurs. URL: <http://sait.csm.donntu.org> (17.05.14).  
109. Averin G.V., Zvjaginцева A.V. Zakonomernosti formirovaniya opasnykh

processov v slozhnykh sistemah [Conformities to the law of dangerous processes forming in the difficult systems] // *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universitetu*. Serija: Informatika, kibernetika ta obchisljuval'na tehnika, vipusk 9 (132). – Donec'k: DonNTU. 2008 – pp. 221 – 232.

**Звягинцева Г.В. «Системы оцінки небезпеки при забрудненні атмосферного повітря: спроба узагальнення підходів».** Дана характеристика існуючих підходів до оцінки небезпеки при забрудненні атмосферного повітря, які сформувався в екологічному та соціально-гігієнічному моніторингу. Перший підхід дає порівняльну оцінку небезпеки по відношенню до заданих нормованих рівнів забруднення повітря хімічними речовинами. Другий підхід пов'язано з оцінкою небезпеки за даними прояви токсичного процесу, виходячи з безпосередньо завданої шкоди біологічним об'єктам. Аналізуються основні положення, принципи і методи оцінки небезпеки для обох існуючих концепцій. Оцінка небезпеки в екологічному моніторингу базується на визначенні обмеженого переліку добре вивчених пріоритетних речовин, контролі їхнього вмісту в повітрі, використанні санітарно-гігієнічних норм і на розрахунок індивідуальних і комплексних показників забруднення атмосферного повітря. Оцінка небезпеки при соціально-гігієнічному моніторингу заснована на аналізі ризику негативних впливів на людину, тварин, рослин і біосферу в цілому і пов'язана в основному з вивченням характеристик і параметрів токсичних процесів і їхніх проявів. Обидва підходи в кінцевій своїй меті виходять на імовірнісну оцінку небезпеки на основі визначення ризиків негативних подій забруднення повітря або негативних ефектів при реалізації цих подій. Аналізуються також методи оцінки ризику при забрудненні атмосферного повітря виходячи з визначення ймовірності складних небезпечних подій, пов'язаних як з перевищенням нормативних рівнів забруднення повітря, так і з негативною дією шкідливих речовин на реципієнтів. Робиться спроба узагальнення уявлень про небезпеку в екологічній безпеці, а також характеризуються деякі перспективні напрями досліджень у цій області.

**Ключові слова:** забруднення атмосферного повітря; принципи, підходи і методи оцінки небезпеки; екологічний та соціально-гігієнічний моніторинг; аналіз ризику негативних впливів.

**Zvjagintseva A.V. “Systems of risk assessment when air pollution: an attempt to summarize the approaches”.** The characteristic of existing approaches to risk assessment in the air pollution that have been adopted in the ecological and socio-hygienic monitoring. The first approach provides a comparative risk assessment in relation to given normalized levels of air pollution by chemicals. The second approach involves the assessment of danger according to the manifestations of the toxicological process, based on the direct application harm biological objects. Analyzes the basic situation, the principles, approaches and methods of risk assessment for both existing concepts. The risk assessment in environmental monitoring is based on the definition of a limited list of priority substances, control of their content in the air, use of sanitary standards and determining the individual and complex indicators of air pollution. Risk assessment in the public health monitoring based on risk analysis of negative impacts on humans, animals, plants and the biosphere in general, and related primarily to the study of characteristics and parameters of the toxic processes. Both approaches its goal in the final out on a probabilistic risk assessment based on the identification of risks of adverse events and adverse air pollution effects in the implementation of these developments. Analyzed as risk assessment when air pollution is based on the determination of the likelihood of complex hazardous events associated with both exceeding regulatory levels of air pollution, and the negative effect of harmful substances on the recipient. An attempt to analyze the development of concepts related to the assessment of hazards, and characterized by some promising areas of research in this area.

**Keywords:** air pollution; principles, approaches and methods of risk assessment; ecological and socio-hygienic monitoring; analysis of the risk of adverse effects.

Статья поступила в редакцию 25.06.2014

Рекомендована к публикации д-р техн. наук, проф. Г.В. Авериным

## Сведения об авторах на русском языке



Аверин Геннадий Викторович, д.т.н., проф. В 1980 году закончил Николаевский кораблестроительный институт им. адмирала С.О. Макарова, по квалификации инженер-механик. В 1994 году защитил докторскую диссертацию, с 2005 года профессор по кафедре компьютерных систем мониторинга. В настоящее время занимает должность заведующего кафедры факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета. Является автором более 130 публикаций, 15 монографий и учебных пособий. Последняя монография «Системодинамика» издана в 2014 году. Область научных интересов: системный анализ и общая теория систем, интеллектуальный анализ данных, экологический мониторинг, информационные системы в области охраны окружающей среды и глобалистики.



Андрюхин Александр Иванович, к.т.н., с.н.с. Закончил математический факультет Донецкого государственного университета, защитил кандидатскую диссертацию в области вычислительной техники в Харьковском национальном университете радиоэлектроники. С 1999 года и по настоящее время доцент кафедры прикладной математики и информатики Донецкого национального технического университета. Научные интересы: проектирование и диагностирование современных сверхбольших интегральных схем и нейроморфных устройств, проблемы программирования и искусственного интеллекта. Опубликовано более 60 научных работ. Является автором книги «Моделирование и диагностирование дискретных систем на переключательном уровне».



Аноприенко Александр Яковлевич, к.т.н., доц. В 1979 году закончил Донецкий политехнический институт, по квалификации инженер-системотехник. В 1987 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в Институте проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины (г. Киев). В 1989-90 гг. прошёл 10-месячную научную стажировку по линии Немецкой службы академических обменов (DAAD) в Институте высокопроизводительных и распределенных суперЭВМ Штутгартского университета (Германия). В настоящее время – декан факультета компьютерных наук и технологий ДонНТУ, профессор кафедры компьютерной инженерии. Является автором более 300 публикаций, 7 монографий и учебных пособий. Область научных интересов: интернет-технологии, компьютерное моделирование, закономерности развития и применения компьютерных технологий.



Беловодский Валерий Николаевич, к.т.н., доц. В 1971 году закончил факультет физико-математических и естественных наук Университета Дружбы народов им. П. Лумумбы по специальности «математика» (г. Москва), в 1982 году – аспирантуру при Рижском политехническом институте по специальности «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», с 2003 года является доцентом кафедры компьютерных систем мониторинга Донецкого национального технического университета. Автор более 80 публикаций и 8 изобретений, последнее учебное пособие «Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии» издано в 2013 году. Научные интересы: моделирование, нелинейные динамические системы, анализ временных рядов, фрактальное сжатие изображений, обучающие системы.



Бельков Дмитрий Валерьевич, к.т.н., доц. В 1987 году окончил Донецкий политехнический институт, по квалификации инженер-системотехник. В 2004 году защитил кандидатскую диссертацию, с 2004 года доцент кафедры вычислительной математики и программирования факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета. Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов: анализ и моделирование трафика компьютерных сетей, обеспечение качества обслуживания компьютерных сетей, управления трафиком компьютерных сетей, методы размещения файлов распределенных систем, сетевые процессоры.





Григорьев Александр Владимирович, к.т.н., доцент. В 1979 году закончил Донецкий политехнический институт, по квалификации инженер-математик. В 1989 году защитил кандидатскую диссертацию, с 1992 года доцент по кафедре прикладной математики и информатики. В настоящее время занимает должность заместителя декана факультета компьютерных наук и по научной работе Донецкого национального технического университета. Является автором более 100 публикаций, из них более 50 изданы в изданиях, входящих в список ВАК Украины. Область научных интересов: инструментальные оболочки для автоматизации разработки интеллектуальных САПР в различных предметных областях.



Достлев Юрий Сергеевич. Ведущий инженер, по совместительству старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета. Является автором более 30 публикаций. Область научных интересов: системы реального времени, исследование динамических характеристик параметров реальных объектов, создание компьютерных комплексов автоматизированного контроля и управления технологическими процессами. Научно-техническая деятельность: проектирование и исследование аппаратно-программных комплексов систем реального времени и систем автоматического управления технологическими процессами в различных областях.



Звягинцева Анна Викторовна, к.т.н., доц. В 1999 году закончила факультет экологии и химической технологии по специальности «Экология и охрана окружающей среды», в 2007 году получила квалификацию магистра программного обеспечения автоматизированных систем в Донецком национальном техническом университете (ДонНТУ). В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию по специальности «Экологическая безопасность». С 2007 года доцент кафедры компьютерных систем мониторинга факультета компьютерных наук и технологий ДонНТУ. Научные интересы: системный анализ процессов и объектов, теория опасности и риска, экологический мониторинг и безопасность техногенных систем. Опубликовано более 60 научных работ, в том числе 4 монографии и 1 учебное пособие. Научная работа в настоящее время связана с развитием методов комплексной оценки и оценки рисков сложных систем.



Климко Григорий Тимофеевич, к.ф.-м.н., с.н.с. В 1970 году закончил Донецкий государственный университет по специальности «физика». В 1983 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Теоретическая и математическая физика» в Вильнюсском государственном университете им. В. Капсукаса. С 1974 г. по 1995 г. работал в ИнФОРУ НАН Украины, с 1995 г. является доцентом института искусственного интеллекта, с 2010 года – доцентом кафедры компьютерных систем мониторинга Донецкого национального технического университета. Научные интересы: матрица плотности, спектральные, оптические и спиновые свойства квантово механических систем с открытой оболочкой, случайное вырождение состояний фуллеренов и d-оболочки атома, нестабильности, включая понижение симметрии, обучающие системы. Автор более 80 научных публикаций и 1 учебного пособия.



Клюев Виталий Евгеньевич. В 2007 году закончил Луганский национальный университет им. Т. Шевченко по специальности «Экология». С 2012 года аспирант кафедры компьютерных систем мониторинга Донецкого национального технического университета. Является автором 10 публикаций. Последние две книги «Атлас экосети Луганщины» и «Реки Луганщины» опубликованы в 2014 году. Область интересов: ландшафтное проектирование, экологический мониторинг и фотография. В течение 2009 – 2013 годов входил в группу исполнителей проектов, посвященных созданию экологической сети Луганской области («Rural development planning: integration of ECONET and agricultural development») и «Enhanced Economic & Legal Tools for Steppe Biodiversity Conservation and Climate Change Adaptation and Mitigation» («Steppe Biodiversity»). В 2013 – 2014 годах был экспертом проектов ГЭФ ООН.



Польщикова Константин Александрович, к.т.н., доц. В 1997 году закончил Харьковский военный университет по специальности «Радиоэлектронные устройства, системы и комплексы». В 2003 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Телекоммуникационные системы и сети», в 2006 году присвоено ученое звание доцента по кафедре технического обеспечения связи и автоматизированных систем управления. В настоящее время занимает должность помощника проректора по научной и инновационной деятельности Белгородского государственного университета. Является автором более 100 научных публикаций, 1 монографии и 5 учебных пособий. Область научных интересов: управление потоками информации в телекоммуникационных сетях, методы и системы искусственного интеллекта, имитационное и аналитическое моделирование.



Смирнов Александр Николаевич. В 2009 году закончил Славянский государственный педагогический университет, а в 2012 году – Институт последиplomного образования Донецкого национального технического университета (ДонНТУ) по специальности «Программное обеспечение автоматизированных систем». С 2012 года работает в ДонНТУ на кафедре компьютерных систем мониторинга в должности инженера-программиста, по совместительству ассистент по дисциплинам математического цикла. Область научных исследований и интересов: программирование мобильных систем, математическое моделирование, нелинейные динамические системы, алгоритмизация, педагогические технологии.



Харитонов Антон Юрьевич. В 2004 году закончил Донецкий национальный технический университет (ДонНТУ), получил квалификацию «специалист-разработчик вычислительных систем». В настоящее время старший преподаватель кафедры компьютерных систем мониторинга факультета компьютерных наук и технологий ДонНТУ. Научные интересы: разработка программного обеспечения и баз данных, интеллектуальный анализ данных, 3D-моделирование, автоматизированные системы управления промышленными объектами на базе LabVIEW. Имеет 12 публикаций, соавтор 2-х патентов. Сертифицированный разработчик программ на LabVIEW. В 2008 году получил диплом победителя конкурса на лучшее программно-техническое решение с использованием LabVIEW.



Едемская Евгения Николаевна. В 1982 году окончила Донецкий политехнический институт с квалификацией инженер-математик. С 2001 года старший преподаватель кафедры вычислительной математики и программирования факультета компьютерных наук и технологий Донецкого национального технического университета (ДонНТУ). Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов: анализ и моделирование трафика компьютерных сетей, обеспечение качества обслуживания компьютерных сетей, управления трафиком компьютерных сетей, методы размещения файлов распределенных систем, математическое моделирование экономических процессов.

## Сведения об авторах на украинском языке



Аверін Геннадій Вікторович, д.т.н., проф. У 1980 році закінчив Миколаївський кораблебудівний інститут ім. адмірала С.О. Макарова, за кваліфікацією інженер-механік. У 1994 році захистив докторську дисертацію, з 2005 року професор по кафедрі комп'ютерних систем моніторингу. Нині займає посаду завідувача кафедри факультету комп'ютерних наук і технологій Донецького національного технічного університету. Є автором понад 130 публікацій, 15 монографій та навчальних посібників. Остання монографія «Системодинаміка» видана в 2014 році. Область наукових інтересів: системний аналіз і загальна теорія систем, інтелектуальний аналіз даних, екологічний моніторинг, інформаційні системи в галузі охорони навколишнього середовища та глобалістики.



Андрюхін Олександр Іванович, к.т.н., с.н.с. Закінчив математичний факультет Донецького державного університету, захистив кандидатську дисертацію в галузі обчислювальної техніки в Харківському національному університеті радіоелектроніки. З 1999 року та по теперішній час доцент кафедри прикладної математики та інформатики Донецького національного технічного університету. Наукові інтереси: проектування та діагностування сучасних надвеликих інтегральних схем та нейроморфних пристроїв, проблеми програмування та штучного інтелекту. Опубліковано більше 60 наукових робіт. Є автором книги «Моделювання та діагностування дискретних систем на перемикаючому рівні».



Анопрієнко Олександр Якович, к.т.н., доц. У 1979 році закінчив Донецький політехнічний інститут, за кваліфікацією інженер-системотехнік. У 1987 році захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук в Інституті проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (м. Київ). У 1989-90 рр. пройшов 10-місячне наукове стажування по лінії Німецької служби академічних обмінів (DAAD) в Інституті високопродуктивних і розподілених суперЕОМ Штутгартського університету (Німеччина). Нині – декан факультету комп'ютерних наук і технологій ДонНТУ, професор кафедри комп'ютерної інженерії. Є автором більше 300 публікацій, 7 монографій та навчальних посібників. Область наукових інтересів: інтернет-технології, комп'ютерне моделювання, закономірності розвитку та застосування комп'ютерних технологій.



Беловодський Валерій Миколайович, к.т.н., доц. У 1971 році закінчив факультет фізико-математичних і природничих наук Університету Дружби народів ім. П. Лумумби за спеціальністю «математика» (м. Москва), в 1982 році – аспірантуру при Ризькому політехнічному інституті за спеціальністю «Динаміка, міцність машин, приладів та апаратури», з 2003 року є доцентом кафедри комп'ютерних систем моніторингу Донецького національного технічного університету. Автор більше 80 публікацій та 8 винаходів, останній навчальний посібник «Елементи лінійної алгебри та аналітичної геометрії» видано в 2013 році. Наукові інтереси: моделювання, нелінійні динамічні системи, аналіз часових рядів, фрактальне стиснення зображень, навчальні системи.



Белов Дмитро Валерійович, к.т.н., доц. У 1987 році закінчив Донецький політехнічний інститут, за кваліфікацією інженер-системотехнік. У 2004 році захистив кандидатську дисертацію, з 2004 року доцент кафедри обчислювальної математики та програмування факультету комп'ютерних наук і технологій Донецького національного технічного університету. Є автором понад 20 наукових публікацій. Область наукових інтересів: аналіз і моделювання трафіку комп'ютерних мереж, забезпечення якості обслуговування комп'ютерних мереж, управління трафіком комп'ютерних мереж, методи розміщення файлів розподілених систем, мережеві процесори.



Григор'єв Олександр Володимирович, к.т.н., доцент. У 1979 році закінчив Донецький політехнічний інститут, за кваліфікацією інженер-математик. У 1989 році захистив кандидатську дисертацію, з 1992 року доцент по кафедрі прикладної математики та інформатики. Нині займає посаду заступника декана факультету комп'ютерних наук і з наукової роботи Донецького національного технічного університету. Є автором понад 100 публікацій, з них більше 50 видано у виданнях, що входять до переліку ВАК України. Область наукових інтересів: інструментальні оболонки для автоматизації розробки інтелектуальних САПР в різних предметних областях.



Достлев Юрій Сергійович. Провідний інженер, за сумісництвом старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії факультету комп'ютерних наук і технологій Донецького національного технічного університету. Є автором більше 30 публікацій. Область наукових інтересів: системи реального часу, дослідження динамічних характеристик параметрів реальних об'єктів, створення комп'ютерних комплексів автоматизованого контролю та управління технологічними процесами. Науково-технічна діяльність: проектування та дослідження апаратно-програмних комплексів систем реального часу й систем автоматичного управління технологічними процесами в різних областях.



Звягінцева Ганна Вікторівна, к.т.н., доц. У 1999 році закінчила факультет екології та хімічної технології за спеціальністю «Екологія та охорона навколишнього середовища», в 2007 році отримала кваліфікацію магістра програмного забезпечення автоматизованих систем в Донецькому національному технічному університеті (ДонНТУ). У 2006 році захистила кандидатську дисертацію за спеціальністю «Екологічна безпека». З 2007 року доцент кафедри комп'ютерних систем моніторингу факультету комп'ютерних наук і технологій ДонНТУ. Наукові інтереси: системний аналіз процесів і об'єктів, теорія небезпеки і ризику, екологічний моніторинг і безпека техногенних систем. Опубліковано більше 60 наукових робіт, в тому числі 4 монографії та 1 навчальний посібник. Наукова робота нині пов'язана з розвитком методів комплексної оцінки і оцінки ризиків складних систем.



Климко Григорій Тимофійович, к.ф.-м.н., с.н.с. У 1970 році закінчив Донецький державний університет за спеціальністю «фізика». У 1983 році захистив кандидатську дисертацію за спеціальністю «Теоретична і математична фізика» у Вільнюському державному університеті ім. В. Капсукаса. З 1974 р по 1995 р працював в ІнФОРУ НАН України, з 1995 р є доцентом інституту штучного інтелекту, з 2010 року – доцентом кафедри комп'ютерних систем моніторингу Донецького національного технічного університету. Наукові інтереси: матриця щільності, спектральні, оптичні та спінові властивості квантово механічних систем з відкритою оболонкою, випадкове виродження станів фулеренів і d-оболонки атома, нестабільності, включаючи зниження симетрії, навчальні системи. Автор понад 80 наукових публікацій та 1 навчального посібника.



Клюєв Віталій Євгенович. У 2007 році закінчив Луганський національний університет ім. Т. Шевченка за спеціальністю «Екологія». З 2012 року аспірант кафедри комп'ютерних систем моніторингу Донецького національного технічного університету. Є автором 10 публікацій. Останні дві книги «Атлас екомережі Луганщини» і «Річки Луганщини» опубліковано в 2014 році. Область інтересів: ландшафтне проектування, екологічний моніторинг і фотографія. Протягом 2009 – 2013 років входив до групи виконавців проектів, присвячених створенню екологічної мережі Луганської області («Rural development planning: integration of ECONET and agricultural development» і «Enhanced Economic & Legal Tools for Steppe Biodiversity Conservation and Climate Change Adaptation and Mitigation» («Steppe Biodiversity»). У 2013 – 2014 роках був експертом проектів ГЕФ ООН.



Польщикова Костянтин Олександрович, к.т.н., доц. У 1997 році закінчив Харківський військовий університет за спеціальністю «Радіоелектронні пристрої, системи та комплекси». У 2003 році захистив кандидатську дисертацію за спеціальністю «Телекомунікаційні системи та мережі», в 2006 році присвоєно вчене звання доцента по кафедрі технічного забезпечення зв'язку та автоматизованих систем управління. Нині займає посаду помічника проректора з наукової та інноваційної діяльності Белгородського державного університету. Є автором більше 100 наукових публікацій, 1 монографії та 5 навчальних посібників. Область наукових інтересів: управління потоками інформації в телекомунікаційних мережах, методи і системи штучного інтелекту, імітаційне та аналітичне моделювання.



Смирнов Олександр Миколайович. У 2009 році закінчив Слов'янський державний педагогічний університет, а в 2012 році – Інститут післядипломної освіти Донецького національного технічного університету (ДонНТУ) за спеціальністю «Програмне забезпечення автоматизованих систем». З 2012 року працює в ДонНТУ на кафедрі комп'ютерних систем моніторингу на посаді інженера-програміста, за сумісництвом асистент з дисциплін математичного циклу. Область наукових досліджень та інтересів: програмування мобільних систем, математичне моделювання, нелінійні динамічні системи, алгоритмізація, педагогічні технології.



Харитонов Антон Юрійович. У 2004 році закінчив Донецький національний технічний університет (ДонНТУ), отримав кваліфікацію «спеціаліст-розробник обчислювальних систем». Нині старший викладач кафедри комп'ютерних систем моніторингу факультету комп'ютерних наук і технологій ДонНТУ. Наукові інтереси: розробка програмного забезпечення та баз даних, інтелектуальний аналіз даних, 3D-моделювання, автоматизовані системи управління промисловими об'єктами на базі LabVIEW. Має 12 публікацій, співавтор 2-х патентів. Сертифікований розробник програм на LabVIEW. У 2008 році отримав диплом переможця конкурсу на краще програмно-технічне рішення з використанням LabVIEW.



Едемська Євгенія Миколаївна. У 1982 році закінчила Донецький політехнічний інститут з кваліфікацією інженер-математик. З 2001 року старший викладач кафедри обчислювальної математики та програмування факультету комп'ютерних наук і технологій Донецького національного технічного університету (ДонНТУ). Є автором понад 20 наукових публікацій. Область наукових інтересів: аналіз і моделювання трафіку комп'ютерних мереж, забезпечення якості обслуговування комп'ютерних мереж, управління трафіком комп'ютерних мереж, методи розміщення файлів розподілених систем, математичне моделювання економічних процесів.

## Сведения об авторах на английском языке



Gennadiy Averin, Doctor of Engineering Sciences, Full Professor. In 1980 he graduated from Admiral Makarov Nikolaev Shipbuilding Institute with a qualification of engineer-mechanic. In 1994 he defended his doctoral thesis, since 2005 Professor at the Department of Computer Monitoring Systems. Currently he is Head of this Department at the Faculty of Computer Sciences and technologies of the Donetsk National Technical University. He is the author of over 130 publications, 15 monographs and textbooks. The latest monograph "Systemodynamics" was published in 2014. Area of scientific interests: system analysis and general systems theory, data mining, environmental monitoring and information systems in the field of environmental protection and global studies.



Alexander Andryukhin, Candidate of Engineering Sciences, Senior Research Officer. Graduated from the mathematical faculty of Donetsk State University, defended PhD thesis in computer sciences at Kharkiv National University of Radio Electronics. Since 1999 he is an Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics of Donetsk National Technical University. Research interests: design and diagnostics of modern ultralarge integrated circuits and neuromorphic devices, the problems of programming and artificial intelligence. Published more than 60 scientific papers. He is the author of the book "Modeling and diagnosis of discrete systems at the switching level".



Alexander Anoprienko, Candidate of Engineering Sciences, Docent. In 1979 he graduated from Donetsk Polytechnic Institute as a system engineer. In 1987 he defended the dissertation on competition of a scientific degree of Candidate of Engineering Sciences at the Institute of Modeling Problems in Power Engineering of NAS of Ukraine (Kyiv). In 1989-90 he had the 10-month research internship through the German academic exchange service at the Institute for High Performance and Distributed Supercomputers at Stuttgart University (Germany). At the present time - Dean of the Faculty of Computer sciences and Technologies of DonNTU, Professor at the Department of Computer Engineering. Is the author of over 300 publications, 7 monographs and textbooks. Research interests: internet technologies, computer simulation, patterns of development and use of computer technologies.



Valeriy Belovodskiy, Candidate of Engineering Sciences, Docent. In 1971 graduated from the Faculty of Physics, Mathematics and Natural Sciences of the Lumumba Peoples Friendship University in specialty "Mathematics" (Moscow), in 1982 - postgraduate study at the Riga Polytechnic Institute with a degree in "Dynamics, Strength of Machines, Devices and Equipment" (Riga), since 2003 is an Associate Professor at the Department of Computer Monitoring Systems of the Donetsk National Technical University (Donetsk). Is the author of over 90 papers and several textbooks, participated in a number of international conferences on vibration problems and theory of machines and mechanisms (Prague, Liberec, Lisbon). Research interests: modeling, nonlinear dynamical systems, time series, fractal image compression, reconstruction of equations, training systems.



Dmitry Belkov, Candidate of Engineering Sciences, Docent. In 1987 graduated from Donetsk Polytechnic Institute on qualification of system engineer. In 2004 defended his thesis, since 2004 Associate Professor at the Department of Computational Mathematics and Programming of the Faculty of Computer sciences and Technologies in Donetsk National Technical University. Is the author of over 20 scientific publications. Research interests: analysis and modeling of traffic in computer networks, QoS in computer networks, traffic management of computer networks, methods of file allocation in distributed systems, network processors.



Alexander Grigoriev, Candidate of Engineering Sciences, Docent. In 1979 he graduated from Donetsk Polytechnic Institute with a qualification of Engineer-Mathematician. In 1989 he defended his thesis, since 1992 is an Associate Professor at the Department of Applied Mathematics and Informatics. Currently holds the post of Deputy Dean on Scientific Work at the Faculty of Computer Sciences and Technologies of the Donetsk National Technical University. Is the author of over 100 publications, over 50 of them published in journals included in the list of the Higher Attestation Commission of Ukraine. Research interests: instrumental shell to automate the development of intelligent CAD systems in various subject areas.



Yuri Dostlev. Senior Engineer, part-time Senior Lecturer at the Department of the Computer Engineering of the Faculty of Computer Sciences and Technologies of the Donetsk National Technical University. He is the author of over 30 publications. Research interests: real-time systems, research of dynamic characteristics of real objects, creation of computer complexes for the automated control and management of technological processes. Scientific and technical activities: design and research of hardware and software of real-time systems , automatic control systems of technological processes in various fields.



Anna Zviagintseva, Candidate of Engineering Sciences, Docent. In 1999 graduated from the Faculty of Ecology and Chemical Technologies on speciality “Ecology and Environmental Protection”, in 2007 received a master's degree in Software of Automated Systems at the Donetsk National Technical University . In 2006 defended her thesis on the speciality “Environmental security”. Since 2007 is Associate Professor at the Department of Computer Monitoring Systems of the Faculty of Computer Sciences and Technologies . Research interests: system analysis of processes and objects, theory of hazards and risks, environmental monitoring and security of technological systems. Published more than 60 scientific works, including 4 monographs and 1 manual. At present her scientific work is related to the development of methods for integrated risk assessment of complex systems.



Gregory Klimko, Candidate of Physico-Mathematical Sciences , Senior Research Officer . In 1970 graduated from Donetsk State University with a degree in physics. In 1983 he defended his candidate thesis on the specialty “Theoretical and Mathematical Physics” at V. Kapsukas Vilnius State University. From 1974 to 1995 worked in the Research Institute of Physical-organic and Coal chemistry of NAS of Ukraine. Since 1995 is an Associate Professor in the Institute of Artificial Intelligence, since 2010 Associate Professor at the Department of Computer Monitoring Systems of the Donetsk National Technical University. Research interests: density matrix, spectral, optical and spin properties of quantum mechanical systems with an open shell, the accidental degeneracy of states of the fullerenes and the d-shell of the atom, instability, including the lowering of symmetry, learning systems. The author of over 80 scientific publications and 1 manual.



Vitalii Kliuiev. In 2007 graduated from T. Shevchenko Luhansk National University on speciality “Ecology”. Since 2012 Postgraduate at the Department of Computer Monitoring Systems of the Donetsk National Technical University. He is the author of 10 publications ,his last two books “Atlas of the Ecological Network of Luhansk Region” and “Rivers of Luhansk Region” were published in 2014. During 2009 – 2013 was included to the group of implementers of the projects on creation of ecological network of Luhansk region (“Rural development planning: an integration of ECONET and agricultural development” and “Enhanced Economic & Legal Tools for Steppe Biodiversity Conservation and Climate Change Adaptation and Mitigation” (“Steppe Biodiversity”). In 2013 – 2014 was an expert of GEF projects by the UN. Area of interests: landscape planning, environmental monitoring and photo.



Konstantyn Polschykov, Candidate of Engineering Sciences, Docent. In 1997 graduated from the Kharkov Military University on specialty "Radio- Electronic Devices, Systems and Complexes". In 2003 defended his thesis on the specialty "Telecommunication of Systems and Networks" and worked as an Associate Professor at the Department of Technical Communication and Automated Control Systems. Currently holds the post of assistant of vice-rector for scientific and innovative activity of the Belgorod State University. Is the author of over 100 scientific publications, 1 monograph and 5 textbooks. Area of scientific interests: information control in telecommunication networks, the methods and systems of artificial intelligence, simulation and analytical modeling.



Alexander Smirnov. In 2009 graduated from Slavyansk State Pedagogical University, in 2012 – the Institute of Postgraduate Education of Donetsk National Technical University on specialty "Software of Automated Systems". Since 2012 is working at the Department of Computer Monitoring Systems as an engineer-programmer and part-time Assistant in the disciplines of mathematical cycle. Scientific research area and interests: programming mobile systems, mathematical modeling, nonlinear dynamical systems, algorithmization, educational technologies.



Anton Kharytonov. In 2004 graduated from Donetsk National Technical University and got the qualification "Specialist-Developer of Computer Systems". Currently is senior lecturer at the Department of Computer Monitoring Systems of the Faculty of Computer Sciences and Technologies .Has 12 publications, co-author of 2 patents. Certified software developer in LabVIEW. In 2008 got the diploma of the winner of the best software and technical solution with LabVIEW. Research interests: development of software and databases, data mining, 3D modeling, automated control systems of industrial objects based on LabVIEW.



Evgeniy Edemskay. In 1982 graduated from Donetsk Polytechnic Institute with qualification "Engineer-Mathematician". Since 2001 is a senior lecturer at the Department of Computational Mathematics and Programming of the Faculty "Computer Sciences and Technologies" in the Donetsk National Technical University . Is the author of over 20 scientific publications. Research interests: analysis and simulation of network traffic, QoS and traffic management of computer networks, methods of file allocation in distributed systems, mathematical modeling of economic processes.



*Научное издание*

**Системный анализ и информационные технологии в науках  
о природе и обществе  
Сборник научных трудов**

*(на русском, украинском, английском языках)*

**№1(6)–2(7)'2014**

Ответственный за выпуск *А.В. Звягинцева*  
Технические редакторы *В.М. Беловодский, А.С. Хоруженко*  
Компьютерная верстка *В.А. Павлий*  
Дизайн обложки *А.Р. Хохлов, А.Д. Багимова*

Подписано к печати 10.10.2014. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Печать ризографическая.  
Усл. печ. лист. 10. Уч.- изд. лист. 7,1.  
Тираж 100 экз.

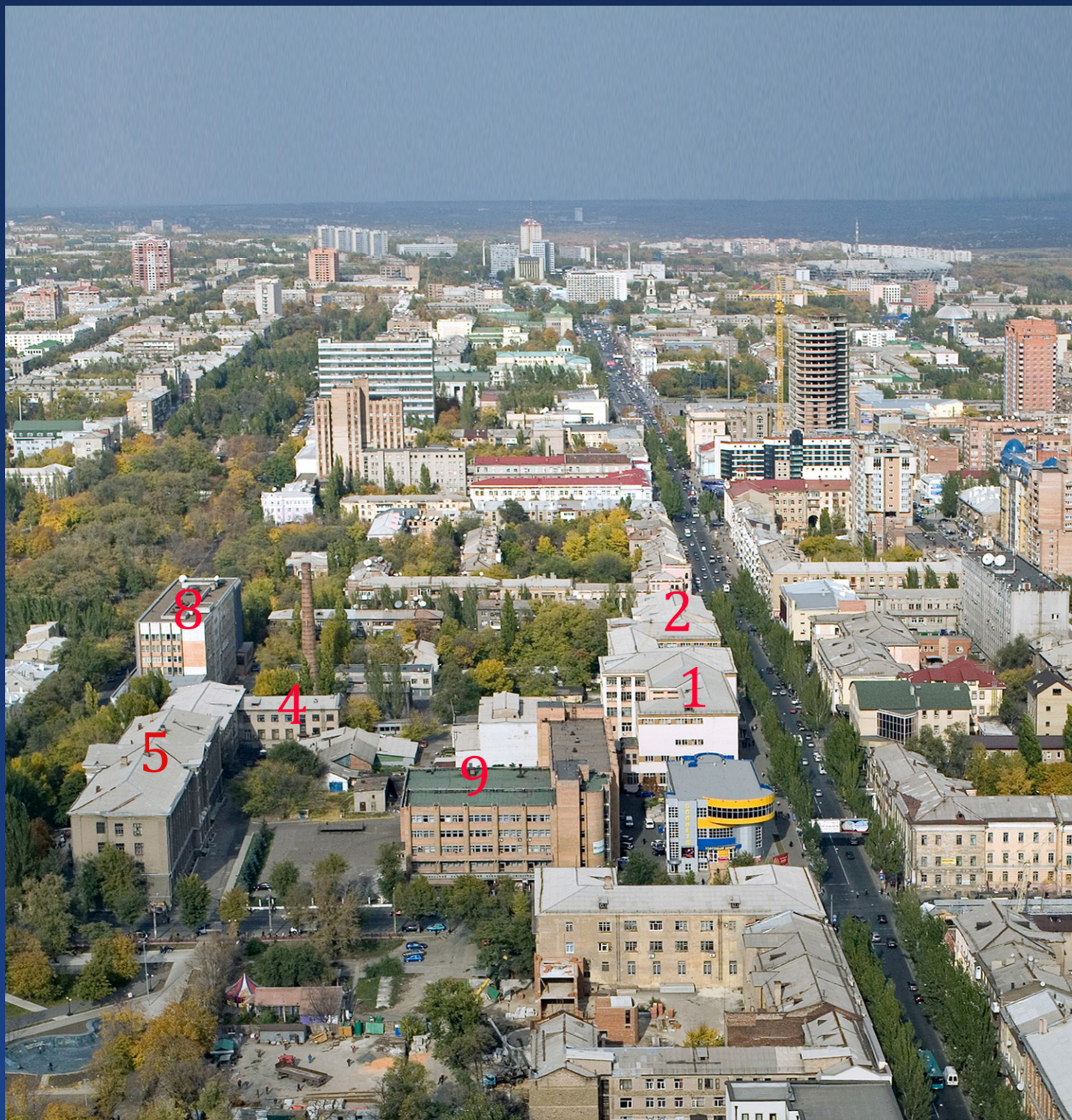
Адрес редакции: Украина, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, ГВУЗ «ДонНТУ», 4-й учебный корпус, к. 20, а. Тел.: +38 (062) 301-08-51 E-mail: [anna\\_zv@ukr.net](mailto:anna_zv@ukr.net), [averin.gennadiy@gmail.com](mailto:averin.gennadiy@gmail.com)  
URL: <http://sait.csm.donntu.org>; <http://csm.donntu.org/ru/node/120>

Издатель Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»  
Украина, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: +38 (062) 301-08-67, +38 (062) 301-09-67

Свидетельство о государственной регистрации субъекта издательского дела:  
серия ДК №2982 от 21.09.2007

Отпечатано ООО фирма «ДРУК-ИНФО»  
Украина, 83001, г. Донецк, ул. Артема, 58, к. 113, тел.: +38 (062) 335-64-55

# Размещение кафедр факультета компьютерных наук и технологий ДонНТУ



1, 2 корпуса - администрация ДонНТУ

4 корпус - кафедры компьютерной инженерии и компьютерных систем мониторинга

5 корпус - кафедра прикладной математики и информатики

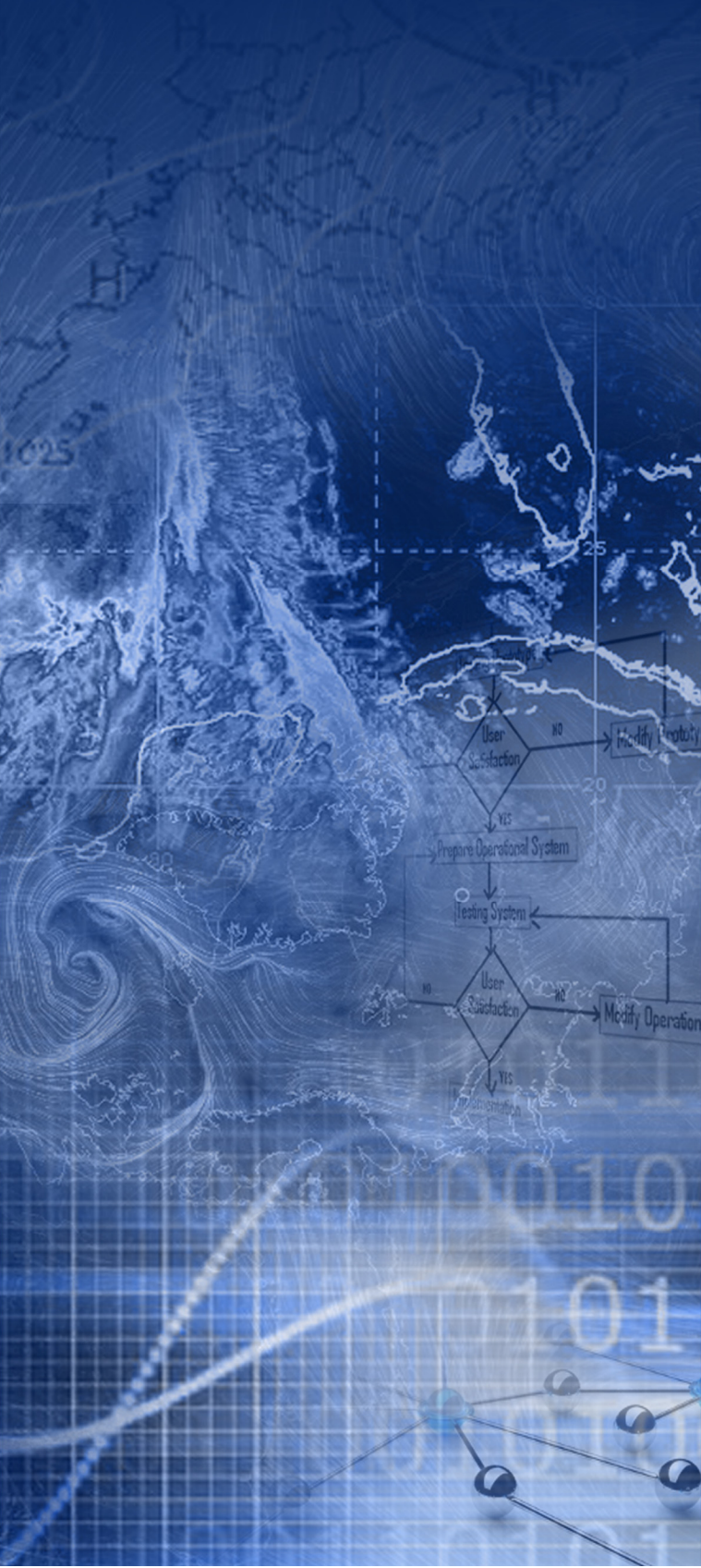
8 корпус - кафедра автоматизированных систем управления

Факультет компьютерных наук и технологий

Тел: +38062 345-09-35

<http://cs.donntu.org>

© 1972-2014



Кафедра компьютерных систем  
мониторинга

Тел: +3 8062 301-08-51

Web site: <http://csm.donntu.org>

E-mail: [anna\\_zv@ukr.net](mailto:anna_zv@ukr.net)

© 2003-2014