

ISSN 2413 - 0133  
Scientific journal

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№4(16)/ 2019

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ**

**Научный журнал**

**№ 4 (16)**



## EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.  
Arshinskiy L.V.  
Bachkova I.A.  
Berestneva O.G.  
Boukhanovsky A.V.  
Bychkov I.V.  
Donskoy V.I.

Dunaev M.P.  
Eliseev S.V.  
Gornov A.Y.  
Gribova V.V.  
Groumpos P.  
Hodashinsky I.A.  
Kalimoldaev M.N.  
Karpenko A.P.  
Kazakov A.L.  
Khamisov O.V.  
Komendantova N.P.  
Lis R.  
Massel L.V.  
Mokhor V.V.  
Moskvichev V.V.  
Ovcharova J.  
Popov G.T.  
Smirnov S.V.  
Stylios C.  
Taratukhin V.V.  
Voevodin V.V.  
Voropai N.I.  
Woern H.  
Wolfengagen V.E.  
Yusupova N.I.  
Zorina T.G.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ  
Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС  
Бачкова И.А., Болгария, София, ХТМУ  
Берестнева О.Г., д.т.н., Томск, ТПУ  
Бухановский А.В., д.т.н., Санкт-Петербург, НИУ ИТМО  
Бычков И.В., академик РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН  
Донской В.И., д.ф.-м.н., Симферополь, Таврическая академия Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского  
Дунаев М.П., д.т.н., Иркутск, ИРНТУ  
Елисеев С.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС  
Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН  
Грибова В.В., д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН  
Грумпус П., Греция, University of Patras  
Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР  
Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ  
Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана  
Казakov А.Л., д.ф.-м.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН  
Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, IASA  
Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology  
Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Мохор В.В., д.т.н., Киев, ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины  
Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, СКТБ «Наука» СО РАН  
Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)  
Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет  
Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН  
Стилиос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus  
Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster  
Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ  
Воропай Н.И., чл.-корр. РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)  
Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ  
Юсупова Н.И., д.т.н., Уфа, УГАТУ  
Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси

## EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.  
Executive Editor  
Makagonova N.N.  
Editor Kopaigorodsky A.N.  
Editor Massel A.G.  
Designer Ivanov R.A.

## ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Выпускающий редактор  
Макагонова Н.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Копайгородский А.Н. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Редактор Иванов Р.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН  
Дизайнер

## Working contacts founder

Федеральное государственное бюджетное учреждение науке Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН)  
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

## Рабочие контакты учредителя

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 441

Массель Л.В., e-mail: [massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

Раб. тел.: 8 (3952) 500-646 доп. 440

Макагонова Н.Н., e-mail: [mak@isem.irk.ru](mailto:mak@isem.irk.ru)

Сайт журнала и конференции ИМТ - <http://imt.isem.irk.ru>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.  
Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Свидетельство ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018 г.

Отпечатано в полиграфическом участке ИСЭМ СО РАН

© Все права принадлежат авторам публикуемых статей.

Дата выхода 23.12.2019 г. Тираж 100 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН

Цена свободная. (6+)

**Цифровые технологии в энергетике и экономике**

- Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н.**  
Эволюция технологий исследований энергетике и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам **5**
- Гальперова Е.В.**  
Анализ перспектив применения цифровых технологий в секторах экономики и их влияния на энергопотребление **20**
- Массель Л.В., Комендантова Н.П.**  
Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий **31**
- Ерженин Р.В.**  
Стратифицированная модель управления государственным бюджетом **46**

**Визуальная аналитика**

- Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Лагереv Д.Г.**  
Визуальная аналитика и когнитивные методы для обработки и анализа гетерогенных данных мультисенсорных систем: проблемы и тенденции **60**
- Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е.**  
Методика создания оценочных карт опасности кризисных ситуаций на основе картографической информации **75**
- Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Толстенков В.П.**  
Анализ требований к структуре ансамбля моделей для обработки медико-биологических данных **89**

**Информационные и математические технологии**

- Мишенков Е.А., Малышев А.А., Кулагин А.В., Сагун Д.Ю.**  
Подход к моделированию нештатных ситуаций с использованием виртуального тренажера для обучения персонала **99**
- Дьякович М.П.**  
Моделирование состояния здоровья пострадавших от хронической ртутной интоксикации на производстве **111**
- Козырев Д.Б.**  
Особенности практического использования информации в системе сквозного проектирования на этапе технологической подготовки производства **122**
- Деканова Н.П., Махнев С.А.**  
Анализ социальных сетей - поддержка абитуриентов в профессиональной ориентации **132**

**Digital technologies in energy sector and economics**

- Massel L.V., Massel A.G., Kopaygorodsky A.N.**  
The evolution of energy research and application of their results: from mathematical models and computer programs to digital twins and digital images 5
- Galperova E.V.**  
Analysis of the prospects for the use of digital technologies in economic sectors and the impact on energy consumption 20
- Massel L.V., Komendantova N.P.**  
Risk assessment of natural and technogenic threats to resilience of energy, ecology and social systems based on intelligent information technologies 31
- Erzhenin R.V.**  
Stratified model of public budget management 46

**Visual analytics**

- Zakharova A.A., Podvesovskii A.G., Lagerev D.G.**  
Visual analytics and cognitive methods for processing and analysis of heterogeneous data in multi-sensor systems: issues and trends 60
- Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E.**  
Methodology for creating assessment maps of the crisis situations hazard on the basis of cartographic information 75
- Zakharova A.A., Podvesovskii A.G., Tolstenok V.P.**  
Analysis of requirements for the ensemble of models structure for biomedical data processing 89

**Information and mathematical technologies**

- Mishenlov E.A., Malyshev A.A., Kulagin A.V., Sagun D.Ur.**  
Approach to modeling non-standing situations using a virtual simulator to train personnel 99
- Dyakovich M.P.**  
Modeling the health status of persons who have suffered from chronic mercury intoxication in the workplace 111
- Kozyrev D.B.**  
Features of practical use of information in the system through the design at the stage of technological preparation of production 122
- Dekanova N.P., Makhnev S.A.**  
Analysis of social networks - support for applicants in professional orientation 131

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭНЕРГЕТИКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИХ РЕЗУЛЬТАТОВ: ОТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ К ЦИФРОВЫМ ДВОЙНИКАМ И ЦИФРОВЫМ ОБРАЗАМ

**Массель Людмила Васильевна**

Д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,  
зав. лабораторией «Информационные технологии в энергетике»,  
e-mail: [massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

**Массель Алексей Геннадьевич**

К.т.н., старший научный сотрудник  
лаборатории «Информационные технологии в энергетике»

**Копайгородский Алексей Николаевич**

К.т.н., ведущий специалист  
лаборатории «Информационные технологии в энергетике»  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН  
664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130

**Аннотация.** В статье рассматривается новый подход к организации системных исследований энергетики, учитывающий современные тренды цифровизации: цифровые двойники и цифровые образы. Предлагается использовать, как их основу, имеющиеся в Институте систем энергетики СО РАН математические модели систем энергетики и программные комплексы, разработанные для расчетов по этим моделям. Онтологический инжиниринг предметной области и средств исследований позволит построить, для каждой области исследований, интегрированную с математической онтологическую модель, которые станут ядром цифровых двойников при исследованиях функционирования систем энергетики и ядром цифровых образов при исследованиях развития топливно–энергетического комплекса (ТЭК), объединяющего эти системы энергетики (СЭ). Для поддержки комплексных иерархических исследований, использующих новый подход, предлагается ИТ-инфраструктура, основанная на использовании современных информационных и интеллектуальных технологий.

**Ключевые слова.** Энергетические системы, математическая модель, компьютерная программа, онтологическая модель, интеллектуальные технологии, цифровой двойник, цифровой образ, цифровая тень.

**Цитирование:** Массель Л.В., Массель А.Г., Копайгородский А.Н. Эволюция технологий исследований энергетики и применения их результатов: от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 5–19. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-01

**1. Системные исследования энергетики.** Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН является одним из лидеров в области системных исследований в энергетике России. Основные научные направления ИСЭМ СО РАН: теория создания энергетических систем, комплексов и установок и управления ими; научные основы и

механизмы реализации энергетической политики России и ее регионов. В рамках этих направлений выполняются: исследования систем энергетики (электроэнергетических, газо-, нефте-, нефтепродукто-снабжения, теплосиловых); энергетической безопасности России; региональных проблем энергетики; взаимосвязей энергетики и экономики; перспективных энергетических источников и систем; исследования в области прикладной математики и информатики [17].

Основным инструментом исследований до последнего времени являлись математическое моделирование и вычислительный эксперимент. В связи с новыми трендами развития российской энергетики (интеллектуальная энергетика (Smart Grid) и цифровая энергетика) большое внимание уделяется развитию и применению интеллектуальных технологий [2].

Традиционно в ИСЭМ СО РАН принята иерархическая схема исследований, в которой согласовываются исследования и математические модели топливно-энергетического комплекса (используются экономико-математические модели) и отраслевых систем энергетики (применяются физико-математические модели) (рис. 1) [5].

Исследования прогнозирования развития ТЭК выполняются на верхнем уровне схемы с учетом результатов, полученных при исследованиях направлений развития отраслевых систем энергетики на следующих уровнях. Каждому блоку приведенной схемы соответствует совокупность математических методов, моделей и программных комплексов, с помощью которых выполняются вычислительные эксперименты с использованием этих моделей.

С целью совершенствования иерархической технологии обоснования развития энергетики в целом и ее отраслевых и территориальных составляющих, требуется выполнить формализованную интеграцию программных средств и информационного обеспечения, при этом основное внимание надо уделить разработке программно-информационных интерфейсов между решаемыми задачами в горизонтальном (между отдельными системами энергетики) и вертикальном (системы энергетики – ТЭК – внешние условия) разрезах.

Разработка и реализация таких интерфейсов должна обеспечивать следующие преимущества комплексной иерархической технологии исследований: а) сохранение (при необходимой доработке требуемых программных средств – обеспечение) конфиденциальности основных детальных массивов данных, поддерживающих конкретные задачи; б) формализацию и тем самым ускорение обмена информацией и обеспечение однозначности обмениваемых данных; в) определенную унификацию используемых информационных моделей при решении различных задач, которую потребует реализовать при согласовании и разработке интерфейсов; г) в целом повышение «стройности» и обоснованности иерархической технологии обоснования развития энергетики и ее составляющих.

В [14] был предложен подход к решению этой проблемы, но понятия цифровых двойников и цифровых образов в нем не использовались. В конце статьи будут сопоставлены основные положения предложенного ранее и предлагаемого подходов.

Далее рассматриваются основные понятия последних трендов в развитии цифровых технологий: цифровые двойники и цифровые тени, цифровые модели и цифровые образы.

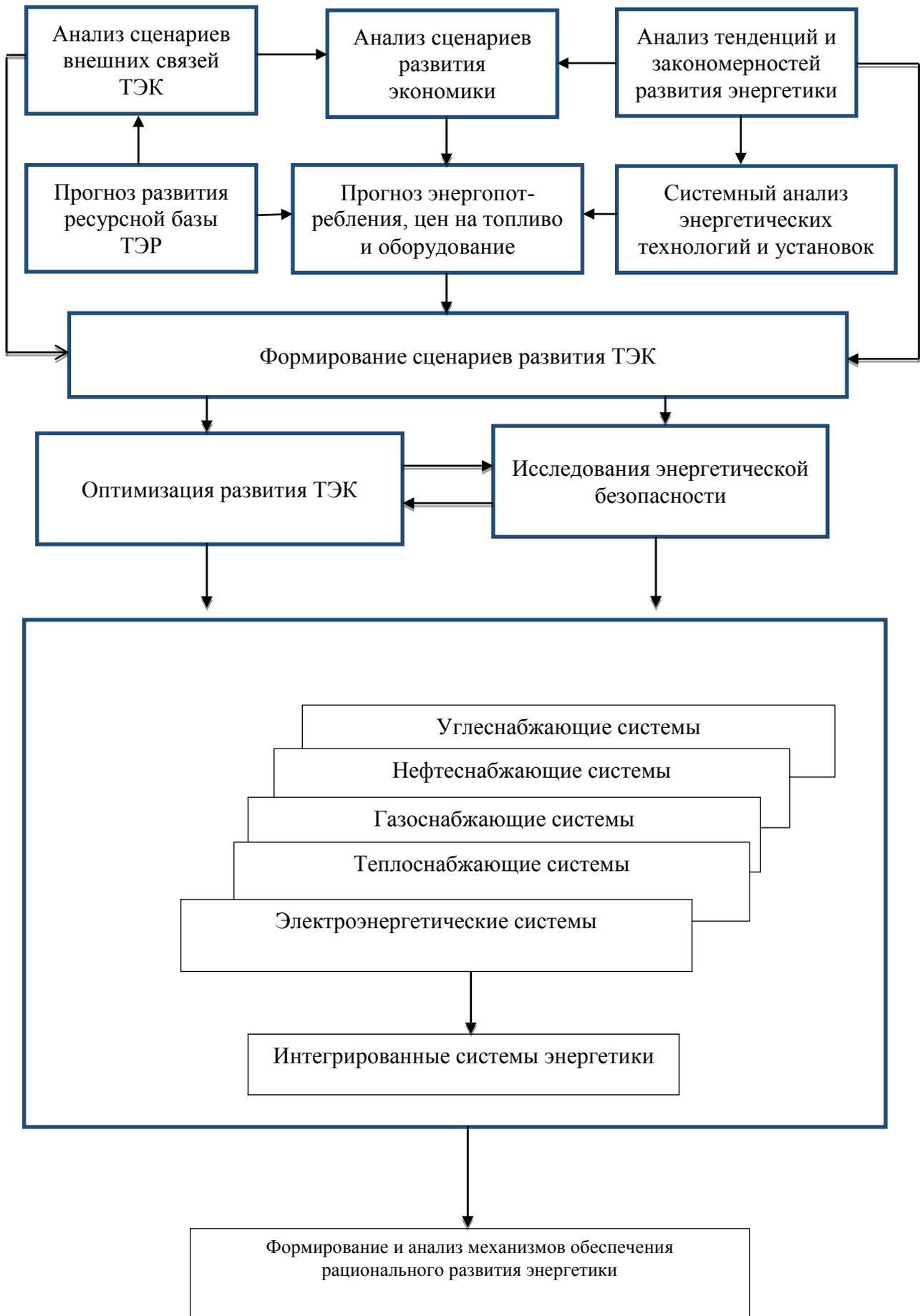


Рис. 1. Общая схема исследований по обоснованию развития энергетики

**2. Цифровые двойники и цифровые тени.** Последний тренд в развитии цифровых технологий – это создание цифровых двойников. Утверждают, что «цифровой двойник» вошел в десятку главных стратегических технологических трендов 2019 года. Понятие цифрового двойника имеет несколько определений, обзор которых выполнен, например, в [6], на основании источников [18, 20, 21, 23-25, 27-29]. Применение цифровых двойников в электроэнергетике рассмотрено главным инженером подразделения «Интеллектуальные сети» компании Siemens Е. Литвиновой [15]. Согласно [15], «наиболее подходящее определение цифрового двойника — это реальное отображение всех компонентов в жизненном цикле продукта с использованием физических данных, виртуальных данных и данных взаимодействия между ними, то есть цифровой двойник создает виртуальный прототип реального объекта, с помощью которого можно проводить эксперименты и проверять гипотезы, прогнозировать поведение объекта и решать задачу управления его жизненным циклом.»

По мнению специалистов [6], цифровых двойников можно разделить на три типа:

1. Двойник-прототип (Digital Twin Prototype). Это виртуальный аналог реально существующего элемента. Он содержит информацию, которая описывает определенный элемент на всех стадиях— начиная от требований к производству и технологических процессов при эксплуатации, заканчивая требованиями к утилизации элемента.
2. Двойник-экземпляр (Digital Twin Instance). Содержит в себе информацию по описанию элемента (оборудования), то есть данные о материалах, комплектующих, информацию от системы мониторинга оборудования.
3. Агрегированный двойник (Digital Twin Aggregate). Объединяет прототип и экземпляр, то есть собирает всю доступную информацию об оборудовании или системе.

Для компаний, которые эксплуатируют электрические сети, наиболее актуален двойник-экземпляр. Он основывается на математической модели сети. В таком цифровом двойнике может находиться информация о технических параметрах используемого оборудования (кабели, трансформаторы, выключатели и т.д.), дате его ввода в эксплуатацию, географические координаты, данные с измерительных устройств. Эту информацию используют для проведения расчетов по подключению новых потребителей, а также различных расчетов электрических сетей. Например, расчет режимов, токов короткого замыкания, координации установок релейной защиты и другие.

Как правило, эти расчеты проводят различные подразделения, и в каждом из них существует своя собственная математическая модель одной и той же физической сети. Использование разных моделей часто приводит к ошибкам и снижению точности. Применение единого цифрового двойника всеми подразделениями компании может помочь решить данную проблему. Таким образом, для электрических сетей цифровой двойник включает базу данных с информацией о сети, которая интегрирована с другими ИТ-системами энергокомпании (SCADA, геоинформационная система, система управления активами и пр.). Цифровой двойник должен синхронизировать данные, полученные из разных источников, таким образом, чтобы они точно соответствовали текущему состоянию электрической сети.

С точки зрения области построения выделяют цифровых двойников продукта, процесса и системы [6]. «Цифровой двойник продукта» представляет собой виртуальную модель конкретного продукта. «Цифровой двойник процесса» - эти модели имитируют производственные процессы. Виртуальный производственный процесс может создать различные сценарии и показать то, что произойдет при различных ситуациях. Это позволяет компании разрабатывать наиболее эффективную методику производства. Процесс можно оптимизировать с помощью виртуальных двойников продукта для каждой части оборудования. «Цифровой двойник системы» - это виртуальные модели всей системы целиком (например, завода или фабрики). Они собирают огромные объемы операционных данных, производимых устройствами и продуктами в системе, получают представление и создают новые бизнес-возможности для оптимизации всех процессов.

Все вышеприведенные определения относятся к применению цифровых двойников в высокотехнологичной промышленности, но в [8] говорится уже о создании цифрового двойника научно-технического центра нефтегазовой промышленности.

Кроме того, используется термин «цифровая тень». Цифровую тень можно определить, как систему связей и зависимостей, описывающих поведение реального объекта, как правило, в нормальных условиях работы и содержащихся в избыточных больших данных, получаемых с реального объекта при помощи технологий промышленного интернета. Цифровая тень способна предсказать поведение реального объекта только в тех условиях, в которых осуществлялся сбор данных, но не позволяет моделировать другие ситуации [6]. Сравнение цифровых двойников и цифровых теней рассматривается, например, А. Боровковым [3].

**3. Цифровые модели и цифровые образы.** Руководитель Национального центра когнитивных разработок Университета ИТМО (СПб) д.т.н. А.В. Бухановский в своем интервью сопоставляет цифровые модели, цифровые двойники и цифровые образы [4]. Приведем основные положения этого интервью.

«Цифровая модель, по сути, компьютерная программа, способная с определенной точностью рассчитывать характеристики поведения реального объекта в различных условиях внешней среды – как наблюдаемых, так и гипотетических. Достоинство цифровой модели состоит в том, что она позволяет ставить над объектом виртуальные эксперименты, что особенно важно в ситуациях, когда реальный эксперимент неприемлемо дорог или даже опасен». Это в полной мере относится к исследованиям энергетики.

«Цифровой двойник является более емким информационным объектом, поскольку включает в себя одну или несколько взаимосвязанных цифровых моделей, а также наборы данных, необходимых для их работы, часто получаемых в режиме времени, близком к реальному, непосредственно с реального объекта техники. Еще более общим является понятие «цифрового образа», который, помимо моделей и данных объекта техники, включает в себя поведенческие и когнитивные модели связанной с ним человеческой деятельности (например, операторов оборудования, административного персонала). Цифровые образы – основа для создания нового поколения систем поддержки принятия решений, отвечающих логике седьмого технологического уклада».

«Когнитивные технологии основываются тоже на цифровых моделях, однако предназначенных для имитации принятия решений человеком в условиях неопределенности на основе накопленного опыта.

При обилии разнообразных данных о поведении реального объекта или его цифрового двойника даже квалифицированный эксперт просто не способен быстро и качественно проанализировать ситуацию, полагаясь только на свои органы чувств и мыслительные способности. Потому здесь на помощь приходят различные механизмы искусственного интеллекта, которые автоматизируют процесс интерпретации таких данных с целью определения значимых фактов, для того, чтобы на их основе сформировать объективную оценку ситуации и предложить варианты дальнейших действий.

При этом когнитивные технологии не могут заменить специалиста целиком: они лишь помогают избежать ошибок, неизбежных в условиях ограниченного времени на принятие решений, а также освобождают от рутинных действий, позволяя концентрировать внимание на действительно нетривиальных задачах».

Все вышесказанное можно отнести к разработке интеллектуальных систем поддержки принятия стратегических решений по развитию энергетики, которой занимаются авторы, используя, в том числе, когнитивные технологии.

Кроме того, заслуживает внимание следующее положение, непосредственно связанное с энергетикой:

«Когнитивные технологии в их современном понимании являются очень молодым направлением, поскольку неотъемлемо связаны с возможностями сбора, хранения и обработки сверхбольших объемов данных. Потому приоритет здесь имеют отрасли и предприятия, в которых технологии Big Data уже устойчиво нашли свое место, например – финансы, ритейл, цифровые медиа. Для промышленных предприятий (включая топливно-энергетический комплекс) внедрять такие технологии сложнее, поскольку исходные данные порождаются не цифровыми процессами, а привязаны к материальным объектам. Здесь ключевым фактором роста является наличие собственной инфраструктуры сбора и хранения данных, а также создания коллекций профессиональных данных для обучения когнитивных моделей.

В отличие от традиционных направлений искусственного интеллекта (например, распознавания голоса или технического зрения), специфика профессиональных данных очень сильно связана с технологическими и бизнес-процессами конкретного предприятия. Потому возможности тиражирования таких данных и решений на их основе весьма ограничены; нужно ориентироваться на собственные коллекции» [4].

Опираясь на анализ приведенных источников и собственный опыт в области разработки интеллектуальных СППР и инфраструктуры научных исследований, авторы предлагают следующий подход к организации системных исследований в энергетике с использованием современных трендов цифровизации.

**4. Переход в исследованиях энергетики от математических моделей и компьютерных программ к цифровым двойникам и цифровым образам.** Обоснование возможности и целесообразности такого перехода можно подтвердить схемой цифрового двойника на основе онтологической модели, предложенной д.т.н. С.П. Ковалевым (ИПУ РАН) с соавторами [1, 19] (рис. 2).

Для нас важным в этой архитектуре является то, что «главным компонентом цифрового двойника является комплекс математических и экономических расчетных, имитационных, нейросетевых моделей, описывающих все аспекты поведения объекта. Предусматриваются мощные механизмы калибровки моделей в целях повышения их

достоверности, в том числе путем машинного обучения [22]. В целях обеспечения удобного доступа к моделям в составе цифрового двойника, их часто оформляют как сервисы [26].

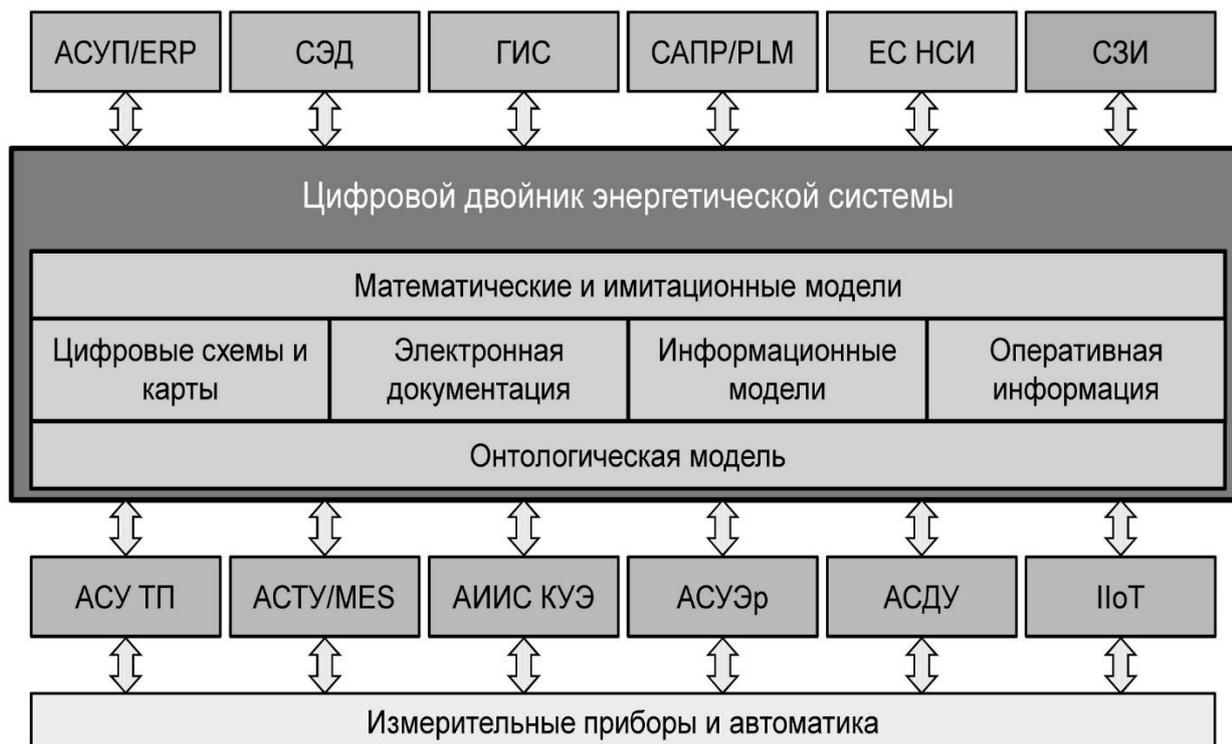


Рис. 2. Архитектура цифрового двойника энергетической системы.

Идея использования имитационных моделей в качестве основы цифрового двойника высказывалась, в частности, в [16], но нельзя согласиться с утверждением автора, что «информационные технологии являются обеспечивающим функционирование цифровых двойников инструментом, который не является определяющим фактором», поскольку именно развитие информационных технологий и достижения в этой области позволили говорить о цифровых двойниках.

В рисунке 2 для нас важно, что слой математических моделей цифрового двойника «собирается» над онтологической моделью. Если вернуться к иерархической схеме по обоснованию развития энергетики (рис. 1), то представляется, что на основе онтологических и математических (физико-технических) моделей отраслевых систем энергетики могут быть построены цифровые двойники этих систем. После решения вопросов обеспечения этих моделей данными, вопросов информационного взаимодействия с потоками данных и проведения вычислительных экспериментов на цифровых двойниках они могут быть рекомендованы для практического использования при управлении соответствующими энергетическими системами.

Можно предложить следующие этапы перехода к «цифровым двойникам» в исследованиях энергетических систем:

- 1) анализ существующих математических моделей и реализующих их компьютерных программ (программных комплексов);
- 2) онтологический инжиниринг предметной области (соответствующей энергосистемы) и построение онтологической модели;

- 3) модификация, при необходимости, математических моделей и реинжиниринг программ и программных комплексов (если они перешли в категорию унаследованного программного обеспечения);
- 4) определение исходных данных (состав, источники получения, возможность получения оперативных данных, базы данных и др.);
- 5) разработка web-приложений и web-сервисов для реализации цифровых двойников, на основе прошедших реинжиниринг цифровых программ, создание инфраструктуры для проведения иерархических комплексных исследований с использованием цифровых двойников.

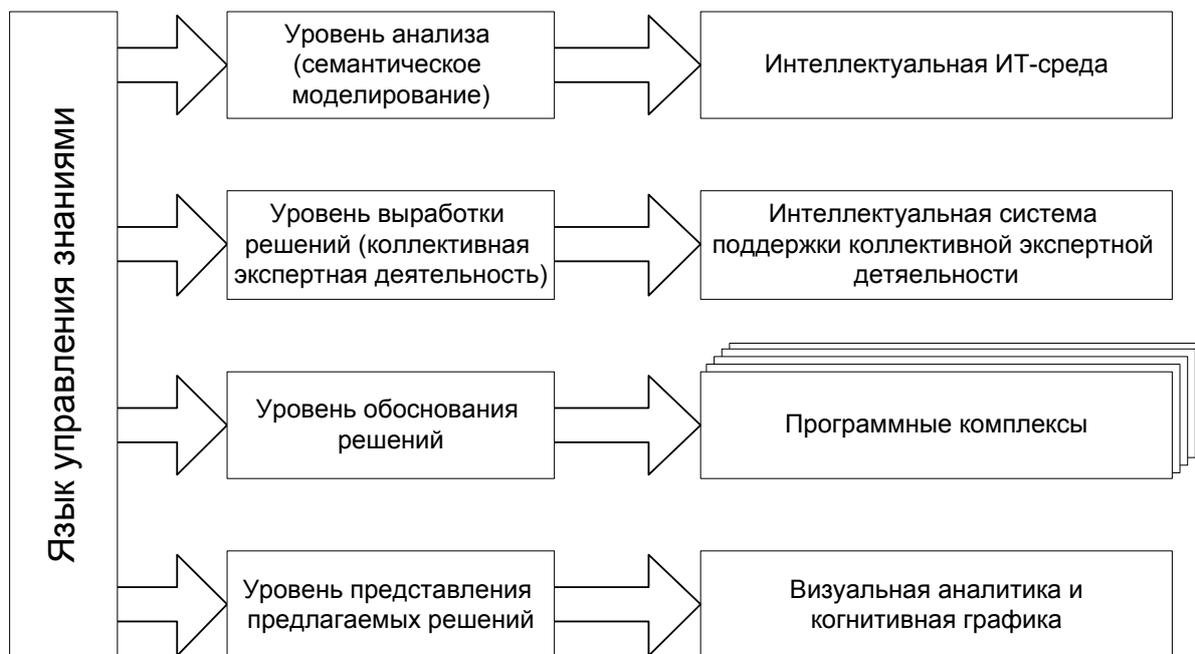
Более сложной задачей является построение «цифровых образов», необходимых для исследований развития ТЭК, которые могут стать основой для интеллектуальных систем поддержки стратегических решений по развитию энергетики. Здесь ставится задача интеграции математических и семантических моделей (в первую очередь – когнитивных), опыт разработки которых у авторов имеется [10, 11]. Полная библиография работ авторов в области разработки и применения интеллектуальных и когнитивных технологий приведена в [12].

При переходе к «цифровым образам» к вышеперечисленным этапам добавятся (после этапа 4) еще два этапа: разработки семантических (в первую очередь когнитивных) моделей и их интеграции с математическими моделями.

**5. Инфраструктура для проведения иерархических комплексных исследований в энергетике с использованием цифровых двойников и цифровых образов.** Основой инфраструктуры для проведения иерархических комплексных исследований в энергетике с использованием цифровых двойников и цифровых образов может стать модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды (рис. 4), предложенная авторами ранее в [14]. Для схемы, приведенной на рисунке 1, были выделены следующие уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства (рис. 3):

1. Уровень анализа (используется семантическое моделирование), поддерживается Интеллектуальной ИТ-средой [24].
2. Уровень коллективной выработки согласованных решений (может использоваться, в т.ч., семантическое моделирование, методы согласования решений) – поддерживается Интеллектуальной системой поддержки коллективной экспертной деятельности [29].
3. Уровень обоснования решений (выполняются расчеты вариантов, предложенных на предыдущем этапе, с использованием традиционных программных комплексов для исследований ТЭК и СЭ) – в новом подходе – с использованием цифровых двойников и цифровых образов.
4. Уровень представления предлагаемых решений (используются средства визуальной аналитики и когнитивной графики).

Интеграция инструментальных средств осуществляется с помощью языка управления знаниями, который рассматривается как упрощенная версия разработанного ранее языка ситуационного управления (Contingency Management Language – CML) [28].

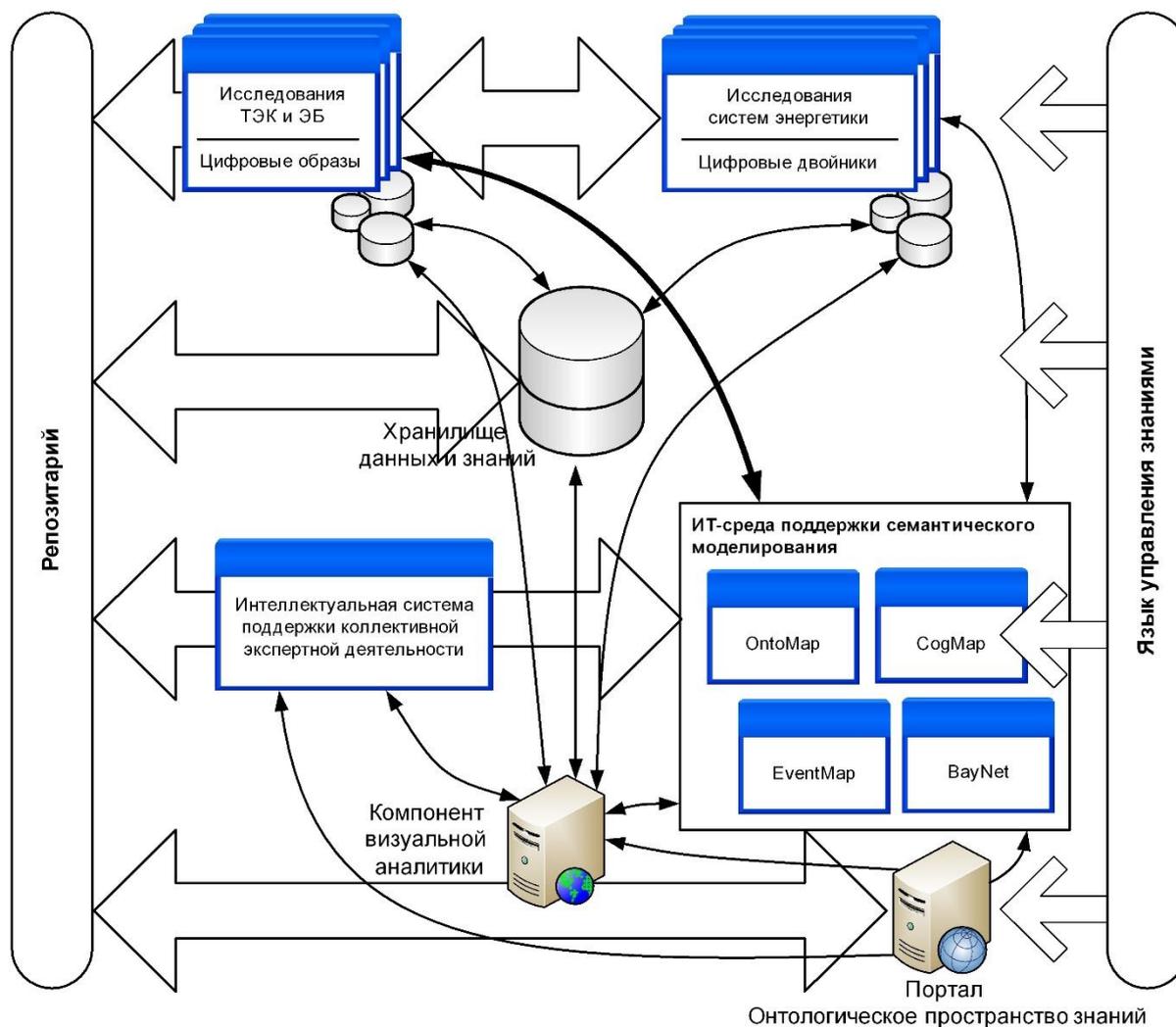


**Рис. 3.** Уровни (этапы) исследований и поддерживающие их инструментальные средства

При реализации предлагаемой инфраструктуры «ПК и БД для исследований ТЭК и проблем энергетической безопасности» (на рис. 4 вверху слева) предлагается заменить «цифровыми образами» ТЭК, а «ПК и БД для исследований отраслевых систем энергетики» (на рис. 4 вверху справа) – заменить «цифровыми двойниками» соответствующих систем.

**Заключение.** В статье предлагается новый подход к организации системных исследований в энергетике, основанный на использовании современных трендов в развитии цифровых технологий – цифровых двойников и цифровых образов. Подробно рассматриваются эти понятия. Цитаты из работ авторов, посвященные этой тематике, приводятся в кавычках, с тем, чтобы не исказить их смысл. Предлагается интеграция математических и онтологических моделей для построения цифровых двойников систем энергетики, которые дополняются семантическими (в первую очередь когнитивными) моделями для построения цифровых образов в исследованиях развития ТЭК. Как ядро инфраструктуры комплексных исследований, основанных на использовании цифровых двойников и цифровых образов, предлагается модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды, основные компоненты которой уже реализованы в авторском коллективе, как научные прототипы. Данная статья является первой попыткой изложить предлагаемый подход. Представляется, что ее обсуждение может привести к переосмыслению подхода к проведению системных исследований энергетик и позволит говорить о новом качестве исследований и приближении их результатов к практическому применению при управлении системами энергетики и обосновании и принятии стратегических решений по развитию ТЭК в целом.

**Благодарности.** Результаты получены в рамках выполнения проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН АААА-А17-117030310444-2 (проект №349-2016-0005) и при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №19-07-00351, №18-07-00714, № 17-07-01341, авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований.



**Рис. 4.** Модифицированная архитектура многоагентной интеллектуальной среды как основа инфраструктуры для проведения иерархических комплексных исследований энергетики с использованием цифровых двойников и цифровых образов

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриюшкевич С.К., Ковалев С.П., Нефедов Е. Подходы к разработке и применению цифровых двойников энергетических систем // *Цифровая подстанция*. № 12. 2019. С. 38–43.
2. Бердников Р.Н., Бушуев В.В., Васильев С.Н., Веселов Ф.В., Воропай Н.И. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно - адаптивной сетью. М.: ФСК ЕЭС. 2012. 219 с.
3. Боровков А. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (дата обращения 24.11.2019)
4. Бухановский А.В. Цифровые двойники ведут нас в седьмой технологический уклад // *Газета "Энергетика и промышленность России"*. № 07 (363), апрель 2019 г.
5. Воропай Н.И., Клер А.М., Кононов Ю.Д., Санеев Б.Г., Сендеров С.М., Стенников В.А. Методические основы стратегического планирования развития энергетики // *Энергетическая политика*. 2018. вып.3. С. 35–44.

6. Кокорев Д.С., Юрин А.А. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса. *Colloquium-journal // Technical science*. №10(34), 2019. С. 31–35.  
DOI: [10.24411/2520-6990-2019-10264](https://doi.org/10.24411/2520-6990-2019-10264)
7. Копайгородский А.Н. Управление знаниями в коллективной экспертной деятельности по обоснованию рекомендуемых решений в энергетике // Труды XX Российской научной конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями (ИП&УЗ – 2017)». М.: РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2017. С. 128–135.
8. Краснов Ф., Хасанов М. Цифровой двойник научной организации: подходы и методики // *International Journal of Open Information Technologies*. ISSN: 2307-8162. 2019. vol 7. № 6. С. 62–66. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-nauchnoy-organizatsii-podhody-i-metodiki> (дата обращения 24.11.2019)
9. Массель Л.В., Массель А.Г. Интеллектуальные вычисления в исследованиях направлений развития энергетики // *Известия Томского политехнического университета*. 2012. Т. 321. № 5. Управление, вычислительная техника и информатика. С. 135–141.
10. Массель Л.В., Массель А.Г. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования // *Открытые семантические технологии для интеллектуальных систем*. № 3. 2013. Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. С. 247–250.
11. Массель Л.В. Интеграция семантического и математического моделирования в исследованиях проблем энергетической безопасности // *Международная конференция «Моделирование-2012»: труды*. Киев. ИПМЭ НАН Украины. 2012. С. 270–273.
12. Массель Л.В. Проблемы создания интеллектуальных систем семиотического типа для стратегического ситуационного управления в критических инфраструктурах // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. Научный журнал. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2016. № 1. С. 7–27.
13. Массель Л.В., Массель А.Г. Язык описания и управления знаниями в интеллектуальной системе семиотического типа // Труды XX Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Т. 3. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. С. 112–124.
14. Массель Л.В. Методы и интеллектуальные технологии научного обоснования стратегических решений по цифровой трансформации энергетики // *Энергетическая политика*. 2018. № 5. С. 30–42.
15. Никитина Е. Попали в сети: как работают цифровые двойники в электроэнергетике. Режим доступа: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (дата обращения 24.11.2019)
16. Петров А.В. Имитация как основа цифровых двойников. *Вестник ИрГТУ*. 2018. Том 2. №10. С. 56–66.
17. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука. 2010. 686 с.

18. Толстых Т.О., Гамидуллаева Л.А., Шкарупета Е.В. Ключевые факторы развития промышленных предприятий в условиях цифрового производства и индустрии 4.0 // Экономика в промышленности. 2018. Т. 11. №. 1. С. 11–19.
  19. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE. 2019. Pp. 1–6.
  20. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // Journal of Service Management. 2018. Т. 29. №. 5. Pp. 776–808.
  21. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. Т. 25. №. 2. Pp. 87–92.
  22. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // Benchmark. July 2018. Pp. 48–53.
  23. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. Pp. 1818.
  24. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing letters. 2015. Т. 3. Pp. 18–23.
  25. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. 7 p.
  26. Qia Q., Taoa F., Zuoa Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72. Pp. 237–242.
  27. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. Pp. 567–572.
  28. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals. 2017. Т. 66. №. 1. Pp. 137–140.
  29. Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2018. Pp. 1–19.
- 

**UDK 004.89 : 620.9**

**THE EVOLUTION OF ENERGY RESEARCH AND APPLICATION OF THEIR RESULTS: FROM MATHEMATICAL MODELS AND COMPUTER PROGRAMS TO DIGITAL TWINS AND DIGITAL IMAGES**

**Lyudmila V. Massel**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,  
Head Laboratory "Information Technologies in Energy", e-mail: [massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

**Alexey G. Massel**

Ph.D., Senior Researcher Laboratory "Information Technologies in Energy"

**Alexey N. Kopaygorodsky**

Ph.D., Leading Specialist Laboratory "Information Technologies in Energy"

Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, 664033 Irkutsk, st. Lermontov 130

**Abstract.** The article proposes a new approach to organizing systemic studies of energy, taking into account modern trends in digitalization digital twins and digital images. It is proposed to apply, as their basis, developed at the Institute of Energy Systems of the SB RAS the mathematical models of energy systems and the software systems, used for calculations using these models. Ontological engineering of the subject area and research tools will allow to build, for each research area, integrated mathematical and ontological models. These models will become the nucleus of digital twins in studies of the functioning of energy systems and the nucleus of digital images in studies of the development of the fuel and energy complex (FEC) that combines these energy systems. To support hierarchical research using a new approach, an IT infrastructure based on the use of modern information and intelligent technologies is proposed.

**Keywords:** energy systems, mathematical model, computer program, ontological model, intelligent technologies, digital double, digital image, digital shadow.

**Acknowledgment.** The results were obtained in the framework of the project on state assignment to ISEM SB RAS AAAA-A17-117030310444-2 (project № 349-2016-0005) and with partial financial support from RFBR grants № 19-07-00351, № 18-07-00714, № 17 -07-01341, the authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research.

### References

1. Andryushkevich S.K., Kovalev S.P., Nefedov E. Podhody k razrabotke i primeneniju cifrovyyh dvoynikov jenergeticheskikh sistem [Approaches to the development and use of digital twins of energy systems] // Cifrovaja podstancija = Digital substation. 2019. № 12. Pp. 38–43. (in Russian)
2. Berdnikov RN, Bushuev VV, Vasiliev S.N., Veselov F.V., Voropay N.I. et al. Konceptcija intellektual'noj jelektrojenergeticheskoy sistemy s aktivno- adaptivnoj set'ju [The concept of an intelligent electric power system with an active adaptive network]. Moscow. FGC UES, 2012. 219 p. (in Russian)
3. Borovkov A. Cifrovye dvojniki i cifrovye teni v vysokotehnologichnoj promyshlennosti [Digital twins and digital shadows in the high-tech industry]. Available at: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvojniki-i-cifrovie-teni-v-visokotehnologichnoi-promishlennosti> (accessed 11.24.2019). (in Russian)
4. Bukhanovsky A.V. Cifrovye dvojniki vedut nas v sed'moj tehnologicheskij ukklad [Digital twins lead us to the seventh technological stage] // Gazeta "Jenergetika i promyshlennost' Rossii" = The newspaper "Energy and Industry of Russia". April 2019. № 07 (363). (in Russian)
5. Voropai N.I., Cler A.M., Kononov Yu.D., Saneev B.G., Senderov S.M., Stennikov V.A. Metodicheskie osnovy strategicheskogo planirovanija razvitija jenergetiki [Methodological foundations of strategic planning for the development of energy] // Jenergeticheskaja politika = Energy Policy. 2018. Issue 3. Pp. 35–44 (in Russian)..

6. Kokorev D.S., Yurin A.A. Cifrovye dvojniki: ponjatie, tipy i preimushhestva dlja biznesa. [Digital twins: concept, types and benefits for business]. Colloquium-journal / Technical science. 2019. No. 10 (34). Pp. 31–35. DOI: 10.24411 / 2520-6990-2019-10264 (in Russian)
7. Kopaygorodsky A.N. Upravlenie znanijami v kollektivnoj jekspertnoj dejatel'nosti po obosnovaniju rekomenduemyh reshenij v jenergetike [Knowledge management in collective expert activity on the substantiation of recommended solutions in the energy sector] // Trudy XX Rossijskoj nauchnoj konferencii «Inzhiniring predpriyatij i upravlenie znanijami» = Proceedings of the XX Russian Scientific Conference "Enterprise Engineering and Knowledge Management". 2017. Moscow. REU im. G.V. Plekhanova = Plekhanov Russian University of Economics. Pp. 128–135. (in Russian)
8. Krasnov F., Khasanov M. Tsifrovoy dvoynik nauchnoy organizatsii: podkhody i metodiki [Digital twin of scientific organization: approaches and methods] // International Journal of Open Information Technologies ISSN: 2307-8162 vol. 7. № 6. 2019. Pp. 62–66. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-dvoynik-nauchnoy-organizatsii-podhody-i-metodiki> (accessed 11.24.2019) (in Russian)
9. Massel L.V., Massel A.G. Intel'lectual'nye vychislenija v issledovanijah napravlenij razvitija jenergetiki [Intelligent computing in studies of energy development directions] // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2012. V. 321. № 5. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika = = News of Tomsk Polytechnic University. 2012. V. 321. № 5. Management, computer engineering and computer science. Pp. 135-141. (in Russian)
10. Massel L.V., Massel A.G. Semanticheskie tehnologii na osnove integracii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytijnogo modelirovanija [Semantic technologies based on the integration of ontological, cognitive and event modeling] // Otkrytye semanticheskie tehnologii dlja intellektual'nyh system = Open semantic technologies for intelligent systems. 2013. № 3. Minsk: Belorusskij gosudarstvennyj universitet informatiki i radiojelektroniki = Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. Pp. 247–250. (in Russian)
11. Massel L.V. Integracija semanticheskogo i matematicheskogo modelirovanija v issledovanijah problem jenergeticheskoi bezopasnosti = Integration of semantic and mathematical modeling in studies of energy security problems // Mezhdunarodnaja konferencija «Modelirovanie-2012»: trudy = International Conference "Modeling-2012": proceedings. Kiev. IPME NAS of Ukraine. 2012. Pp. 270–273. (in Russian)
12. Massel L.V. Problemy sozdaniya intellektual'nyh sistem semioticheskogo tipa dlja strategicheskogo situacionnogo upravlenija v kriticheskix infrastrukturah [Problems of creating intelligent systems of the semiotic type for strategic situational management in critical infrastructures] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii. Nauchnyj zhurnal = Information and mathematical technologies in science and management. Science Magazine. Irkutsk: ESI SB RAS. 2016. № 1. Pp. 7–27. (in Russian)
13. Massel L.V., Massel A.G. Jazyk opisaniya i upravlenija znanijami v intellektual'noj sisteme semioticheskogo tipa [Language for describing and managing knowledge in an intelligent system of semiotic type] // Trudy XX Bajkal'skoj Vserossijskoj konferencii "Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii" = Proceedings of the XX Baikal All-Russian Conference "Information and mathematical technologies in science and management". T. 3. Irkutsk. ESI SB RAS. 2015. Pp. 112–124. (in Russian)

14. Massel L.V. Metody i intellektual'nye tehnologii nauchnogo obosnovaniya strategicheskikh reshenij po cifrovoj transformacii jenergetiki [Methods and intelligent technologies for the scientific justification of strategic decisions on the digital transformation of energy] // Jenergeticheskaja politika = Energy Policy. 2018. № 5. Pp. 30–42. (in Russian)
15. Nikitina E. Popali v seti: kak rabotajut cifrovye dvojniki v jelektrojenergetike [Caught in the network: how digital doubles work in the electric power industry]. Available at: <https://pro.rbc.ru/news/5db1b59a9a79474bb142a3fe> (accessed 11.24.2019) (in Russian)
16. Petrov A.V. Imitacija kak osnova cifrovyh dvojnikov [Imitation as the basis of digital twins] // Vestnik IrGTU = Bulletin of ISTU. 2018. Volume 2. № 10. Pp. 56–66. (in Russian)
17. Sistemnye issledovanija v jenergetike: Retrospektiva nauchnyh napravlenij SJeI–ISJeM [Systemic research in the energy sector: Retrospective of scientific directions SEI – ISEM] / ed. by N.I. Voropay. Novosibirsk. Nauka = Science. 2010. 686 p. (in Russian)
18. Tolstykh T.O., Gamidullaeva L.A., Shkarupeta E.V. Klyuchevyye faktory razvitiya promyshlennykh predpriyatij v usloviyakh tsifrovogo proizvodstva i industrii 4.0 [Key factors for the development of industrial enterprises in the context of digital production and Industry 4.0] // Ekonomika v promyshlennosti = Economics in Industry. 2018. T. 11. № 1. Pp. 11–19. (in Russian)
19. Andryushkevich S.K., Kovalyov S.P., Nefedov E. Composition and application of power system digital twins based on ontological modeling // Proc. 17<sup>th</sup> IEEE Intl. Conf. on Industrial Informatics INDIN'19. Helsinki-Espoo, Finland: IEEE. 2019. Pp. 1–6.
20. Bolton R. N. et al. Customer experience challenges: bringing together digital, physical and social realms // Journal of Service Management. 2018. T. 29. №. 5. Pp. 776–808.
21. El Saddik A. Digital twins: the convergence of multimedia technologies // IEEE MultiMedia. 2018. T. 25. №. 2. Pp. 87–92.
22. Frolov D. How machine learning empowers models for digital twins // Benchmark. July 2018. Pp. 48–53.
23. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles // 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012. Pp. 1818.
24. Lee J., Bagheri B., Kao H.A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing letters. 2015. T. 3. Pp. 18–23.
25. Michael W. Grieves Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. LLC. 2014. 7 p.
26. Qia Q., Taoa F., Zuoa Y., Zhaob D. Digital twin service towards smart manufacturing // Procedia CIRP. 2018. Vol. 72. Pp. 237–242.
27. Rosen R., Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. IFAC-PapersOnLine. 2015. Pp. 567–572.
28. Söderberg R. et al. Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production // CIRP Annals. 2017. T. 66. №. 1. Pp. 137–140.
29. Tao F. et al. Digital twin-driven product design framework // International Journal of Production Research. 2018. Pp. 1–19.

## АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕКТОРАХ ЭКОНОМИКИ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ

Гальперова Елена Васильевна

К.т.н., доцент, старший научный сотрудник отдела Энергетической безопасности

e-mail: [galper@isem.irk.ru](mailto:galper@isem.irk.ru)

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130

**Аннотация.** Прогнозирование спроса на топливно-энергетические ресурсы является важной фундаментальной частью исследований при разработке и принятии стратегических решений в области энергетической и экономической безопасности страны и регионов. Выявление и анализ влияния факторов и взаимосвязей в энергетике и экономике на объемы и структуру спроса на энергоносители являются неотъемлемой частью методологии долгосрочного прогнозирования энергопотребления. Использование цифровых технологий, связанное с мониторингом, получением, обработкой больших объемов данных во всех сферах экономики и жизни населения уже сегодня приводит к потреблению более 5% электроэнергии в мире и предполагается дальнейший рост этого потребления. В статье анализируются основные цифровые технологии в разных секторах экономики. Приводятся отдельные оценки их влияния на спрос на разные виды ТЭР. Отмечается большая неопределенность в существующих оценках перспективного энергопотребления, зависящая от возможной политики государства, изменений в стиле жизни населения, скорости развития и внедрения технических инноваций.

**Ключевые слова:** энергопотребление, энергоэффективность, энергосбережение, цифровые технологии, центр обработки данных, подключенные устройства.

**Цитирование:** Гальперова Е.В. Анализ перспектив применения цифровых технологий в секторах экономики и их влияния на энергопотребление // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 20–30. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-02

**Введение.** Долгосрочное прогнозирование спроса на разные виды энергоносителей является важным этапом при разработке программ и стратегий развития энергетики и экономики страны и регионов, а также принятия решений в области политики повышения качества жизни населения. Долгосрочное прогнозирование спроса на энергоносители является многоэтапным и многоуровневым процессом исследования влияния факторов в меняющихся условиях развития энергетики и экономики на объемы и структуру динамики топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Одним из новых факторов научно-технического прогресса, в корне меняющим в перспективе взаимосвязи потребителей и производителей энергии, является внедрение цифровых технологий [12, 14, 28]. В ИСЭМ СО РАН разработан [2, 3] и постоянно развивается [4] методический подход к долгосрочному прогнозированию спроса на топливо и энергию, дальнейшее совершенствование которого идет в направлении учета особенностей развития интеллектуальных электроэнергетических систем, в частности,

появления активных потребителей и исследования их влияния на уровни спроса на электроэнергию [5, 22]. Однако, распространение цифровых технологий затрагивает и другие сектора экономики предоставляя им новые возможности в развитии и управлении. В связи с этим, анализ возможных направлений внедрения цифровых технологий в отдельных отраслях экономики и их влияния на энергопотребление становятся важным и актуальным для дальнейшей модернизации методического подхода к долгосрочному прогнозированию спроса на энергоносители. Целью статьи является анализ возможного влияния распространения цифровых технологий на перспективную динамику энергопотребления.

**Существующее состояние.** Уже сегодня цифровые технологии проникают во все сферы современной жизни и влияют на то как мы работаем, передвигаемся, учимся, получаем услуги, ведем домашнее хозяйство, развлекаемся и прочее. С каждым годом цифровые технологии становятся все более доступными, связанными между собой, они становятся быстрее, дешевле и мобильнее. В 2019 г. более 4 миллиардов человек, или более половины населения мира, пользуются Интернетом (2001 г. - 500 млн.). В России по данным Mediascope, в 2019 г. общая аудитория Интернета (пользователи в возрасте 12 - 64 лет) составила 109,6 миллионов, а уровень проникновения интернета составил 76% (в 2018 г. – 73%) [1].

Бурный рост использования информационных и коммуникационных технологий в экономике стал возможен благодаря техническому прогрессу и стремительному удешевлению трех компонентов: данные, аналитика и связь. Снижение стоимости сенсоров (более чем на 95 % с 2008 г.) привело к их широкому внедрению, что вызвало рост объема доступных данных и повсеместное распространение цифровой информации. Уменьшение стоимости вычислительных мощностей, развитие «облачных» технологий и «больших данных», прогресс в углубленной аналитике, включая машинное обучение, открывает новые возможности мониторинга, анализа, изучения процессов для получения полезной информации, формирования новых знаний и идей. Удешевление передачи данных через цифровые сети связи при повышении ее скорости, развитие технической возможности установки модулей передачи и обработки данных на датчики, сенсоры и небольшие устройства, а также анализ полученной информации создают условия для мобильного управления промышленными и бытовыми процессами.

В настоящее время цифровые технологии применяются в промышленности для управления технологическими процессами, повышения производительности и безопасности труда; на транспорте для управления светофорами, автоматического сбора платы за проезд, определения местоположения для помощи на дорогах; в жилых и общественных зданиях для учета использования энергоресурсов и автоматического регулирования работы инженерных систем и электроприборов. Появление и распространение таких технологий, как Интернет вещей (IoT) и Интернет услуг (IoS), системы «умный дом» (smart home) и «умный город» (smart city), трансформируют требования к ведению бизнеса, предоставлению услуг, ведению домашнего хозяйства и могут существенно изменить модель экономики и образ жизни людей.

**Перспективы использования цифровых технологий в основных секторах экономики и влияния на спрос на энергию.** В промышленности применение облачных платформ для обмена информацией конкретного промышленного объекта с его смежниками, поставщиками, потребителями позволяет максимально эффективно использовать активы и

минимизировать затраты энергии на перевозку сырья, полуфабрикатов и готовых изделий. Использование промышленных роботов и аддитивных технологий<sup>1</sup> может привести к значительной экономии энергии, как на самих промышленных предприятиях, так и у его партнеров за счет улучшения качества продукции, уменьшения времени простоя и непроизводственных затрат, снижения объемов отходов производства [6].

На транспорте цифровые технологии помогают повысить энергоэффективность и снизить затраты на техническое обслуживание и эксплуатацию [21]. В автомобильном транспорте глобальная система позиционирования (GPS) в режиме реального времени помогает правильному выбору направления, скорости движения и способствует рационализации потребления энергии автомобилями. В авиационном транспорте анализ больших данных способствует оптимизации планирования маршрутов, помогает пилотам принимать решения в полете и сокращать расход топлива. В морском транспорте улучшение связи между судами и портами позволяет выбрать оптимальную скорость судна в соответствии с требованиями времени прибытия в порт, что обеспечивает значительную экономию топлива. На железнодорожном транспорте датчики температуры двигателя и вибрации рельсового полотна позволяют контролировать условия эксплуатации подвижного состава, уже существуют полностью автоматизированные поезда.

Самые революционные преобразования прогнозируются в автомобильном транспорте, где повсеместное распространение автоматизации, коммуникационных технологий, сервисов кашеринга<sup>2</sup>, наряду с дальнейшей электрификацией могут полностью изменить саму систему его организации. При этом по мнению специалистов [19], в долгосрочной перспективе использование энергии на автомобильном транспорте может как сократиться примерно в два раза, так и увеличиться на эту же величину в зависимости от масштабов внедрения технологий, их взаимодействия, поведения населения и политики государства.

Цифровые технологии предоставляют новые возможности для улучшения энергоснабжения, повышения комфорта, снижения общего потребления энергии в жилых и коммерческих зданиях. Системы активного управления собирают, обрабатывают и анализируют данные в режиме реального времени и позволяют управлять энергопотребляющими процессами с помощью единой интерфейсной панели (например, смартфона или планшета). Согласно прогнозу международного энергетического агентства (МЭА) [19], повышение эксплуатационной эффективности зданий с использованием данных в реальном времени может снизить общее потребление энергии в период 2017-2040 гг. на 10%. В первую очередь, это касается процессов отопления и кондиционирования, где благодаря использованию датчиков и интеллектуальных термостатов [26] потенциальная экономия энергии может составить от 15% до 50% (в зависимости от типа здания и системы управления). Интеллектуальное освещение [23], состоящее из высокопроизводительных светодиодов, подключенных к системам управления зданием позволяет анализировать предпочтения пользователей, освещенность, режим эксплуатации здания и дает возможность обеспечить более высокое качество освещения при существенной экономии энергии. По оценкам МЭА, интеллектуальное освещение может сэкономить почти 14% от общего

<sup>1</sup> Аддитивное производство (от [англ.](#) Additive Manufacturing) или 3D-печать — группа технологических методов производства изделий и прототипов, основанная на поэтапном формировании изделия путём добавления материала на основу (платформу или заготовку).

<sup>2</sup> Каршеринг ([англ.](#) carsharing) - вид аренды автомобилей чаще всего для внутригородских и/или коротких поездок. Является одним из глобальных направлений развития экономики совместного пользования.

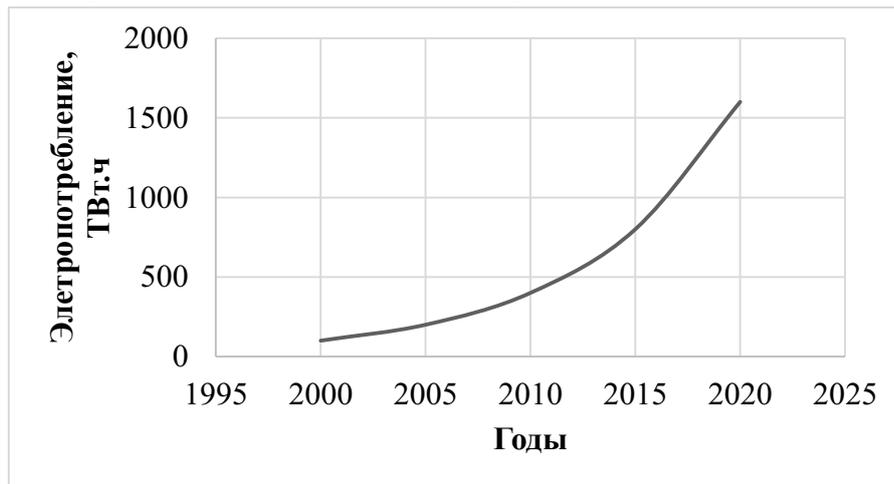
конечного потребления энергии на цели освещения в период 2017-2040 гг., в дополнение к экономии, которая уже привнесена широким распространением самих светодиодов. Более трех четвертей дополнительной экономии за счет интеллектуального освещения приходится на коммерческие здания.

Применение цифровых технологий в отдельных отраслях может привести к экономии энергии за их пределами [25]. Например, возможность работать удаленно может повлиять на мобильность населения и снизить спрос на услуги транспорта и его энергопотребление, но в то же время может увеличить потребление энергии в зданиях. Электронная коммерция оказывает влияние на расширение грузоперевозок, изменение структуры и площади торговых и складских помещений и может увеличить потребление энергии на транспорте и уменьшить в зданиях. Преимущества аддитивного производства позволяют располагать его практически в любом месте, что может снизить спрос на доставку товаров на большие расстояния и уменьшить энергопотребление на транспорте. Возможности 3D-печати по производству продукции с новыми свойствами или новой формы, качественно меняют характеристики конечных продуктов. Например, некоторые производители самолетов уже применяют его для производства легких авиационных компонентов для снижения расхода топлива. Оценка производства легких металлических добавок в авиационном парке США при различных сценариях до 2050 года показала, что в ближайшем будущем от 9% до 17% от общей типовой массы воздушного судна могут быть заменены более легкими компонентами с 3D-печатью. В сценарии быстрого внедрения выбранных компонентов 3D-печати экономия топлива к 2050 году будет эквивалентна 75% потребления топлива внутренней авиацией США в 2015 году.

Появление и распространение информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) породило новый вид деятельности - промышленный майнинг криптовалют. Сегодня одно «рабочее место» для промышленного майнинга криптовалют при производительности от 0,5 до 5 триллионов хэш-операций в секунду потребляет от 12 до 40 кВт.ч в сутки. Самая крупная из известных в России майнинговых ферм потребляет около 40 миллионов кВт.ч в год. Согласно статистике информационно-аналитического центра Digiconomist, на конец 2017 г. энергопотребление сети биткойн достигло 35,77 ТВт.ч. Это больше, чем годовое энергопотребление таких стран, как Дания, Беларусь или Венгрия [7]. На одну транзакцию платежная система Биткойна тратит значительно больше электроэнергии, чем системы электронных карт. Например, в системе Viza на один платеж тратится 10 Вт.ч, в то время как перевод биткойнов требует 150-200 кВт.ч. [8, 11].

**Потребление энергии ИКТ.** Обратной стороной процесса широкого распространения цифровых технологий и связанным с их применением снижением энергопотребления в отраслях экономики, является рост собственного потребления энергии устройствами ИКТ. Уже сегодня информационные и коммуникационные технологии, включающие центры обработки данных, сети передачи данных и подключенные устройства - стали важным потребителем энергии. За 2007-2012 гг. среднегодовые темпы прироста потребления электроэнергии ИКТ в мире составили примерно 7%, в то время как общего всего 3% [19]. По оценкам, представленным в [17], в настоящее время на долю ИКТ в мире приходится 5-9% общего электропотребления, а к 2030 г. оно может возрасти до 20%, правда без учета потенциальных возможностей в повышении эффективности.

**Центры обработки данных (ЦОД)** используют энергию для питания как оборудования информационных технологий (серверов, накопителей, сетевых устройств), так и вспомогательной инфраструктуры (например, охлаждающее оборудование). Энергопотребление ЦОД в мире удваивается каждые 5 лет и уже сейчас составляет по разным оценкам 3-5% от общего потребления электроэнергии в мире (рис. 1). В настоящее время вопрос энергоэффективности и возможностей энергосбережения в ЦОД стоит очень остро. Разрабатываются модели (см., например, [16, 20, 27], которые описывают процессы энергопотребления в облачных центрах обработки данных, рассматривая статические и динамические части компонентов облака и показывают, как можно сэкономить до 20% энергопотребления, применяя соответствующие направления оптимизации.



Источник: [13]

**Рис. 1.** Динамика годового потребления электроэнергии дата-центрами в мире, ТВт·ч

**Сети передачи данных** передают информацию через стационарные и мобильные сети между двумя или более подключенными устройствами. В 2015 г., по некоторым оценкам, они потребляли 185 ТВт·ч (1% от общего спроса) электроэнергии. Существует большая неопределенность в энергопотреблении сетей передачи данных. По оценкам специалистов, к 2021 году потребление электроэнергии сетей передачи данных может возрасти на 70% или сократиться на 15% в зависимости от будущих тенденций в политике повышения эффективности [19].

**Интеллектуальные элементы управления и подключенные устройства**, включая простые датчики занятости и фотодатчики, потребляют энергию для поддержания связи даже в режиме ожидания. Например, для интеллектуального освещения оно варьируется от 0,15 Вт до 2,71 Вт на один осветительный прибор. Следовательно, некоторые подключенные лампы могут потреблять больше энергии в год в режиме ожидания, чем при фактическом использовании, что снижает их чистую энергоэффективность более чем наполовину. Устройства активного контроля в мире в 2010 г. в среднем потребляли около 2 кВтч/кв.м. Ожидается, что постоянное их совершенствование и увеличение масштабов применения сократят энергоемкость устройств активного контроля в течение следующих 25 лет вдвое до 1 кВтч/кв.м в год к 2040 г. Прогнозируется, что количество подключенных устройств IoT вырастет с 8,4 млрд в 2017 г. до более 20 млрд уже к 2020 г. [19].

Использование цифровых технологий стирает грань между традиционными поставщиками и потребителями энергоресурсов и создает возможности для потребителей из

всех секторов спроса напрямую участвовать в работе энергосистемы, балансируя спрос и предложение в режиме реального времени [14]. Это обеспечивается, в первую очередь, появлением способности изменять свое энергопотребление в зависимости от ситуации в энергосистеме (demand responds), увеличением доли потребителей-«просьюмеров<sup>3</sup>», имеющих собственные источники производства или источники для хранения энергии (distributed energy resource), внедрением «умной зарядки» электромобилей, которая переключает спрос в непииковые периоды (экономия инвестиции в новую электроэнергетическую инфраструктуру), применением новых инструментов (blockchain) для облегчения локальной системы торговли энергией [28].

Применение цифровых технологий в электроэнергетике ведет к смене всей бизнес-модели отрасли – уже появился термин Интернет энергии (Internet of Energy, IoE). Его характерными чертами являются:

- производство электроэнергии становится распределенным,
- потоки электроэнергии становятся двунаправленными,
- участниками нового рынка электроэнергии становятся «вещи»,
- энергия мобильна и доступна в любой точке, как мобильный Интернет.

**Выводы.** Цифровые технологии уже сегодня используются во всех сферах экономики и повседневной жизни людей. Расширение их использования в перспективе меняет организационно-экономическую бизнес-модель производства и предоставления услуг, способствуя снижению всех видов затрат. В будущем сами продукты производства превратятся в математические модели, которые могут быть воспроизведены в любой точке мира на 3D принтере. Однако, при этом возникает резкий рост потребности в вычислительных мощностях, поскольку любое производство будет в первую очередь зависеть от производительности обработки информации. Это означает, что практически любое производство становится энергоемким, так как вычислительные мощности требуют энергии. ИКТ становятся важным потребителем энергии. Создание крупных центров обработки данных и увеличение пропускной способности телекоммуникаций потребуют роста энерговооруженности и строительства новых энергоблоков. Перспективные объемы энергопотребления будут определяться ростом спроса на данные и повышением эффективности нового оборудования. Насколько значительно они повлияют на перспективный спрос на энергию, будет зависеть от политики государства, стиля жизни населения, технологического прогресса.

**Благодарности.** Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания III.17.5.2, рег. № АААА-А17-117030310452-7 СО РАН и при частичной финансовой поддержке РФФИ (проектов №17-06-00102 и № 18-010-00176)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вся статистика интернета на 2019 год – в мире и в России. Режим доступа: <https://www.web-canape.ru/business/vsya-statistika-interneta-na-2019-god-v-mire-i-v-rossii/> (дата обращения 18.11.2019).

<sup>3</sup> Просьюмер (от англ. producer + consumer)

2. Гальперова Е.В. Методический подход к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на топливо и энергию с учетом региональных особенностей и роста неопределенности // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 33–44.
3. Гальперова Е.В. Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 4-2. С. 17–27.
4. Гальперова Е.В. Методический инструментарий для долгосрочного прогнозирования спроса на энергоносители для разных временных стадий исследований // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. №3(7). С. 22–34.
5. Гальперова Е.В., Гальперов В.И., Локтионов В.И., Макагонова Н.Н. Применение интеллектуальных методов для моделирования влияния новых факторов в развитии энергетики на спрос на электроэнергию // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 1 (13). С. 16–29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02.
6. Использование информационно-коммуникационных технологий в области энергопотребления. Режим доступа: <http://www.pomoshelektrikam.ru/ppppppppppppp/2019-01-01/ispolzovanie-informatcionno-kommunikatcionnykh-tekhnologiy-v-obl> (дата обращения: 2.12.2019).
7. Катасонов В. Паразиты и проходимцы цифрового мира. Режим доступа: <https://svpressa.ru/economy/article/215645/> (дата обращения: 18.11.2019).
8. На майнинг одного биткойна уходит энергии, как на целый дом за месяц. Режим доступа: <https://hightech.fm/2017/10/17/bitcoin-trade-electricity> (дата обращения: 18.11.2019).
9. Немного об энергетических технологиях и ИТ. Режим доступа: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/310626> (дата обращения: 2.12.2019).
10. Орлов С. Энергосберегающие технологии в ИТ-инфраструктуре предприятий. Режим доступа: <https://www.osp.ru/lan/2015/04/13045690> (дата обращения: 2.12.2019).
11. Сколько электроэнергии требуется на одну транзакцию биткойна? Режим доступа: <https://bits.media/skolko-elektroenergii-trebuetsya-na-odnu-tranzaktsiyu-bitkoina/> (дата обращения: 18.11.2019).
12. Филиппов С.П. Новая технологическая революция и требования к энергетике. Форсайт. - Т. 12. - № 4. - 2018. - с. 20–33
13. Царев И. PUE как критерий качества и энергоэффективности ЦОД. Режим доступа: [http://dcforum.ru/sites/default/files/12.10--12.30\\_pue\\_kak\\_kriteriy\\_kachestva.pdf](http://dcforum.ru/sites/default/files/12.10--12.30_pue_kak_kriteriy_kachestva.pdf) (дата обращения: 19.11.2019).
14. Цифровизация энергетики. Минэнерго РФ. 2019. Режим доступа: [https://minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая\\_энергетика.pdf](https://minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая_энергетика.pdf) (дата обращения: 18.11.2019).
15. Энергосбережение в компьютерном мире. Режим доступа: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/890> (дата обращения: 3.12.2019).

16. Awada Uchechukwu, Keqiu Li, Yanming Shen. Energy Consumption in Cloud Computing Data Centers // International Journal of Cloud Computing and Services Science (IJ-CLOSER). Vol.3. No.3. June 2014.
17. Between 10 and 20% of electricity consumption from the ICT\* sector in 2030? Режим доступа: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/expected-world-energy-consumption-increase-from-digitalization.html> (дата обращения: 21.11.2019).
18. Brahmanand Mohanty. (2001) Standby Power Losses in Household Electrical Appliances and Office Equipment. Режим доступа: <https://www.researchgate.net/publication/242124523> (дата обращения: 2.12.2019).
19. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA. 2017. 188 p.
20. Dzmitry Kliazovich, Pascal Bouvry, Fabrizio Granelli, Nelson L.S. da Fonseca. Energy Consumption Optimization in Cloud Data Centers. Режим доступа: <https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/18275/1/energy-management.pdf> (дата обращения: 20.11. 2019).
21. International Energy Agency (2017a). The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment. OECD/IEA. Paris.
22. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I. Modeling the Active Consumer Behavior Based on the Agent Approach // 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) DOI: 10.1109/RPC.2018.8482157.
23. Kofod, C. (2016). Smart Lighting – New Features Impacting Energy Consumption. First Status Report. IEA 4E Solid State Lighting Annex Task 7. Режим доступа: [http://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0085/SSL\\_Annex\\_Task\\_7\\_-\\_First\\_Report\\_-\\_6\\_Sept\\_2016.pdf](http://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0085/SSL_Annex_Task_7_-_First_Report_-_6_Sept_2016.pdf). (дата обращения: 2.12.2019).
24. Lance Bishop. 4 Ways to Reduce Energy Consumption in Any Data Center. Режим доступа: <https://blog.se.com/datacenter/2013/02/01/4-ways-to-reduce-energy-consumption-in-any-data-center/> (дата обращения: 19.11.2019).
25. Nathaniel C Horner, Arman Shehabi and Inês L Azevedo. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology // Environ. Res. Lett. 11 (2016) 103001
26. Nest (2015). “Energy Savings from the Next Learning Thermostat: Energy Bill Analysis Results”. Nest Labs, February 2015. Режим доступа: <http://downloads.nest.com/press/documents/energy-savings-whitepaper.pdf>. (дата обращения: 2.12.2019).
27. Olusogo Popoola, Bernardi Pranggono. On energy consumption of switch-centric data center networks // The Journal of Supercomputing. January 2018. Volume 74. Issue 1. Pp. 334–369.
28. The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge. Режим доступа: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_Electricity\\_2017.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Electricity_2017.pdf) (дата обращения: 21.11.2019).

## ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR THE USE OF DIGITAL TECHNOLOGIES IN ECONOMIC SECTORS AND THE IMPACT ON ENERGY CONSUMPTION

Elena V. Galperova

PhD., Associate Professor, Senior Researcher. Department of energy security

e-mail: [galper@isem.irk.ru](mailto:galper@isem.irk.ru)

Melentiev Energy Systems Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
130, Lermontov Str., 664033, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Long-term forecasting of energy demand is an important fundamental part of research in the development and adoption of strategic decisions in the field of energy and economic security. An integral part of the methodology for long-term forecasting of energy consumption is the identification, analysis and study of the influence on the volume and structure of energy demand a factors and relationships in the energy sector and the economy. The use of digital technologies related to monitoring, obtaining, processing large amounts of data in all areas of the economy and people's lives today already consumes more than 5% of the world's electricity and its further growth is expected. The article analyzes use perspective the main digital technologies in different sectors of the economy. We present estimates of their influence on the different energy demand carriers. There is great uncertainty in estimates of prospective energy consumption, depending on possible government policies, changes in the lifestyle, the speed of development and implementation of technical innovations.

**Key words:** energy consumption, energy efficiency, energy saving, digital technologies, data center, connected devices.

**Acknowledgments.** The article is supported by state task III.17.5.2, № AAAA-A17-117030310452-7 SB RAS and the Russian Foundation for Basic Research (project №17-06-00102 and № 18-010-00176)

### References

1. Vsyā statistika interneta na 2019 god – v mire i v Rossii [All Internet statistics for 2019 are in the world and in Russia]. Available at: <https://www.web-canape.ru/business/vsya-statistika-interneta-na-2019-god-v-mire-i-v-rossii/> (accessed 18.11.2019). (in Russian)
2. Galperova E.V. Metodicheskij podhod k dolgosrochnomu prognozirovaniyu rynochnogo sprosa na toplivo i energiyu s uchetom regional'nyh osobennostej i rosta neopredelennosti [Methodological approach for long-term forecasting of market fuel and energy demand, taking into account regional characteristics and growing uncertainty] // Izvestiya RAN, Energetika = Bulletin of RAS. Energy Series. 2016. No 5. Pp. 33–44. (in Russian)
3. Gal'perova Elena V. Ispol'zovanie stenda modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya rynochnogo sprosa na energonositeli [Set of models for long-term forecasting of market energy demand] // Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Informational and mathematical technologies in science and management. 2016. No 4-2. Pp. 17–27. (in Russian).

4. Gal'perova Elena V. Metodicheskij instrumentarij dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya sprosa na energonositeli dlya raznyh vremennyh stadij issledovanij [Methodical tool for different time stages for long-term forecasting of energy demand] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* = Informational and mathematical technologies in science and management. 2017. No 3 (7). Pp. 22–34. (in Russian)
5. Galperova Elena V., Galperov Vasilij I., Loktionov Vadim I., Makagonova Nadezhda N. Primenenie intellektual'nyh metodov dlya modelirovaniya vliyaniya novyh faktorov v razvitii energetiki na spros na elektroenergiyu [Application of intellectual methods for modeling of the influence of new factors of energy sector development on electricity demand] // *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* = Informational and mathematical technologies in science and management. 2019. No 1 (13). Pp. 16–29. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-1-02. (in Russian)
6. Ispol'zovanie informacionno-kommunikacionnyh tekhnologij v oblasti energopotrebleniya [The use of information and communication technologies in the field of energy consumption]. Available at: <http://www.pomoshelektrikam.ru/ppppppppppppp/2019-01-01/ispolzovanie-informatcionno-kommunikacionnykh-tekhnologiy-v-obl> (accessed 2.12.2019). (in Russian)
7. Katasonov V. Parazity i prohodimcy cifrovogo mira [Parasites and rogues of the digital world]. Available at: <https://svpressa.ru/economy/article/215645/> (accessed 18.11.2019). (in Russian)
8. Na majning odnogo bitkojna uhodit energii, kak na celyj dom za mesyac [It takes energy to mine one bitcoin, like a whole house in a month]. Available at: <https://hightech.fm/2017/10/17/bitcoin-trade-electricity> (accessed 18.11.2019) (in Russian)
9. Nemnogo ob energeticheskikh tekhnologiyah i IT [A bit about energy technology and IT]. Available at: <https://habr.com/ru/company/it-grad/blog/310626> (accessed 2.12.2019). (in Russian)
10. Orlov S. Energoberegayushchie tekhnologii v IT-infrastrukture predpriyatij [Energy-saving technologies in enterprise IT infrastructure]. Available at: <https://www.osp.ru/lan/2015/04/13045690> (accessed: 2.12.2019) (in Russian)
11. Skolko elektroenergii trebuetsya na odnu tranzaktsiyu bitkoina? [How much electricity is required per bitcoin transaction?]. Available at: <https://bits.media/skolko-elektroenergii-trebuetsya-na-odnu-tranzaktsiyu-bitkoina/> (accessed 18.11.2019) (in Russian)
12. Filippov S.P. Novaya tekhnologicheskaya revolyuciya i trebovaniya k energetike [New technological revolution and energy requirements] // *Forsajt* = Foresight. 2018. V. 12. No 4. Pp. 20–33. (in Russian)
13. Carev I. PUE kak kriterij kachestva i energoeffektivnosti COD [PUE as a criterion for data center quality and energy efficiency]. Available at: [http://dcforum.ru/sites/default/files/12.10--12.30\\_pue\\_kak\\_kriteriy\\_kachestva.pdf](http://dcforum.ru/sites/default/files/12.10--12.30_pue_kak_kriteriy_kachestva.pdf) (accessed 19.11.2019). (in Russian)
14. Cifrovizaciya energetiki. Minenergo RF [Digitalization of energy. Ministry of Energy of the Russian Federation]. Available at: [https://minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая\\_энергетика.pdf](https://minenergo.gov.ru/energynet/docs/Цифровая_энергетика.pdf) (accessed: 18.11.2019). (in Russian)
15. Energoberezhenie v komp'yuternom mire [Energy Saving in the Computer World]. Available at: <http://portal-energo.ru/articles/details/id/890> (accessed 3.12.2019). (in Russian)

16. Awada Uchechukwu, Keqiu Li, Yanming Shen. Energy Consumption in Cloud Computing Data Centers // International Journal of Cloud Computing and Services Science (IJ-CLOSER). Vol.3. No.3. June 2014.
17. Between 10 and 20% of electricity consumption from the ICT\* sector in 2030? Available at: <https://www.enerdata.net/publications/executive-briefing/expected-world-energy-consumption-increase-from-digitalization.html> (accessed 21.11.2019).
18. Brahmanand Mohanty. (2001) Standby Power Losses in Household Electrical Appliances and Office Equipment. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/242124523> (accessed 2.12.2019).
19. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA. 2017. 188 p.
20. Dzmitry Kliazovich, Pascal Bouvry, Fabrizio Granelli, Nelson L.S. da Fonseca. Energy Consumption Optimization in Cloud Data Centers. Available at: <https://orbilu.uni.lu/bitstream/10993/18275/1/energy-management.pdf> (accessed 20.11. 2019).
21. International Energy Agency (2017a). The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment. OECD/IEA. Paris.
22. Gal'perova E.V., Gal'perov V.I. Modeling the Active Consumer Behavior Based on the Agent Approach // 2018 3rd Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC) DOI: 10.1109/RPC.2018.8482157.
23. Kofod, C. (2016). Smart Lighting – New Features Impacting Energy Consumption. First Status Report. IEA 4E Solid State Lighting Annex Task 7. Available at: [http://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0085/SSL\\_Annex\\_Task\\_7\\_-\\_First\\_Report\\_-\\_6\\_Sept\\_2016.pdf](http://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0085/SSL_Annex_Task_7_-_First_Report_-_6_Sept_2016.pdf). (accessed 2.12.2019).
24. Lance Bishop. 4 Ways to Reduce Energy Consumption in Any Data Center. Режим доступа: <https://blog.se.com/datacenter/2013/02/01/4-ways-to-reduce-energy-consumption-in-any-data-center/> (accessed 19.11.2019).
25. Nathaniel C Horner, Arman Shehabi and Inês L Azevedo. Known unknowns: indirect energy effects of information and communication technology // Environ. Res. Lett. 11 (2016) 103001
26. Nest (2015). “Energy Savings from the Next Learning Thermostat: Energy Bill Analysis Results”. Nest Labs, February 2015. Available at: <http://downloads.nest.com/press/documents/energy-savings-whitepaper.pdf>. (accessed 2.12.2019).
27. Olusogo Popoola, Bernardi Pranggono. On energy consumption of switch-centric data center networks // The Journal of Supercomputing. January 2018. Volume 74. Issue 1. Pp. 334–369.
28. The Future of Electricity New Technologies Transforming the Grid Edge. Available at: [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_Electricity\\_2017.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Electricity_2017.pdf) (accessed 21.11.2019).

## ОЦЕНКА РИСКОВ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ УГРОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Массель Людмила Васильевна**

Д.т.н., профессор, главный научный сотрудник,  
зав. лабораторией «Информационные технологии в энергетике»,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664130 г. Иркутск, ул. Лермонтова 130, e-mail: [massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

**Комендантова Надежда Павловна**

К.э.н., старший научный сотрудник  
Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА),  
Лаксенбург, Австрия  
Шлоссплатц 1, 2361 Лаксенбург, e-mail: [komendan@iiasa.ac.at](mailto:komendan@iiasa.ac.at)

**Аннотация.** В статье рассматриваются предпосылки выполнения совместного проекта, планируемого коллективами Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Россия, Иркутск) и Международного института прикладного системного анализа (МИПСА) (Лаксенбург, Австрия). Представляет интерес сравнение подходов к исследованию устойчивости, развиваемых в ИСЭМ СО РАН и МИПСА. Приводятся определение разных видов устойчивости, рассматриваемые в международной практике, анализируются исследования области энергетической и экологической безопасности и качества жизни (РФ). С Российской стороны предполагается выполнение проекта для Байкальской природной территории, частично включающей территории Иркутской области, республики Бурятия и Забайкальского края. Будут применены разрабатываемые в коллективе научных сотрудников ИСЭМ СО РАН интеллектуальные информационные технологии, основанные, в первую очередь на методах когнитивного и вероятностного (на основе Байесовских сетей доверия) моделирования.

**Ключевые слова.** Устойчивость энергетических и социальных систем, природные и техногенные угрозы, оценка рисков, интеллектуальные информационные технологии, когнитивное и вероятностное моделирование

**Цитирование:** Массель Л.В., Комендантова Н.П. Оценка рисков природных и техногенных угроз устойчивости энергетических, экологических и социальных систем на основе интеллектуальных информационных технологий // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 31–45. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-03

**Введение.** В последнее время за рубежом вызывает большой интерес направление, определяемое термином “Resilience”, который переводится на русский язык как “устойчивость” или “упругость”. В России исследования в этой области ведутся в основном в области технической устойчивости, в то время как в Западной Европе рассматривают это направление шире и включают в рассмотрение также экологическую, психологическую,

социальную и экономическую устойчивость. С другой стороны, факторы, определяющие социальную устойчивость в зарубежных работах, перекликаются с факторами, используемыми при оценке качества жизни в российских исследованиях.

При рассмотрении устойчивости технических систем необходимо оценивать риски как природных, так и техногенных угроз. В работах Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН эти угрозы до последнего времени рассматривались, как угрозы энергетической безопасности, что будет показано далее.

Участившиеся природные катаклизмы требуют повышенного внимания к оценке рисков их возникновения и выработке мер по снижению их последствий. Особое значение имеет то, что они могут стать причиной чрезвычайных ситуаций, усугубляющихся вероятностью возникновения множественных аварий, в том числе каскадного характера, в энергетике, которая, в свою очередь, является одной из критических инфраструктур, напрямую влияющих на качество жизни населения.

Необходимо учитывать цели энергетического перехода, которые предусматривают широкомасштабное внедрение возобновляемых источников энергии, а также процесс децентрализации энергосистемы, когда потребители энергии становятся также производителями, и на основании этих процессов изменяются требования к системе электропередач, когда электричество не только подается от производителя к потребителю, но также и от потребителя обратно в электросеть, при этом возникают дополнительные задачи по обеспечению надежности. Кроме того, весьма актуальны недостаточно изученные вопросы использования возобновляемых энергетических ресурсов на охраняемых природных территориях, одной из которых в России является центральная экологическая зона Байкальской природной территории, и исследование устойчивости этой территории с экологической точки зрения. Совместное исследование этих вопросов приводит к необходимости привлечения такого показателя, как качество жизни населения.

Таким образом, актуальность совместного проекта определяется необходимостью выполнения междисциплинарного исследования, базирующегося на системном анализе факторов как природного, так и техногенного характера, влияющих на устойчивость как энергетических, так и социальных систем, и их способность для адаптации к существующим и возникающим угрозам.

Для выполнения системного анализа требуются разработка и интеграция соответствующих методов и применение современных информационных технологий, которыми могут быть, например, интеллектуальные информационные технологии (в частности, когнитивное моделирование и вероятностное моделирование на основе Байесовских сетей доверия), разрабатываемые и используемые в коллективе научных сотрудников ИСЭМ СО РАН, возглавляемом Л.В. Массель.

## **1. Анализ современного состояния исследований в данной области**

**1.1. Подходы к определению устойчивости (МИПСА).** Рассмотрим определения устойчивости, приведенные в докладе МИПСА, подготовленном для Центра виртуальных компетенций и тренинга по защите критических энергетических сетей от природных и техногенных катастроф (Virtual Competency and Training Center on the Protection of Critical Energy Networks from Natural and Man-Made Disasters), созданного на базе Организации по Безопасности и Сотрудничеству в Европе (ОБСЕ)

Концепция устойчивости не имеет уникального определения, из-за ее широкого использования в разных областях с различными значениями и последствиями. Приведем некоторые из них.

Устойчивость часто определяется как способность системы возвращаться к равновесию, или, скорее, способность вернуться к равновесию и развиваться, несмотря на дальнейшие толчки и нарушения.

Устойчивость может быть связана со способностью выдерживать стресс и «приходить в норму»

Устойчивость может быть способностью достижения некоторых новых стадий динамического равновесия после шока, готовности к динамическим, межмасштабным взаимодействиям парной системы: человек-окружающая среда

Устойчивость может быть способностью человека успешно справиться с травматическим опытом и избежать отрицательных траекторий

Одно из самых популярных определений было предложено [25]:

«Устойчивость - это способность системы возвращаться к равновесию или устойчивому состоянию после возмущения, такого, как наводнения, землетрясения или другие стихийные бедствия, а также техногенные катастрофы, такие как банковские кризисы, войны или революции».

Устойчивость представляет собой способность системы возвращаться к равновесному состоянию после временного нарушения; чем быстрее она возвращается к равновесию и чем меньше теряет, тем более устойчивой она является. Возможно, именно поэтому корень термина «устойчивость» или «упругость» в латинском слове «Resilio», что означает «отскочить назад».

Уровень устойчивости пропорционален скорости возвращения назад (восстановления).

Согласно экологическому подходу, устойчивость – мера постоянства экосистем и их способности адаптироваться к изменениям и нарушениям и по-прежнему поддерживать одни и те же отношения между населением или государством [26, 27]. Понятия постоянства, изменения и непредсказуемости в этом определении отличаются от эффективности, постоянства и предсказуемости в технической устойчивости. Под устойчивостью экосистемы понимается способность поглощать возмущающие факторы и реорганизовываться, пока система претерпевает изменения.

При рассмотрении социальной устойчивости выделяют следующие факторы: моральные ценности, реалистический оптимизм, устойчивая ролевая модель, получение социальной поддержки, ментальная и эмоциональная гибкость, смысл жизни и цели, духовные практики, физическая активность, способность противостоять страхам. Уделяется большое внимание связи между снижением риска бедствий и устойчивостью.

Рассматривают так называемые 4 Rs устойчивости [24]:

- Robustness (надежность): сила или способность элементов, системы и др. мер анализа для определения возможности выдерживать данный уровень стресса или нужды, без страдания от деградации или потери функции.
- Redundancy (резервирование): возможность удовлетворения функциональных требований в случае разрушения, деградации или потери функциональности.

- **Rapidity** (быстрота): способность своевременно выполнять (удовлетворять) приоритеты и достигать цели, чтобы сдерживать потери, восстановить функциональность и избежать сбоев в будущем.
- **Resourcefulness** (изобретательность): способность идентифицировать проблемы, установить приоритеты и мобилизовать альтернативы внешних ресурсов, когда существуют условия, которые угрожают нарушить какой-то элемент или систему.

**1.2. Энергетическая и экологическая безопасность, качество жизни.** Вопросы природных чрезвычайных ситуаций рассматриваются во многих источниках, в частности, на сайте Министерства чрезвычайных ситуаций [28], в Национальном атласе России, т. 2 [31] и др. На сайте [30] приводится анализ статистики природных катаклизмов, начиная с 1900, и иллюстрируется тенденция их возрастания, которая, как считают авторы, будет развиваться в будущем. В этих условиях особое внимание привлекают жизненно важные для человечества природные объекты, например, такие, как самый большой в мире резервуар питьевой воды - оз. Байкал, что требует постоянного анализа (мониторинга) антропогенного влияния на этот регион и выработки необходимых природоохранных мер [16]. Важными являются также вопросы возобновляемой энергетики в этом регионе [17].

Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации (утверждена Указом Президента РФ №216 от 13.05.2019) определяет следующие угрозы энергетической безопасности, важные для данного проекта [29]:

- высокий уровень износа основных производственных фондов организаций топливно-энергетического комплекса, низкая эффективность использования и недостаточные темпы обновления этих фондов;
- противоправное использование информационно-телекоммуникационных технологий, в том числе осуществление компьютерных атак на объекты информационной инфраструктуры и сети связи, используемые для организации их взаимодействия, способное привести к нарушениям функционирования инфраструктуры и объектов топливно-энергетического комплекса;
- неблагоприятные и опасные природные явления, изменения окружающей среды, приводящие к нарушению нормального функционирования и разрушению инфраструктуры и объектов топливно-энергетического комплекса.

В Доктрине определены риски в области энергетической безопасности, в том числе:

- недостаточный уровень защищенности инфраструктуры и объектов топливно-энергетического комплекса от актов незаконного вмешательства и опасных природных явлений.

Также в доктрине констатировано, что последствиями реализации угроз энергетической безопасности являются, в том числе:

- причинение вреда жизни и здоровью граждан;
- нарушение нормального функционирования организаций, в том числе организаций топливно-энергетического комплекса, и отраслей экономики Российской Федерации;
- необходимость выделения дополнительных бюджетных ассигнований на ликвидацию последствий реализации угроз энергетической безопасности.

Рассмотренные угрозы, риски их возникновения и их последствия необходимо учитывать при исследованиях устойчивости технических, экологических и социальных систем.

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН является одним из признанных лидеров в области исследований проблем энергетической безопасности [22, 13]. Под энергетической безопасностью (ЭБ) понимается состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от обусловленных внутренними и внешними факторами угроз дефицита в обеспечении их обоснованных потребностей в энергии экономически доступными топливно-энергетическими ресурсами приемлемого качества в нормальных условиях и при чрезвычайных обстоятельствах, а также от нарушений стабильности, бесперебойности топливо- и энергоснабжения. В этих исследованиях определены стратегические угрозы ЭБ, одной из которых являются природные угрозы. До настоящего времени большее внимание уделялось внешнеполитическим, экономическим и управленческим угрозам.

Важным аспектом обеспечения энергетической безопасности страны является исследование негативного воздействия природных катаклизмов на электроэнергетическую систему (ЭЭС) с целью снижения рисков крупных системных аварий, оказывающих существенное влияние на качество жизни населения. Природные риски, такие как землетрясения, штормы, наводнения, периоды экстремальной жары названы в [6] в числе главных причин возникновения каскадных аварий в энергосистемах. Последние данные свидетельствуют о том, что изменение климата ведёт к росту числа экстремальных природных катаклизмов, которые могут привести к системным авариям. По данным ОБСЕ в последнее десятилетие неуклонно растет количество системных аварий, последствия которых затрагивают все большее число людей в разных странах. Так, пять больших погашений произошли в течение последних шести лет: в 2009 году в Бразилии и Парагвае, затронув 87 млн. человек; в 2012 году в Индии, затронув 620 млн. человек; в 2014 году в Бангладеш, затронув 150 миллионов; в 2015 году в Пакистане, затронув 140 миллионов, и в 2016 году в Шри Ланка, затронув 21 млн. человек.

Актуальность этой проблемы возрастает в связи с развитием концепции интеллектуальных энергетических систем (ИЭС) или Smart Grid, создание которых предусматривает внедрение современных средств производства, передачи, распределения, накопления и потребления электроэнергии и приводит к заметному усложнению технологической подсистемы ЭЭС. Современные ЭЭС представляют собой сложные, многосвязные, пространственно-распределенные иерархические объекты, функционирующие в условиях многочисленных внешних и внутренних возмущениях как систематического, так и случайного характера [31].

Поэтому в ИЭС наряду с традиционными проблемами повышения эффективности производства, преобразования, передачи и распределения электроэнергии, их надёжности, безопасности и живучести возникают задачи обеспечения их *устойчивости (Resilience)* к внешним возмущениям, в том числе и природного характера. Решение задач обеспечения устойчивости к внешним возмущениям ИЭС требует оценки влияния негативных природных факторов, не учет которых приведет к недопустимому снижению устойчивости этих систем, увеличению их аварийности и снижению надежности электроснабжения потребителей и качества электроэнергии. Для снижения влияния негативных факторов необходимы глубокие

комплексные исследования. Конкретная задача в рамках этой проблемы состоит в разработке моделей и методов количественной оценки устойчивости ИЭС к внешним природным возмущениям и обоснования направлений и средств повышения их устойчивости на базе интеллектуальных информационных технологий.

Качество жизни мировое научное сообщество понимает как совокупность объективных и субъективных параметров, характеризующих максимальное количество сторон жизни человека, его положение в обществе и удовлетворенность им. Качество жизни определяется не только финансовым благополучием, но еще учитывает состояние защищенности, здоровье, положение человека в обществе и, главное, его собственную оценку всех этих факторов. Интегральный показатель качества жизни обобщает показатели здоровья, социального самочувствия, субъективного социального благополучия и благосостояния. До последнего времени качество жизни в исследованиях энергетики не учитывалось [21].

Под защищенностью населения понимается как защищенность граждан от природных угроз ЭБ, так и влияние экологических аспектов и аспектов обеспеченности энергетическими ресурсами на качество жизни населения.

Работы по оценке рисков в энергетике в России были связаны преимущественно с инвестиционными и экономическими рисками или рисками, связанными с надежностью энергоснабжения [2, 7, 11-12, 14-15, 19, 33], постановки задач, связанных с оценкой рисков природных ситуаций, в исследованиях ЭБ России отсутствуют.

Кроме того, население традиционно относилось к категории бытовых потребителей, нужды которых учитывались в последнюю очередь. Развитие такого научного направления, как исследования качества жизни, требует пересмотреть сложившуюся ситуацию и рассматривать качество жизни как категорию, связанную не только со здоровьем, но и с влиянием внешних факторов, например, таких, как обеспеченность населения энергоресурсами, что напрямую связано с проблемой энергетической безопасности. Авторами отмечалась необходимость интеграции этих исследований, и сделаны определенные шаги в этом направлении [8].

Поскольку для оценки качества жизни используются объективно-субъективные показатели [21], для комплексного решения проблемы необходимо привлечение качественных методов системного анализа, в частности, семантического моделирования, которое можно рассматривать совместно с математическим моделированием при наличии количественной информации, необходимой для математических моделей. Попытка использования нечетких вычислений сделана, например, в [18]. Авторы развивали идею использования для этого когнитивного и математического моделирования в работах [9, 10].

Под когнитивным моделированием понимается построение когнитивных моделей, или, иначе, когнитивных карт (ориентированных графов), в которых вершины соответствуют факторам (концептам), а дуги – связям между факторами (положительным или отрицательным), в зависимости от характера причинно-следственного отношения. Математическим аппаратом для построения когнитивных моделей является теория графов. Основы когнитивного моделирования были разработаны в свое время Ван Хао (1956 г.), Р. Аксельродом (1976 г.), Д.А. Поспеловым (1981 г.). Это направление получило свое развитие в работах Э.А. Трахтенгерца [20], в настоящее время активно развивается в Институте проблем управления РАН (Абрамова Н.А., Кульба В.В., Кулинич А.А., Максимов В.И. и др.) для анализа влияний при управлении слабоструктурированными ситуациями.

Вероятностное моделирование основано на применении Байесовских сетей доверия, в коллективе, возглавляемом Л.В. Массель, применялось для оценки рисков возникновения чрезвычайных ситуаций в энергетике, в настоящее время используется для оценки рисков киберугроз, планируется его применение в предлагаемом проекте.

**2. Предлагаемые подходы и методы для реализации цели и задач исследований.** Предлагаемый проект основывается на применении методов системного анализа, математического моделирования и методов интеллектуальной поддержки принятия решений, методов инженерии знаний, а также авторских методов семантического моделирования и концепции ситуационного управления, основными методами которого являются ситуационный анализ, ситуационное моделирование и визуальная аналитика. Предполагаются развитие и адаптация к теме проекта авторских методов построения семантических (онтологических, когнитивных, событийных и вероятностных (на основе Байесовских сетей доверия)) моделей знаний. При реализации инструментальных средств интеллектуальной поддержки принятия решений будут применены методы объектного подхода (анализ, проектирование, программирование), методы системного и прикладного программирования, методы проектирования баз данных, информационных систем и экспертных систем, а также авторские методы построения многоагентных систем в энергетике.

В исследованиях Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН выявлены основные типы угроз ЭБ, одной из которых являются природные угрозы. Для Байкальского региона это землетрясения (до 2000 в год), пожары, маловодье или паводки, холодные зимы, сопровождающиеся снежными бурями, заносами, обледенением проводов, и др. Кроме того, природные угрозы (например, пожары) могут стать причиной экологических проблем.

Байкальский регион образуют территории Иркутской области, Республики Бурятия и Забайкальского края. В соответствии с Распоряжением Правительства РФ № 1641-р от 27.11.2006 г. «О границах Байкальской природной территории» на территории Байкальского региона определены три зоны, образующие Байкальскую природную территорию и включающие отдельные районы Республики Бурятия, Иркутской области и Забайкальского края, оказывающие преимущественное влияние на акваторию оз. Байкал: центральная экологическая зона, экологическая зона атмосферного влияния, буферная экологическая зона.

Особый интерес и важное значение представляет центральная экологическая зона, в которую входят особо охраняемые природные территории (заповедники, национальные парки, заказники и резерваты) общей площадью 25,6 тыс. км<sup>2</sup> или 1/3 от территории центральной экологической зоны.

Постановлением Правительства РФ №643 от 30 августа 2001 г. «Об утверждении перечня видов деятельности, запрещенных в центральной экологической зоне Байкальской природной территории» с изменениями, утвержденными постановлением Правительства РФ №186 от 2 марта 2015 г., установлен запрет на строительство в центральной экологической зоне Байкальской природной территории угольных котельных с одновременным определением возможности проведения реконструкции и технического перевооружения существующих угольных котельных, в том числе с установкой новых агрегатов в соответствии с требованиями технической и экологической безопасности.

Использование возобновляемых энергетических ресурсов снижает риски природных угроз. В то же время вопросы использования возобновляемых энергетических ресурсов в Байкальской природной территории, а особенно в центральной экологической зоне, недостаточно изучены. Кроме того, размещение, например, ветровых и солнечных установок может привести как к экологическим проблемам, так и социально-экономическим проблемам, связанным с отчуждением земель на особо охраняемых территориях и снижением количества рабочих мест для местного населения.

Оценка рисков природных угроз для этих территорий ранее не выполнялась. Предлагается адаптировать и использовать для этого риск-ориентированный подход, разрабатывавшийся ранее участниками проекта для оценки рисков кибербезопасности. Риск-ориентированный подход учитывает ущерб от повреждения или уничтожения объекта с использованием качественных (сложность восстановления, уничтожение уникальной природной среды, имидж и иное) и количественных (в денежном эквиваленте) параметров, а также вероятность повреждения или уничтожения объекта, с учетом возможности наступления каскадных аварий.

Риски описываются множеством  $R = \{T, V, D\}$ ,

где  $T$  – угрозы (в нашем случае природные),  $V$  – уязвимости (параметры, характеризующие возможность нанесения описываемой системе повреждений любой природы теми или иными внешними средствами или факторами),  $D$  – ущерб при реализации угрозы (интегральный показатель, включающий в т.ч. социальный ущерб от снижения качества жизни).

Угрозы определяются через вероятности наступления событий, приводящих к критическим ситуациям (например, условные вероятности, используемые в байесовских сетях). Количественный ущерб выражается в денежном эквиваленте с использованием экспертных оценок.

В рамках проекта предполагается разработка следующих оригинальных подходов и методов: 1) методы системного анализа поставленной проблемы, основанные на ситуационном и семантическом моделировании; 2) авторский риск-ориентированный подход для оценки рисков природных угроз ЭБ; 3) методы оценки ущербов (качественных и количественных) от чрезвычайных ситуаций; 4) методы когнитивного и вероятностного моделирования для решения поставленных задач; 5) методы визуальной аналитики для анализа проблемы и визуализации решаемых задач; 6) методы интегральной оценки качества жизни населения с учетом природных и техногенных угроз ЭБ; 7) методы построения многоагентной интеллектуальной среды поддержки принятия решений по сохранению устойчивости энергетической инфраструктуры региона, предотвращению чрезвычайных ситуаций и повышению качества жизни населения с учетом энергетических и экологических факторов.

**Заключение.** В статье рассмотрены предпосылки выполнения совместного Международного проекта под руководством Л.В. Массель (ИСЭМ СО РАН) и Н.П. Комендантовой (МИПСА). Следует отметить, что в исследованиях ученых-энергетиков ИСЭМ СО РАН, связанных с исследованиями устойчивости в условиях кибератак [4, 5], анализируются работы зарубежных ученых в области устойчивости энергетических систем [23, 32, 34-35] и проводятся параллели с исследованиями устойчивости систем энергетики,

выполняемых в ИСЭМ СО РАН в 90-х гг. прошлого века, когда термин «живучесть» использовался, как синоним современного термина «устойчивость» [1, 3].

В рамках проекта предполагается сравнение и развитие подходов к исследованию устойчивости энергетических и социальных систем, которые используются в МИПСА и в ИСЭМ СО РАН, учитывая достижения и опыт российских ученых в области исследований энергетической и экологической безопасности, качества жизни, интеллектуальной поддержки принятия решений. Предлагается интегрировать подходы, разрабатываемые в исследованиях энергетики, экологии и социологии и применить их для решения поставленной проблемы.

Актуальность темы объясняется необходимостью разработки и внедрения новых подходов к управлению рисками в условиях существующих природных рисков, а также возникающих рисков, вызванных изменениями климата. Также необходимо учитывать уязвимость энергосистемы в связи с внедрением новых источников энергии, а также меняющихся требований, связанных с децентрализацией и внедрением новых виртуальных или цифровых технологий. По управлению рисками авторы понимают процесс принятия и выполнения управленческих решений, направленных на снижение вероятности возникновения неблагоприятного результата и минимизацию возможных потерь, вызванных его реализацией. Цели устойчивости энергосистемы соответствуют целям управления рисками, как и создание устойчивой системы, способной противостоять последствиям угроз, переносить их, приспосабливаться к ним и восстанавливаться своевременно и эффективно, в том числе посредством сохранения и восстановления своих основополагающих структур и функций.

Предлагаемое исследование также отвечает целям предотвращения угроз, определенным в Доктрине энергетической безопасности Российской Федерации и соответствует задачам по совершенствованию государственного управления в области обеспечения энергетической безопасности, обеспечению ее взаимодействия с государственными информационными системами, системами мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на объектах топливно-энергетического комплекса, иными системами управления рисками, используемыми субъектами энергетической безопасности.

Новизна проекта определяется как новизной поставленных задач и его междисциплинарным характером, так и интеграцией новых методов и современных информационных технологий для решения поставленных задач: интеллектуальные технологии поддержки принятия решений; семантическое моделирование (онтологическое, когнитивное, событийное и вероятностное); визуальная аналитика и когнитивная графика; геоинформационные технологии; риск-ориентированный подход; оценка качества жизни населения с учетом природных угроз ЭБ. Представляется, что результаты выполнения проекта позволят расширить понимание устойчивости технических и социальных систем и внесут вклад в развитие этого направления.

**Благодарности.** Результаты получены в рамках выполнения проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН АААА-А17-117030310444-2 (проект №349-2016-0005) и при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ №19-07-00351, №18-07-00714, № 17-07-01341, авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонов Г.Н., Черкесов Г.Н., Криворуцкий Л.Д. и др. Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука. 1990. 285 с.
2. Буянов В.П., Кирсанов К.А., Михайлов Л.А. Управление рисками (рискология). М.: Экзамен. 2002. 384 с.
3. Воропай Н.И. Живучесть ЭЭС: методические основы и методы исследований // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1991. № 6. С. 52–59.
4. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Оценка устойчивости программно-вычислительного комплекса оценивания состояния в условиях кибератак // Труды международного научного семинара «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». Вып. 69. Том 2. Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2018. С. 9–18.
5. Воропай Н.И., Колосок И.Н., Коркина Е.С., Осак А.Б. Проблемы уязвимости и живучести кибер-физических электроэнергетических систем // Энергетическая политика. Вып. 5. 2018. С. 53–61.
6. Защита электрических сетей от природных рисков. © ОБСЕ (Protecting Electricity Networks from Natural Hazards.). Пер. с англ.: Ковалев Г.Ф., Крупенёв Д.С. и др. 2016. 132 с.
7. Королёв В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2007. 544 с.
8. Массель Л.В. Конвергенция исследований критических инфраструктур, качества жизни и безопасности // Информационные технологии и системы: Труды Шестой Международной научной конференции ИТиС-2017. Челябинск: ЧелГУ. Науч. электрон. издание. ISBN 978-5-7271-1417-9. С. 170–175. Режим доступа: <http://iit.csu.ru/content/docs/science/itis2017/itis2017.pdf> (дата обращения 10.05.2017)
9. Массель Л.В., Блохин А.А. Когнитивное моделирование индикаторов качества жизни: предлагаемый подход и пример использования // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. Т.14. №2. 2016. С. 72–79
10. Массель Л.В., Блохин А.А. Метод когнитивного моделирования индикаторов качества жизни с учетом внешних факторов // Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Баумана. №4. 2016. С. 65–75. DOI: 10.7463/0416.0839061
11. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска // Проблемы анализа риска. 2008. Т. 5. № 3. С. 72–85
12. Найт Ф.Х. Риск, неопределенность и прибыль. М.: Дело. 2003. 359 с.
13. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Н.И. Пяткова, С.В. Воробьев. ИСЭМ СО РАН. Новосибирск: Наука. 2017. 116 с.
14. Орлов А.В. Имитационное моделирование инвестиционных рисков // Управление риском. 2008. №1. С. 28–33.
15. Савельев В.А., Батаева В.В. Оценка влияния угроз на региональную энергетическую безопасность с использованием элементов теории риска // Труды Международного научного семинара «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики». Иркутск: ИСЭМ СО РАН. 2015. Вып. 65. С. 396–404.

16. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Майсюк Е.П., Тугузова Т.Ф., Иванов Р.А. Энергетическая инфраструктура центральной экологической зоны: воздействие на природную среду и пути его снижения // География и природные ресурсы. 2016. №5. С. 218–224.
17. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. и др. Возобновляемая энергетика как одно из направлений снижения антропогенной нагрузки в центральной экологической зоне Байкальской природной территории // География и природные ресурсы. 2016. №3. С. 86–90. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(86-90)
18. Силич В.А., Силич М.П. Оценка угроз энергетической безопасности региона с использованием «нечеткой» карты рисков // Вестник ИрГТУ. 2011. №34 (51). С. 11–16.
19. Токаренко Г.С. Методы оценки рисков // Финансовый менеджмент. 2006. №6. С. 129–143.
20. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. М.:СИНТЕГ. 1998. 376с.
21. Финогенко И.А., Дьякович М.П., Блохин А.А. Методология оценивания качества жизни, связанного со здоровьем // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. №. 1. С. 121–130.
22. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути их решения / Н.И. Пяткова [и др. Отв. ред. Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов. ИСЭМ СО РАН. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2011. 198 с.
23. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security. Limassol. Cyprus. October 13-15. 2014. 12 p.
24. Cimellaro G., Reinhorn A. & Bruneau M. Seismic resilience of a hospital system, Structure and Infrastructure Engineering 6 (1-2). 2010. Pp. 127–144
25. Davoudi S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End, Planning Theory and Practice 13(2). 2012. Pp. 299–307.
26. Holling C. Resilience and Stability in Ecological Systems, Annual Review of Ecology and Systematics 4. 1973. Pp. 1–23.
27. Holling C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience, Engineering Within Ecological Constraints, ed.: Peter Schultz, National Academy Press, Washington D.C. 1996. Pp. 31–43.
28. <http://central.mchs.ru/document/217214> (Дата обращения 23.03.2018)
29. <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/57774.html/> (Дата обращения 9.11.2019)
30. <http://www.vseneprostotak.ru/2013/01/statistika-prirodnih-kataklizmov-tendentsii/> (Дата обращения 2.04.2018)
31. <http://xn--80aaaa1bhnclcci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html> (Дата обращения 26.03.2018)
32. Massoud A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid // IEEE PES General Meeting, Pittsburg. USA. July 20-24. 2008. 5 p.
33. Sadeghi M., Shawalpour S. Energy risk management and value at risk modeling // Energy Policy. 2006. №34. Pp. 3367–3373.
34. Yezhou Wang, Chen Chen, Jianhui Wang, Baldick R. Research on resilience of power systems under natural disasters – A review // IEEE Trans. Power Syst. 2016. Vol. 31. № 2, Pp. 1604–1612.
35. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress. Toulouse. France. July 9-14. 2017. Pp. 11136–11144.

UDK 004.8 : (620.9 + 504.03)

**RISK ASSESSMENT OF NATURAL AND TECHNOGENIC THREATS TO  
RESILIENCE OF ENERGY, ECOLOGY AND SOCIAL SYSTEMS  
BASED ON INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGIES**

**Lyudmila V. Massel**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher,  
Head Laboratory "Information Technologies in Energy",  
Institute of Energy Systems L.A. Melentyev SB RAS,  
664033 Irkutsk, Lermontov str., 130, e-mail: [massel@isem.irk.ru](mailto:massel@isem.irk.ru)

**Nadezhda P. Komendantova**

Ph.D., Senior Researcher  
International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA),  
Laxenburg, Austria  
Schlossplatz 1, 2361 Laxenburg, e-mail: [komendan@iiasa.ac.at](mailto:komendan@iiasa.ac.at)

**Abstract.** The article discusses the prerequisites for the implementation of a joint project planned by the teams of the Institute of Energy Systems named after L.A. Melentyev SB RAS (Russia, Irkutsk) and the International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (Laxenburg, Austria). It is of interest to compare the approaches to resilience studies developed at ISEM SB RAS and IIASA. The definition of different types of resilience, considered in international practice, is given, the studies of the field of energy and environmental safety and quality of life in RF are analyzed. On the Russian side, it is planned to carry out a project for the Baikal natural territory, partially including the territory of the Irkutsk region, the Republic of Buryatia and the Zabaikalskiy region. Intelligent information technologies developed in the ISEM SB RAS team of scientists will be applied, based primarily on the methods of cognitive and probabilistic (based on Bayesian trust networks) modeling.

**Keywords:** resilience of energy, ecology and social systems, natural and technogenic threats, risk assessment, intelligent information technology, cognitive and probabilistic modeling.

**Acknowledgment.** The results were obtained in the framework of the project on state assignment to ISEM SB RAS AAAA-A17-117030310444-2 (project № 349-2016-0005) and with partial financial support from RFBR grants № 19-07-00351, № 18-07-00714, № 17-07-01341, the authors are grateful to the Russian Foundation for Basic Research.

**References**

1. Antonov G.N., Cherkesov G.N., Krivoruckij L.D. i dr. Metody i modeli issledovanija zhivuchesti sistem jenergetiki [Methods and models for studying the survivability of energy systems.]. Novosibirsk: Nauka = Science. 1990. 285 p. (in Russian)
2. Bujanov V.P., Kirsanov K.A., Mihajlov L.A. Upravlenie riskami (riskologija) [Risk management (riskology)]. Moscow. Jekzamen = Exam. 2002. 384 p. (in Russian)

3. Voropaj N.I. Zhivuchest' JeJeS: metodicheskie osnovy i metody issledovanij [EES survivability: methodological foundations and research methods] // Izvestija AN SSSR. Jenergetika i transport = Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Energy and transport. 1991. № 6. Pp. 52 – 59. (in Russian)
4. Voropaj N.I., Kolosok I.N., Korkina E.S. Ocenka ustojchivosti programmno-vychislitel'nogo kompleksa ocenivaniya sostojaniya v uslovijah kiberatak [Assessment of the resilience of the software and computer complex for assessing the state in conditions of cyber attacks] // Trudy mezhdunarodnogo nauchnogo seminar «Metodicheskie voprosy issledovanija nadjozhnosti bol'shih sistem jenergetiki» = Proceedings of the International Scientific Seminar "Methodological issues of the study of the reliability of large energy systems." Irkutsk. MESI SB RAS. 2018. Issue 69. Vol. 2. Pp. 9–18. (in Russian)
5. Voropaj N.I., Kolosok I.N., Korkina E.S., Osak A.B. Problemy ujazvimosti i zhivuchesti kiber-fizicheskikh jelektrojenergeticheskikh system [Problems of vulnerability and survivability of cyber-physical electric power systems] // Jenergeticheskaja politika = Energy Policy. 2018. Vol. 5. Pp. 53–61. (in Russian)
6. Zashhita jelektricheskikh setej ot prirodnyh riskov [Protecting Electricity Networks from Natural Hazards]. Translation from English.: Kovalev G.F., Krupen'kov D.S. i dr. 2016. 132 p. (in Russian)
7. Korolev V.Ju., Bening V.E., Shorgin S.Ja. Matematicheskie osnovy teorii riska [Mathematical foundations of risk theory]. Moscow. FIZMATLIT. 2007. 544 p. (in Russian)
8. Massel' L.V. Konvergencija issledovanij kriticheskikh infrastruktur, kachestva zhizni i bezopasnosti [Convergence of research of critical infrastructures, quality of life and security] // Trudy Shestoj Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii “Informacionnye tehnologii i sistemy” (ITiS-2017) = Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Information Technologies and Systems” (ITIS-2017). Chelyabinsk. ChelSU. Scientific electron. edition. ISBN 978-5-7271-1417-9. Pp. 170–175. Available at: <http://iit.csu.ru/content/docs/science/itis2017/itis2017.pdf> (accessed 05.10.2017). (in Russian)
9. Massel' L.V., Blohin A.A. Kognitivnoe modelirovanie indikatorov kachestva zhizni: predlagaemyj podhod i primer ispol'zovanija [Cognitive modeling of indicators of quality of life: the proposed approach and example of use] // Vestnik NGU. Serija: Informacionnye tehnologii = Bulletin of NSU. Series: Information Technology. 2016. Vol.14. № 2. Pp. 72–79. (in Russian)
10. Massel' L.V., Blohin A.A. Metod kognitivnogo modelirovanija indikatorov kachestva zhizni s uchetom vneshnih faktorov [The method of cognitive modeling of quality of life indicators taking into account external factors] // Nauka i obrazovanie. Nauchnoe izdanie MGTU im. Baumana = Science and Education. Scientific publication of MSTU Bauman. 2016. № 4. Pp. 65–75. DOI: 10.7463/0416.0839061 (in Russian)
11. Mahutov N.A., Reznikov D.O. Ocenka ujazvimosti tehniceskikh sistem i ee mesto v procedure analiza riska [Vulnerability assessment of technical systems and its place in the risk analysis procedure] // Problemy analiza riska = Problems of risk analysis. 2008. Vol. 5. № 3. Pp. 72–85 (in Russian)
12. Najt F.X. Risk, neopredelennost' i pribyl' [Knight F.X. Risk, Uncertainty, and Profit]. Moscow. Delo = Publishing House Delo. 2003. 359 p. (in Russian)

13. Obespechenie jenergeticheskoy bezopasnosti Rossii: vybor prioritetov [Ensuring the energy security of Russia: choice of priorities] / S.M. Senderov, V.I. Rabchuk, N.I. Pjatкова, S.V. Vorob'ev. MESI SB RAS. Novosibirsk: Nauka = Science. 2017. 116 p. (in Russian)
14. Orlov A.V. Imitacionnoe modelirovanie investicionnyh riskov [Simulation of investment risks] // Upravlenie riskom = Risk management. 2008. №1. Pp. 28–33. (in Russian)
15. Savel'ev V.A., Bataeva V.V. Ocenka vlijaniya ugroz na regional'nuju jenergeticheskiju bezopasnost' s ispol'zovaniem jelementov teorii riska [Assessment of the threats impact on regional energy security using elements of risk theory] // Trudy Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara «Metodicheskie voprosy issledovanija nadezhnosti bol'shih sistem jenergetiki» = Proceedings of the International Scientific Seminar "Methodological Issues of Investigating the Reliability of Large Energy Systems". Irkutsk. ISEM SB RAS. 2015. Vol. 65. Pp. 396–404. (in Russian)
16. Saneev B.G., Ivanova I.Ju., Majsjuk E.P., Tuguzova T.F., Ivanov R.A. Jenergeticheskaja infrastruktura central'noj jekologicheskoy zony: vozdejstvie na prirodnuju sredu i puti ego snizhenija [Energy infrastructure of the central ecological zone: impact on the natural environment and ways to reduce it] // Geografija i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources. 2016. №5. Pp. 218–224. (in Russian)
17. Saneev B.G., Ivanova I.Ju., Tuguzova T.F. i dr. Vozobnovljaemaja jenergetika kak odno iz napravlenij snizhenija antropogennoj nagruzki v central'noj jekologicheskoy zone Bajkal'skoj prirodnoj territorii [Renewable energy as one of the ways to reduce the anthropogenic load in the central ecological zone of the Baikal natural territory] // Geografija i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources. 2016. №3. Pp. 86–90. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-3(86-90). (in Russian)
18. Silich V.A., Silich M.P. Ocenka ugroz jenergeticheskoy bezopasnosti regiona s ispol'zovaniem «nechetkoj» karty riskov [Assessment of threats to the region's energy security using a “fuzzy” risk map] // Vestnik IrGTU = ISTU Bulletin. 2011. №34 (51). Pp. 11–16. (in Russian)
19. Tokarenko G.S. Metody ocenki riskov [Methods of risk assessment] // Finansovyj menedzhment = Financial management. 2006. №6. Pp. 129–143. (in Russian)
20. Trahtengerc Je.A. Komp'juternaja podderzhka prinjatija reshenij [Trachtengerts E.A. Computer decision support]. Moscow. SINTEG. 1998. 376 p. (in Russian)
21. Finogenko I.A., D'jakovich M.P., Blohin A.A. Metodologija ocenivaniya kachestva zhizni, svjazannogo so zdorov'em [Methodology for assessing the quality of life associated with health] // Vestnik Tambovskogo universiteta. Serija: Estestvennye i tehnicheckie nauki = Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences. 2016. Vol. 21. №. 1. Pp. 121–130. (in Russian)
22. Jenergeticheskaja bezopasnost' Rossii: problemy i puti ih reshenija [Energy security of Russia: problems and solutions] / N.I. Pjatкова i dr. Otv. red. N.I. Voropaj, M.B. Chel'cov. = N.I. Pyatkova et al. Ed. N.I. Voropaj, M.B. Cheltsov. MESI SB RAS. Novosibirsk. Izd-vo SO RAN = Publishing House of the SB RAS. 2011. 198 p. (in Russian)
23. Cen Nan, Sansavini G., Kroeger W. Building an integrated metric for quantifying the resilience of interdependent infrastructure systems // 9th Intern. Conf. on Critical Information Infrastructure Security. Limassol. Cyprus. October 13-15. 2014. 12 p.

24. Cimellaro G., Reinhorn A. & Bruneau M. Seismic resilience of a hospital system // Structure and Infrastructure Engineering 6 (1-2). 2010. Pp. 127–144.
25. Davoudi S. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End // Planning Theory and Practice. 13(2). 2012. Pp. 299–307.
26. Holling C. Resilience and Stability in Ecological Systems // Annual Review of Ecology and Systematics. 4. 1973. Pp. 1–23.
27. Holling C. Engineering Resilience Versus Ecological Resilience, Engineering Within Ecological Constraints, ed.: Peter Schultz, National Academy Press. Washington D.C. 1996. Pp. 31–43.
28. <http://central.mchs.ru/document/217214> (accessed 23.03.2018)
29. <http://www.consultant.ru/law/hotdocs/57774.html/> (accessed 9.11.2019)
30. <http://www.vseneprostotak.ru/2013/01/statistika-prirodnih-kataklizmov-tendentsii/> (accessed 2.04.2018)
31. <http://xn--80aaaa1bhncclci1cl5c4ep.xn--p1ai/cd2/index.html> (accessed 26.03.2018)
32. Massoud A. Challenges in reliability, security, efficiency, and resilience of energy infrastructure: Toward smart self-healing electric power grid // IEEE PES General Meeting, Pittsburg. USA. July 20-24. 2008. 5 p.
33. Sadeghi M., Shawalpour S. Energy risk management and value at risk modeling / Energy Policy. 2006. №34. Pp. 3367–3373.
34. Yezhou Wang, Chen Chen, Jianhui Wang, Baldick R. Research on resilience of power systems under natural disasters – A review // IEEE Trans. Power Syst. 2016. Vol. 31. № 2. Pp. 1604–1612.
35. Zhonglin Wang, Nistor M.S., Pickl S.W. Analysis of the definitions of resilience // 20th IFAC World Congress. Toulouse. France. July 9-14. 2017. Pp. 11136–11144.

## СТРАТИФИЦИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ГОСУДАРСТВЕННЫМ БЮДЖЕТОМ

Ерженин Роман Валерьевич

К.э.н., генеральный директор ООО «НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ГОСУЧЕТ»

143441, Московская область, Красногорский район,

69 км МКАД, п/о Путилково, ООК ЗАО «Гринвуд», стр. 19

e-mail: [erzhenin@gmail.com](mailto:erzhenin@gmail.com)

**Аннотация.** Развитие современных информационных технологий приводит к постоянному росту сложности управления, которая в целом и задает тенденцию к поиску специальных методов моделирования сложных систем. В статье предложен новый подход к построению сложной информационной системы управления государственным бюджетом на основании стратифицированного подхода. Автором разработана четырехуровневая формальная модель системы управления государственным бюджетом, приведено компромиссное описание модели многослойного много-эшелонного взаимодействия элементов управления, сочетающее одновременно простоту и обеспечивающее целостность сложной системы. Представленные описания стратифицированной модели управленческой деятельности могут быть использованы для проведения дальнейших исследований, связанных с оценкой показателей, характеризующих различные свойства сложных систем в государственном управлении, выбором оптимальной структуры систем управления и оптимальных значений их параметров.

**Ключевые слова:** электронный бюджет, цифровое госуправление, сложная система, крупномасштабные системы.

**Цитирование:** Ерженин Р.В. Стратифицированная модель управления государственным бюджетом // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 46–59. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-04

**Введение.** Отличительной чертой современного этапа развития государственного управления является постепенный переход от руководящей деятельности по документам и отчетам к использованию интеллектуальных систем при принятии решений. Интенсивное внедрение новых информационных технологий в процессы управления идет во всех отраслях государства, однако, как показывает время, не все иницилируемые «сверху» ИТ-проекты заканчиваются успешным внедрением. Попытки создания вертикально-интегрированных государственных информационных систем управления пока не приводят к существенным изменениям: по-прежнему стоимость деятельности управленца остается высокой, а скорость государственных сервисов – низкой, в том числе и из-за присутствия в управлении традиционных «бумажных» процессов.

Наиболее уязвимыми в части успешности, по мнению ряда исследователей, оказываются проекты по внедрению крупномасштабных информационных систем<sup>1</sup> управления [4]. При проектировании подобных сложных систем и их подсистем возникают

<sup>1</sup> В англоязычных источниках — Large-Scale Complex IT Systems

многочисленные задачи, требующие оценки качественных и количественных закономерностей систем, проведения структурного алгоритмического и параметрического их синтеза [1, 2, 5, 9, 11, 13].

К одной из ключевых причин неудачной реализации уникальной государственной интегрированной информационной системы (ГИИС) «Электронный бюджет» относят ряд проблем, связанных с прохождением этапа макропроектирования системы [4]. На этой стадии проектирования требуется разработка обобщенной модели процесса функционирования сложной организационно-технической системы управления (СОТС управления), которая позволяет разработчику получить ответы на вопросы об эффективности различных стратегий управления объектом при его взаимодействии с внешней средой. В разработанных на этапе проектирования требованиях к архитектуре ГИИС не были формализованы модели эффективности системы управления государственным бюджетом, что не позволяет пока сравнить показатели ценности результатов, полученных в итоге внедрения системы, и те затраты, которые были вложены в ее разработку и создание.

Целью данного исследования является разработка модели системы управления государственным бюджетом, способной компромиссно представить СОТС управления в простом описании и, одновременно, достаточной для учета наиболее существенных для оценки эффективности поведенческих характеристик ИС управления.

**1. Структура управления государственным бюджетом.** В настоящее время при анализе и синтезе сложных (больших) систем получил развитие системный подход, для которого важным является определение структуры системы – совокупности связей между элементами системами, отражающих их взаимодействие.

В управлении государственным бюджетом, как в системе, и при определении нормативным законодательством понятия бюджета, как *денежного фонда*, можно выделить две структурные сущности: объект управления – *бюджет* и управляющая система – *государство*. Функция управления бюджетным фондом относится к специфическим функциям государственного управления, связанным с базовыми функциями управления государственными (общественными) финансами.

В то же самое время бюджет, как объект управления, законодательством определяется не только как денежный фонд, но и как *форма* образования и расходования этого фонда, который предназначен для финансирования широкого круга общественных потребностей (благ) – отраслей хозяйства, социальных нужд, управления, обороны и т.д. Под формой в данном случае следует понимать способ организации и способ существования бюджета, как объекта экономической категории, которому присущи две базовые функции:

- 1) *распределительная* (перераспределение денежных доходов между разными сферами деятельности, подразделениями общественного производства, уровнями государственного управления, социальными слоями общества и т. д.);
- 2) *контрольная* (сигнализация обо всех отклонениях о движении бюджетных средств и контроль результатов расходования бюджетных средств).

Основными группами функций, характеризующих управление государственным бюджетом, являются:

- функция принятия решений – функции преобразования содержания информации о бюджете и об активах государства  $f_c$  ;

- рутинные функции обработки информации, связанной перераспределением бюджетов, с движением бюджетных средств и с изменением активов государства  $f_p$  ;
- функции обмена управленческой информацией  $f_c$  .

Функции принятия решений  $f_c$  выражаются в генерировании новой информации в ходе прогнозирования, планирования, контроля и анализа, а также при регулировании и координации в ходе оперативного управления. Эта группа функций является главной, поскольку обеспечивает выработку информационных воздействий, связанных как с перераспределением бюджетного фонда, так и с процедурами расходования бюджетных средств и процедурами бюджетного контроля.

Функции обработки информации  $f_p$  охватывают учет, контроль, хранение, поиск, отображение, тиражирование, преобразование формы информации и т.д. Эта группа функций обработки информации не изменяет ее смысл, т.е. это рутинные функции, не связанные с содержательной обработкой информации о бюджете.

Функции обмена информацией  $f_c$  связаны с доведением выработанных воздействий до ОУ и информационным обменом между ним и ЛПР. Получение (сбор), передача информации по управлению осуществляется в текстовой, графической, табличной и иных формах по различным каналам связи.

Следуя изложенному в [8], в управлении государственным бюджетом можно выделить четыре качественно различимые формы проявления информации: осведомляющую  $I_{ос}$ , преобразующую  $I_{пр}$ , принятия решения  $I_p$  и управляющую  $I_y$ . К осведомляющей относят информацию о состоянии внешней среды, объекта управления и управляющей системы. Преобразующая включает информацию, содержащуюся в алгоритмах управления. Информация принятия решения является отражением образов и целей на конечное множество принимаемых решений. Управляющей является информация, вызывающая целенаправленное изменение состояния объекта управления.

Такой подход к определению главных функций управления государственным бюджетом позволяет отнести эту управленческую деятельность к типу систем с управлением. Подобная целенаправленная (кибернетическая) система включают три базовые подсистемы (рис. 1):

- государственный бюджет, как форму образования и расходования денежного фонда (объект управления (ОУ));
- управляющую систему (УС);
- систему связи (СС).

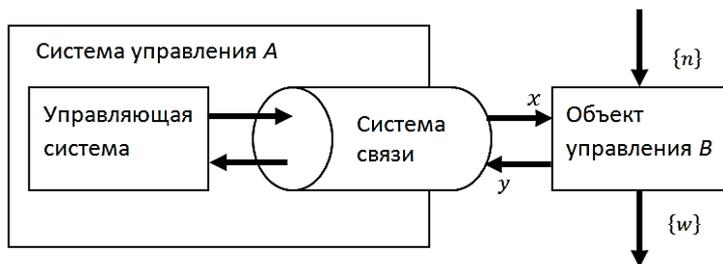


Рис. 1. Система с управлением [7, с.10]

**Управляющая система** совместно с системой связи образует систему управления деятельностью по управлению государственным бюджетом или, в более краткой формулировке, *систему управления государственным бюджетом* (СУГБ).

Основным элементом СУГБ, как организационно-технической системы, является *лицо, принимающее решение* (ЛПР). Под ЛПР подразумеваются индивиды, на которых законодательством РФ возложены полномочия по выбору управляющих воздействий, направленных на управление объектом управления и управляющими компонентами системы управления, т.е. тех ЛПР, кто обеспечивает согласование и координацию деятельности других индивидов, занятых в управлении государственным бюджетом. Таким образом, в СУГБ можно выделить два основных направления управляющих воздействий: выработка «внешних» управляющих воздействий, направленных на управляемый объект и выработка «внутренних» управляющих воздействий, направленных на управляющие компоненты. В первом случае объектом управления выступает государственный бюджет, а во втором – объектом управления являются субъекты хозяйствования.

Государственный бюджет, как объект управления, следуя установкам финансовых институтов, условно делится на две составляющие:

- 1) *денежный фонд*, предназначенный для выполнения функций и задач государства и/или публично-правового образования;
- 2) *финансовые ресурсы* (перераспределенная часть денежного фонда) конкретных субъектов хозяйствования, предназначенные для обеспечения выполнения задач, отвечающим целям их деятельности.

Различные типы управляющих воздействий формируют различные типы систем связи. При этом каждая *система связи* для каждого объекта управления (денежный фонд, субъект хозяйствования) включает канал прямой связи (рабочий канал), по которому передается входная информация – множество  $x$ , включающую командную информацию  $u \subseteq x$ , и канал обратной связи (целевой канал), по которому передается информация о состоянии объекта управления – множество выходной информации  $y$ .

В целевом канале на основе информационных процессов происходит выбор цели и принятие решения по выбору управляющего воздействия. В рабочем канале формируется информация, реализуемая исполнительным органом, осуществляющим целенаправленное изменение состояния объекта управления через вещественно-энергетические характеристики. Целевой канал может находиться как на одном уровне иерархии с рабочим, так и на более высоком [7].

Множество переменных  $v$  обозначают различное воздействие окружающей среды, в том числе сообщения о многочисленных событиях, происходящих во внешней среде и воздействующих на объект управления и требующих корректирующего воздействия для перевода его в нормализованное состояние. Множество переменных  $w$  обозначают показатели, характеризующие качество и эффективность управления (функционирования подсистемы  $B$ ), что позволяет обозначить основные группы оценки эффективности управления:

- эффективность управления бюджетными расходами;
- эффективность системы управления бюджетом;
- эффективность финансового менеджмента субъектов хозяйствования.

**2. Смешанная многоуровневая иерархическая структура с вертикальными и горизонтальными связями.** Сложность структуры объекта управления  $B$  и сложность СУГБ указывает на необходимость расчленения ее на части (объекты, подсистемы, элементы) по различным признакам. Выбор принципа выделения составных частей для сложных информационных систем управления должен удовлетворять следующим основным условиям: обеспечивать их максимальную автономность, учитывать необходимость координации действий для достижения общей цели функционирования, а также совместимость отдельных частей [7].

На каждом уровне бюджетной системы РФ организационными структурами выполняется отдельный набор функций, связанных с стратегическим и оперативным управлением бюджетом соответствующего публично-правового образования. Например, на федеральном уровне – это Министерство финансов, отраслевые министерства и ведомства, Федеральное казначейство и т.п. При принятии решений устанавливаются как горизонтальные взаимодействия между организационными структурами одного уровня управления для согласования решений, взаимного обмена информацией и т.д., так и вертикальные связи с организационными структурами нижестоящих уровней управления. Так, стержневой структурой СУГБ является территориальная (вертикальная) иерархия Федерального Казначейства. Этот федеральный орган исполнительной власти (федеральная служба) подведомствен Минфину России (отраслевому общегосударственному министерству Правительства России) и наделен специфическими функциями управления, осуществляемыми как во взаимосвязи с отраслями, так и со всеми публично-правовыми образованиями.

Если вспомнить историю, то в период владения церкви, а затем и царского правления структура управления государственной казной развивалась на принципах территориального деления. С приходом советской власти управление приобрело более четкую форму территориально-отраслевого управления, когда управление финансами на местах непосредственно стало пересекаться с управлением по отраслям (здравоохранение, образование, культура и т.п.). Подобный тип *смешанной структуры управления* характерен не только для сферы управления финансами, но и для других общегосударственных функций управления.

В целом, можно заключить, что для управления государственным бюджетом характерны следующие виды иерархии: *временная, пространственная, функциональная и информационная*.

Признаком деления *временной иерархии* является интервал времени от момента поступления информации о состоянии объекта управления до выдачи управляющего воздействия. Чем больше интервал, тем выше уровень элемента [12]. Управление бюджетом осуществляется: в реальном масштабе времени; с интервалом сутки, месяц, год и т.д. При этом интервал в управлении бюджетом выбран не произвольно, а исходя из критериев, обеспечивающих устойчивость объекта управления и эффективность функционирования всей системы перераспределения денежного фонда. Таким образом, управление бюджетным процессом осуществляется как в реальном режиме времени, так и по истечении определенного временного интервала. По этому виду можно выделить следующие уровни иерархии управления бюджетом: долгосрочный (5 лет), среднесрочный (3 года), годовой, квартальный, месячный, дневной и в реальном времени.

Признаком деления **пространственной (территориальной) иерархии** является занимаемая публично-правовым образованием площадь, и чем больше площадь территории, тем выше её ранг (уровень в иерархии). Данный признак не всегда является объективным (см. Таблица 1), так как площадь, занимаемая объектом, не всегда соответствует его значимости. Поэтому другим критерием пространственной иерархии является количество населения, проживающего на этом пространстве (территории).

**Таблица 1.** Пример иерархии рангов публично-правовых образований РФ

Ранг	Публично-правовое образование	Площадь, тыс. км <sup>2</sup>	Население млн. чел.
1	Российская Федерация	17 125	144,5
2	Республика Саха (Якутия)	3 083	0,9
3	г. Якутск	0,1	0,3
3	Оленёкский эвенкийский национальный район	318	0,004
.....	.....	.....	.....
2	г. Москва	2	12,4
.....	.....	.....	.....
2	Московская область	44	7,4
3	Шатурский район	2,7	0,69
.....	.....	.....	.....
2	Псковская область	55	0,6
3	Невельский район	2,6	0,023
4	г. Невель	0,023	0,014
4	Плисская волость	0,59	0,0014
....	.....	.....	.....

В основе **функциональной иерархии** лежит функциональная зависимость элементов системы. На рис. 2 показана функциональная иерархия системы управления бюджетом государства, обеспечивающая управление движением денежного потока.



**Рис. 2.** Функциональная иерархия, основанная на управлении движением денежного потока

В управлении государственным бюджетом очевидна также функциональная иерархия по признаку *административной подчиненности*, например, начальник управления, начальник отдела, главный специалист, консультант и т.п.

В основе деления *информационной иерархии* на уровни лежат оперативность и обновляемость информации. Именно через эти признаки прослеживается иерархия информации по уровням управления бюджетом. На нижнем уровне хранится и обрабатывается периодически повторяющаяся и часто обновляемая информация, необходимая ежедневно, т.е. для оперативного управления. Следующий уровень составляет информация более обобщенная, чем оперативная (тактическая), она группируется по функциональным областям и применяется для принятия решений, в том числе и в процессах управления учреждениями, финансируемых за счет средств бюджета. На самом верхнем уровне сосредотачивается и обрабатывается стратегическая информация, для которой характерны высокая степень агрегированности, неповторяемость и достаточно редкое использование.

Концепция многоуровневой структуры, сочетающей *территориальной* и *отраслевой* принципы и принцип *вертикальных* и *горизонтальных* связей между автоматизированными системами управления впервые была предложена В.М. Глушковым при разработке общегосударственной автоматизированной системы управления (ОГАС) [3]. Подобная смешанная структура характерна и для современного управления государственным бюджетом, и может квалифицироваться как стратифицированная структура управления с вертикальными и горизонтальными связями. Описания структуры такого типа могут быть реализованы на принципах эшелонированного управления, предложенные М. Месаровичем [6]. В период создания ОГАС книга М. Месаровича еще не была опубликована и его работы не были широко известны в нашей стране, что, по мнению ряда авторов [12], не позволило создать подобное стратифицированное описание смешанных структур государственного управления.

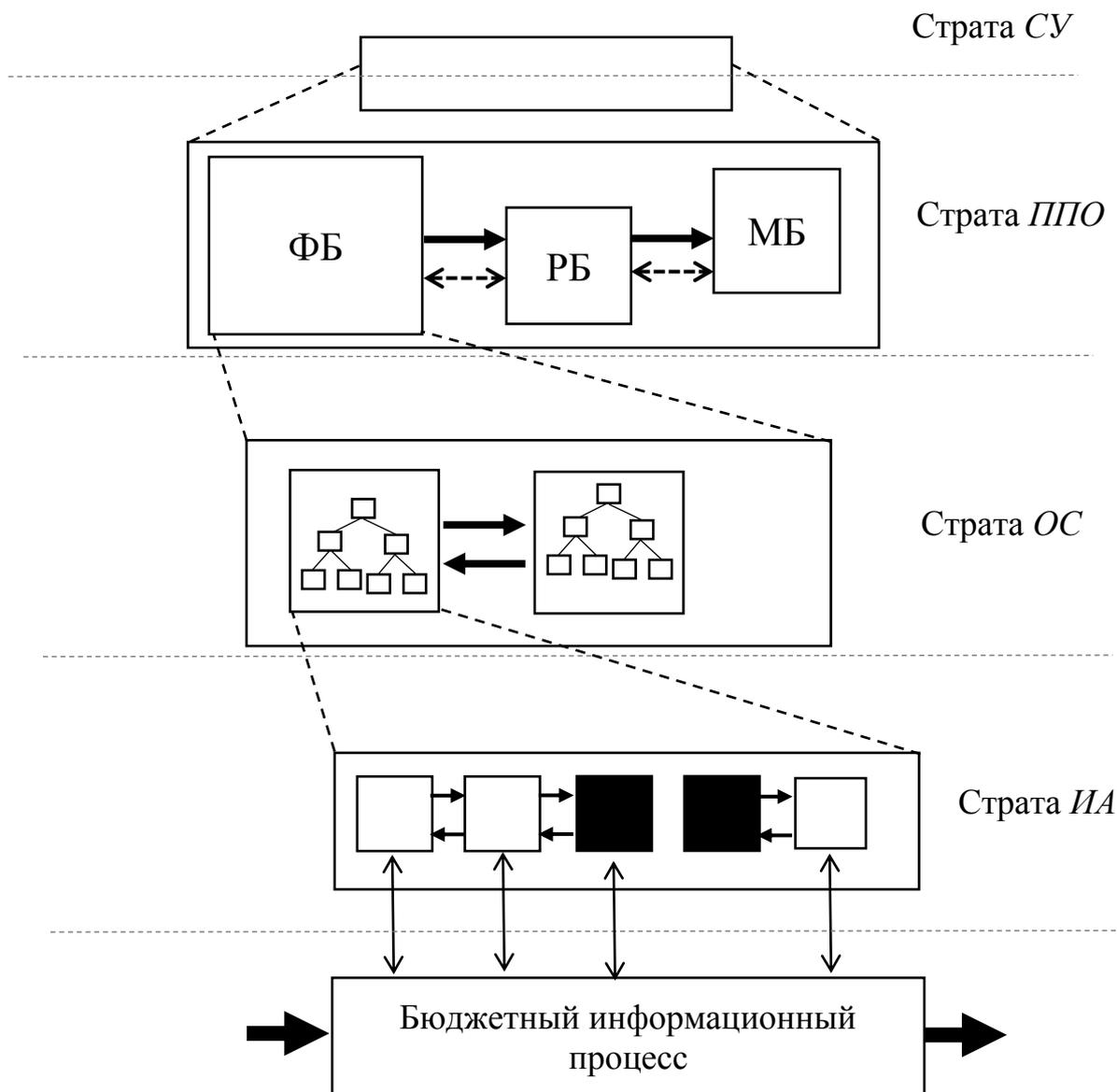
Реальная организационная структура современного российского управления на каждом уровне формируется с помощью соответствующих нормативно-правовых и нормативно-методических документов, в которых регламентируются конкретные информационные и координационные связи (с различной степенью согласованности) между органами управления. В соответствии с этим принципом организационные структуры территориального и отраслевого управления не всегда рассматриваются как подчиненные друг другу, что в целом затрудняет графическое представление структуры управления даже одной отраслью, не говоря уже об представлении структуры управления всей страной.

### **3. Стратифицированная модель управления государственным бюджетом.**

Как было сказано в предыдущем разделе, использование одновременно нескольких видов иерархических структур — от древовидных до многоэшелонных, относит структуру СУГБ к типу смешанных, что позволяет представить ее в виде стратифицированной модели, состоящей из четырех уровней (рис. 3):

- страта системы управления государственным бюджетом;
- страта систем управления публично-правовым образованием (ППО);
- страта систем управления организационной структурой (ОС);

- страта автоматизированных систем управления (страта интеллектуальных агентов (ИА) или человеко-машинных систем).



*СУ* - система управления (подсистема государственного управления)  
*ФБ, РБ, МБ* – федеральный, региональный, муниципальный бюджет  
*ППО* – публично-правовое образование (территория)  
*ОС* – организационная структура (механизм управления)  
*ИА* – интеллектуальный агент (человеко-машинная система)

**Рис. 3.** Стратифицированная модель управления государственным бюджетом

Уровни (страты) системы управления определены, исходя из структуры объекта управления *B*, в котором выделяются четыре основных уровня управления:

1. Уровень государственного управления с функцией управления государственным бюджетом и координацией управления бюджетами публично-правовых образований (ППО).
2. Уровень управления ППО с функцией управления соответствующим бюджетом (федеральным, региональным, муниципальным и т.п.) и координацией деятельности различных организационных структур (ОС).
3. Уровень управления ОС, которые по отношению к управлению бюджетным средствам могут быть двух видов:
  - а. ОС, миссия которых непосредственно связана с управлением соответствующего бюджета или бюджетов (финансовые органы, Казначейство России и т.п.);
  - б. ОС, для которых бюджетные средства являются ресурсом для реализации их миссии и достижения поставленных целей (государственные и муниципальные учреждения образования, здравоохранения, культуры, и т.п.

На этом уровне осуществляется управление интеллектуальными агентами, принимающими решения и обеспечивающими обработку информации в границах ОС, и имеющими отношение к соответствующему бюджету.

4. Уровень управления элементами информационной системы.

Выбор страт основан на анализе интерпретации производимых системой управления государственным бюджетом действий с позиций различных сущностей управления (таблица 2), и разного набора терминов, концепций и принципов, используемых для управления на выбранной страте.

**Таблица 2.** Сущности управления в иерархии управления СУГБ

<i>Страта</i>	<i>Внешняя среда (система)</i>	<i>Элемент в управлении (подсистема)</i>
Страта СУ	Государственное управление	Управление общественными финансами
Страта ППО	Управление в публично-правовом образовании	Управление бюджетом ППО
Страта ОС	Управление в организационной структуре	Управление средствами бюджета (нераспределенные, распределенные)
Страта ИА	Управление информационным бюджетным процессом	Интеллектуальный агент (человеко-машинная система)

Управление объектом, рассматриваемое на выбранной страте, более подробно раскрывается на нижерасположенной страте; элемент становится набором; подсистема на выбранной страте является системой для нижележащей страты. На любой данной страте мы изучаем поведение соответствующих систем с точки зрения их внутреннего механизма и эволюции, в то время как их взаимодействие при образовании новой системы изучается на вышележащей страте [6].

Следует отметить, что изучение управления на нижней страте не всегда лучше или основательнее, чем на верхней. На нижней страте мы концентрируем внимание на действиях подсистем, откладывая изучение их взаимодействий для вышестоящих страт [6].

Отношение «объект — система» для описаний на различных стратах приводит к иерархии соответствующих языков описания. Учитывая, что для каждой страты существует конкретный набор понятий и терминов, используемых при описании системы на этой страте, как правило, имеются и различные языки. Эти языки, в свою очередь, образуют иерархию с семантическими отношениями между любыми двумя последовательными членами иерархии [6].

Ввиду того, что для описания каждой из страт используется свой язык, то и аспекты описания функционирования всей системы на этих уровнях в общем случае очень слабо связаны между собой. Поэтому принципы и законы, используемые для характеристики управления государственным бюджетом на любой страте, в общем случае не связаны с принципами, используемыми на других стратах. Принципы управления денежными фондами нельзя вывести из параметров институциональной инфраструктуры, лежащей в основе построения организационных структур, и наоборот. Аналогично принципы построения организационных структур и законы, лежащие в основе взаимодействия человека и машины, не связаны между собой. Поэтому стратифицированное описание есть описание одной и той же системы с различных точек зрения [6].

Требования, предъявляемые для управления государственным бюджетом на любой страте, выступают как условия или ограничения управления для нижестоящих страт. Таким образом, можно говорить о некоторой асимметричной зависимости между условиями управления на различных стратах. Это находится в соответствии с предложенным М. Месаровичем [6] постулированным приоритетом действия. Например, если человеко-машинная система направлена на выполнение определенной управленческой деятельности, то порядок выполнения этой деятельности задается порядком и алгоритмами на уровне организационной структуры. Функции организационной структуры нормативно определяются на уровне управления публично-правовым образованием. Ход реального бюджетного процесса определяется нормативно-методическими требованиями на верхней страте, т.е. для надлежащего функционирования системы на выбранной страте все нижестоящие страты должны работать согласованно. Это указывает и на важность обратной связи в иерархической системе управления.

На любой страте мы изучаем поведение соответствующих систем, участвующих в управлении государственным бюджетом, с точки зрения их внутреннего механизма и эволюции, в то время как их взаимодействие при образовании новой системы изучаются на вышерасположенной страте. То, что является объектом рассмотрения на данной страте, более подробно раскрывается на нижележащей страте; элемент становится набором; подсистема на данной страте является системой для нижележащей страты. Поэтому понимание управления государственным бюджетом возрастает при последовательном переходе от управления территорией к организации системы управления бюджетом этой территории и к человеко-машинному взаимодействию при обработке информации и принятию решений. Чем ниже опускаемся по иерархии, тем детальнее становится раскрытие управления, чем выше мы поднимаемся, тем яснее становится смысл и значение всего управления государственным бюджетом.

Начинать изучение системы можно с любой страты, в том числе и находящейся в середине стратифицированной модели. На каждой страте можно формализовать и применять свои модели, при этом система будет сохраняться до тех пор, пока не изменится представление о ней на верхней страте, т.е. будет сохраняться концепция, замысел, которые раскрываются, детализируются в стратифицированной модели на каждом уровне. Существенные изменения в верхней страте произошли в 90-х годах прошлого столетия, после того как фактически был утрачен контроль за состоянием государственных финансов со стороны Министерства финансов и Правительства России [10] и в новой стране была практически заново построена новая финансовая система государства.

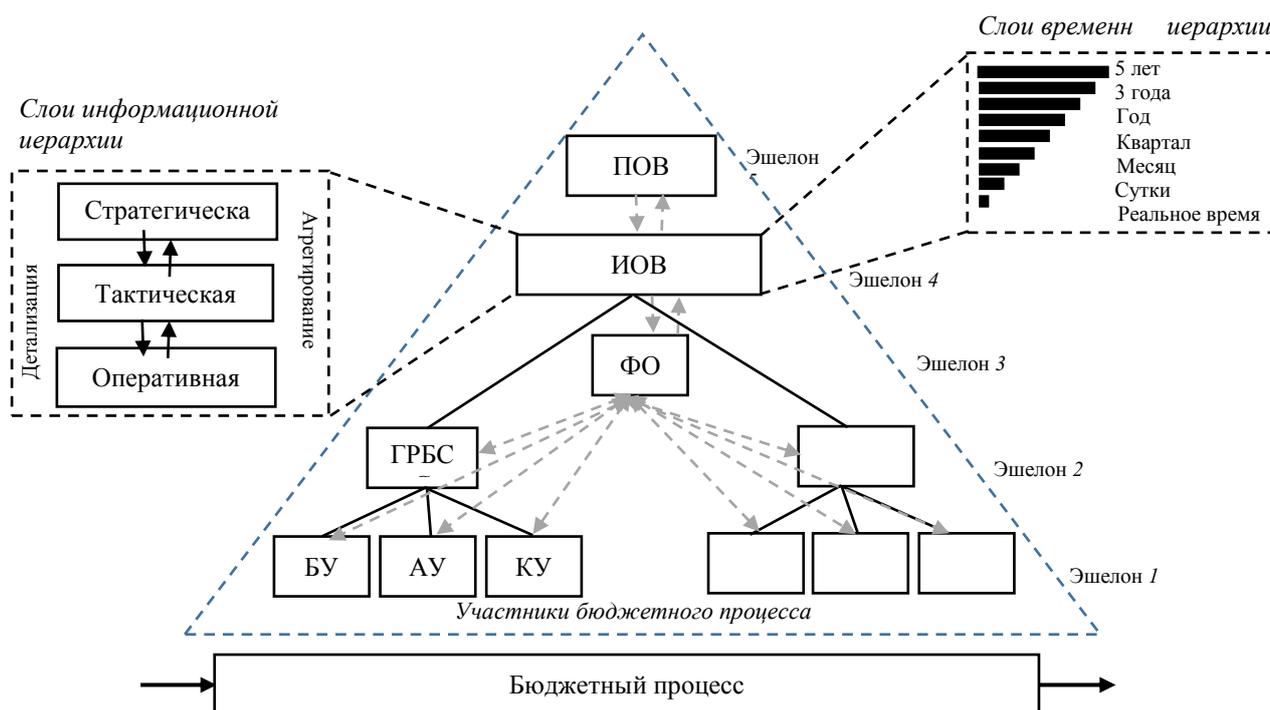
Таким образом, *верхняя страта* является основополагающей функцией управления, которая связана с финансовой политикой в сфере управления государственными финансами. Она направлена на разделение функций образования, распределения, использования финансовых ресурсов и обеспечение контроля за состоянием и целевым использованием финансов со стороны сложной структуры государственных органов.

Формат *страты ППО* задан принципами построения бюджетной системы РФ, сформированной на основе пространственной (территориальной) иерархии, которая рассматривалась ранее в предыдущем разделе. Между элементами страты ППО осуществляется не только информационный обмен, но и обмен средствами денежного фонда ППО, который чаще всего имеет однонаправленный характер движения средств бюджета от вышестоящих элементов иерархии к нижестоящим. Движение денежных средств от федерального уровня к нижестоящим определено бюджетной политикой государства, основанной на принципах централизованного управления финансами и институтах межбюджетных отношений.

Каждое ППО (территория) со своим населением имеет не только свои финансы и свое имущество, но и свою сложную организационную структуру управления бюджетом (*страта ОС*). Элементы этого уровня ввиду их крайней сложности представляется возможным описать в виде многоэшелонной многослойной структуры. Так, например, на рисунке 4 представлено схематическое описание одного из элементов страты организационной структуры. Основой подобного описания модели организационной структуры управления расходами бюджета стали многоэшелонные и многослойные модели, предложенные М. Месаровичем для описания сложных систем принятия решений.

**Заключение.** Проблемы синтеза иерархических систем в государственном управлении привлекали особое внимание исследователей, начиная с 60-х годов прошлого столетия. При этом описанию свойств смешанной иерархии государственного управления была посвящена богатая библиография лишь советского периода развития больших систем управления. Современной стройной и непротиворечивой теории, объясняющей закономерности функционирования иерархического управления в условиях применения широкого круга автоматизированных информационных систем, пока не существует. Это объясняется, прежде всего, тем, что любая иерархическая система государственного управления является сложной организационно-технической системой, в которой человек играет первостепенную роль, а формализация его взаимоотношений с «машиной» остается пока не до конца решенной задачей. Поэтому вопрос об оценке эффективности внедрения

информационных технологий в процессы управления различными отраслями в нашей стране также пока остаётся открытым.



*ПОВ* – представительный орган власти  
*ИОВ* – исполнительный орган власти  
*ГРБС* – главный распорядитель бюджетных средств

*ФО* – финансовый орган  
*БУ* – бюджетное учреждение  
*АУ* – автономное учреждение  
*КУ* – казенное учреждение

**Рис. 4.** Страта организационной структуры управления расходами бюджета в формате многоэшелонной многослойной модели

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. Учеб. пособие / Под ред. А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика. 2009. 368 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. М.: Наука. 1988.
3. Глушков В.М. Введение в АСУ. К.: «Техника». 1972. 310 с.
4. Ерженин Р.В. Оценка результатов реализации проекта по созданию ГИИС «Электронный бюджет» // Инновации и инвестиции. 2019. №6. С. 107–113.
5. Имитационное моделирование производственных систем / Под ред. А.А. Вавилова. М.: Машиностроение; Берлин: Техника. 1983. 417 с.
6. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: Математические основы. М.: Мир. 1978. 311 с.
7. Советов Б.Я., Цехановский В.В. Автоматизированное управление современным предприятием. Л.: Машиностроение. 1988.
8. Советов Б.Я., Цехановский В.В. Информационные технологии: учебник для среднего профессионального образования. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство «Юрайт». 2015. 261 с.

9. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем: учеб. для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа. 2001. 343 с: ил.
  10. Пантелеев А.Ю. Федеральное казначейство в системе управления государственными финансами : (на примере Ульяновской области) : Дис. ... канд. экон. наук : 08.00.10 : Ульяновск. 2001. 151 с.
  11. Попович А.Ю., Цыгичко В.Н. Проблема синтеза иерархических структур управления // Труды ИСА РАН. 2009. Т. 41. С. 233–246.
  12. Теория систем и системный анализ в управлении организациями: Справочник: Учеб. пособие / Под ред. В.Н. Волковой и А.А. Емельянова. М.: Финансы и статистика. 2006. 848 с.
  13. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир. 1985.
- 

UDK 007.5:336.14

## STRATIFIED MODEL OF PUBLIC BUDGET MANAGEMENT

Roman V. Erzhenin

PhD in economics,

General Director of "NAUCHNO-PRACTICHESKI CENTER GOSUCHET" LTD

143441, Moscow region, Krasnogorsk district, 69 km of MKAD, p/o Putilkovo,

office and public complex of ZAO Greenwood, str. 19

email: rerzhenin@gmail.com

**Abstract.** The development of modern information technologies leads to a constant increase in complexity, which in general sets the tendency to search for special methods for modeling complex control systems. The article proposes a new approach to building a complex information system for managing the state budget on the basis of a stratified approach. The author has developed a four-level formal model of the state budget management system, provides a compromise description of the model of multilayered multi-interaction of controls, simultaneously combining simplicity and ensuring the integrity of a complex system. The presented descriptions of the stratified model of management activity can be used to conduct further research related to the assessment of indicators characterizing various properties of complex systems in public administration, the choice of the optimal structure of management systems and the optimal values of their parameters.

**Keywords:** e-budget, digital government, complex system, large-scale systems.

### References

1. Anfilatov B.C., Yemelyanov A.A., Kukushkin A.A. Sistemnyy analiz v upravlenii. Ucheb. posobiye [System analysis in management. Training allowance] / Ed. A.A. Yemelyanov. Moscow. Finansy i statistika = Finance and Statistics. 2009. 368 p. (in Russian)
2. Buslenko N.P. Modelirovaniye slozhnykh sistem [Modeling of complex systems]. Moscow. Nauka = Science. 1988. (in Russian)

3. Glushkov V.M. Vvedeniye v ASU [Introduction to ACS.]. Kiev. Izdatel'stvo "Tekhnika" = Publishing House "Technique". 1972. 310 p. (in Russian)
4. Erzhenin R.V. Otsenka rezul'tatov realizatsii proyekta po sozdaniyu GIIS «Elektronnyy byudzhet» [Evaluation of the results of the implementation of the project on the creation of the SIIS “Electronic Budget”] // Innovatsii i investitsii = Innovation and investment. 2019. №6. Pp. 107–113. (in Russian)
5. Imitatsionnoye modelirovaniye proizvodstvennykh sistem [Simulation modeling of production systems] / Ed. A.A. Vavilova. Moscow. Mashinostroyeniye = Publishing House "Engineering". Berlin. Tekhnika = Technics. 1983. 417 p. (in Russian)
6. Mesarovich M., Takahara I. Obshchaya teoriya sistem: Matematicheskiye osnovy [The general theory of systems: Mathematical foundations]. Moscow. Mir = publishing house "Mir". 1978. 311 p. (in Russian)
7. Sovetov B.Ya., Tsekhanovsky V.V. Avtomatizirovannoye upravleniye sovremennym predpriyatiyem [Automated management of modern enterprise]. Leningrad. Mashinostroyeniye = Publishing House "Engineering". 1988. (in Russian)
8. Sovetov B.Ya., Tsekhanovsky V.V. Informatsionnyye tekhnologii: uchebnik dlya srednego professional'nogo obrazovaniya [Information technologies: a textbook for secondary vocational education]. 6th ed., Pererab. and add. Moscow. Izdatel'stvo "Yurayt" = Publishing house "Yurayt". 2015. 261 p. (in Russian)
9. Sovetov B.Ya., Yakovlev S.A. Modelirovaniye sistem: uchebnik dlya vuzov [Modeling systems: Textbook for universities]. The 3rd Yud., pererab. and add. Moscow. Vysshaya shkola = Publishing house “high school”. 2001. 343 p. (in Russian)
10. Panteleev A.Yu. Federal'noye kaznacheystvo v sisteme upravleniya gosudarstvennymi finansami : (na primere Ul'yanovskoy oblasti) [Federal Treasury in the system of public finance management: (on the example of the Ulyanovsk region)]. Dis. ... Cand. econ Sciences: 08.00.10: Ulyanovsk. 2001. 151 p. (in Russian)
11. Popovich A.Yu., Tsygichko V.N. Problema sinteza iyerarkhicheskikh struktur upravleniya [The problem of synthesis of hierarchical control structures] // Proceedings of ISA RAS. 2009. T. 41. Pp. 233–246. (in Russian)
12. Teoriya sistem i sistemnyy analiz v upravlenii organizatsiyami: Spravochnik: Uchebnoye posobiye [System theory and system analysis in the management of organizations: a handbook: Proc. Manual] / Ed. V.N. Volkova and A.A. Yemelyanov. Moscow. Finansy i statistika = Finance and Statistics. 2006. 848 p. (in Russian)
13. Haken G. Sinergetika. Iyerarkhii neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh [Synergetic. Hierarchies of instabilities in self-organizing systems and devices]. Moscow. Mir = publishing house "Mir". 1985. (in Russian)

**ВИЗУАЛЬНАЯ АНАЛИТИКА И КОГНИТИВНЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ  
И АНАЛИЗА ГЕТЕРОГЕННЫХ ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ СИСТЕМ:  
ПРОБЛЕМЫ И ТЕНДЕНЦИИ**

**Захарова Алёна Александровна**

Д.т.н., доцент, старший научный сотрудник,  
Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук,  
125047, Россия, г. Москва, Миусская пл., 4,  
профессор кафедры «Информатика и программное обеспечение»,  
Брянский государственный технический университет,  
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7, e-mail: [zaa@tu-bryansk.ru](mailto:zaa@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0003-4221-7710

**Подвесовский Александр Георгиевич**

К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информатика и программное обеспечение»  
Брянский государственный технический университет,  
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7, e-mail: [apodv@tu-bryansk.ru](mailto:apodv@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0002-1118-3266

**Лагерев Дмитрий Григорьевич**

К.т.н., доцент, доцент кафедры «Информатика и программное обеспечение»  
Брянский государственный технический университет,  
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7, e-mail: [lagerevdg@tu-bryansk.ru](mailto:lagerevdg@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0002-2702-6492

**Аннотация.** В статье рассматривается проблематика анализа разнородных многопараметрических данных, получаемых из гетерогенных источников. Описывается структура процесса анализа данных на разных уровнях их представления, и обсуждается роль визуальной аналитики и когнитивного моделирования в качестве основы для реализации его этапов. Дается обзор существующих методов визуальной аналитики и когнитивного моделирования, с выделением актуальных направлений развития указанных подходов.

**Ключевые слова:** анализ данных, гетерогенные данные, мультисенсорные системы, визуализация, визуальная аналитика, когнитивное моделирование.

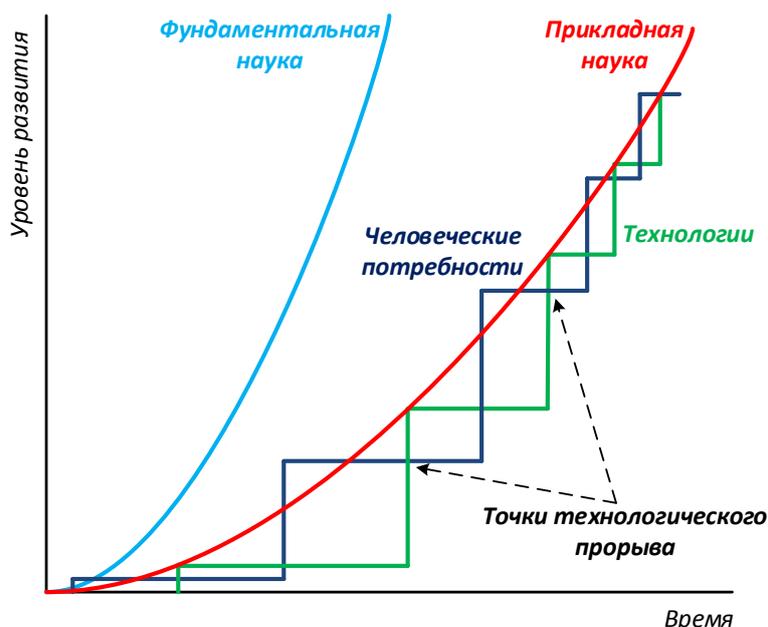
**Цитирование:** Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Лагерев Д.Г. Визуальная аналитика и когнитивные методы для обработки и анализа гетерогенных данных мультисенсорных систем: проблемы и тенденции // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 60–74. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-05

**Введение.** В современном представлении анализ данных – это анализ явлений, для которых еще нет математических моделей. Имеются только наборы экспериментальных данных «входы-выходы» либо даже только «входы», представленные в виде массивов или таблиц. Тем самым, основным предметом внимания современного анализа данных является конструирование моделей и определение параметров этих моделей. При этом задачей исследователя является не только и не столько проверка гипотез о возможных формах

зависимостей, параметрах предполагаемых законов распределений и т.д., сколько поиск и формирование самих гипотез, с привлечением знаний о предметной области, интуиции и эвристик.

Классический подход к анализу данных рассматривает процесс анализа в виде однонаправленной последовательности этапов «данные – модель – анализ – интерпретация». Развитием данного подхода является концепция анализа данных, предложенная в 60-х гг. 20-го века Дж. Тьюки [30], в рамках которой обоснована необходимость различения разведочного анализа данных (exploratory data analysis) и подтверждающего анализа данных (confirmatory data analysis). Кроме того, по Тьюки анализ данных носит циклический, итерационный характер: выдвинутые на первых этапах разведочного анализа гипотезы могут потребовать дополнительных экспериментальных данных или наблюдений, уточнений, что в свою очередь может существенно упростить подбор способов более глубокой обработки данных на этапах подтверждающего анализа.

Почему же в современном мире приходится менять подходы к обработке данных? Для ответа на данный вопрос обратимся к рис. 1, на котором схематически показана связь между развитием науки, технологий и человеческих потребностей. Как известно, фундаментальные научные исследования, с одной стороны, направлены на получение новых знаний, а с другой стороны, определяют тренды развития новых прикладных научных исследований, которые в свою очередь продиктованы потребностями промышленности и общества. Вместе с прикладными исследованиями развиваются технологии, при этом темпы их развития растут поступательно, но асинхронно с человеческими потребностями, и этот рост наблюдается в так называемых точках технологического прорыва, когда появляются принципиально новые технические решения. Именно в этих точках технологического прорыва наблюдается интенсивный рост объемов разнородной, разномасштабной информации, необходимой для обеспечения процессов инженерии возникающих новых систем.



**Рис. 1.** Динамика развития науки, технологий и человеческих потребностей

Появляются новые типы данных, к которым можно отнести, например, данные с измерительных устройств, события от радиочастотных идентификаторов, потоки сообщений из социальных сетей, данные дистанционного зондирования Земли, данные геолокации, текстовые корпуса, аудио- и видеопотоки и др. При этом источники этих данных, как правило, являются распределенными и разнородными и не всегда согласуются и синхронизируются между собой, а сами данные в большинстве случаев являются слабо формализуемыми и недостаточно структурированными для обработки традиционными методами.

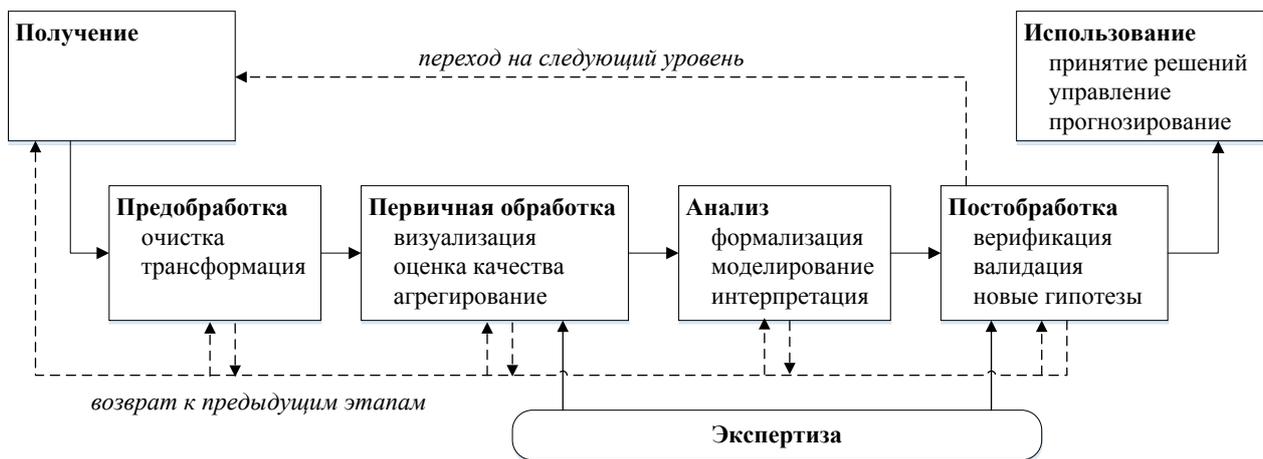
Кроме того, с развитием технологий наблюдается рост масштабности и разноплановости принимаемых решений по управлению новыми типами систем. При этом среди задач принятия решений начинают преобладать такие, которые не решаются с помощью традиционных математических методов, и в которых все большую роль начинает играть собственно процесс постановки задачи. Таким образом, возрастает роль в принятии решений человека как носителя целостного восприятия решаемой проблемы. Наконец, следует отметить увеличение числа междисциплинарных проектов, требующих участия специалистов из различных областей знаний, а также специалистов, способных обобщать знания из нескольких областей, формировать комплексные модели для их получения и использования.

С учетом сказанного, можно сделать вывод, что в настоящее время при решении задач сбора, анализа и интерпретации данных чаще всего приходится иметь дело с разнородностью и гетерогенностью как самих обрабатываемых данных, так и источников их получения. При этом получаемые и обрабатываемые данные не всегда согласуются и синхронизируются, а также носят междисциплинарный характер. Таким образом, для повышения качества и достоверности принимаемых решений технология анализа данных должна предоставлять следующие возможности:

- агрегирование разнородных данных, получаемых из множества источников, с обеспечением согласованности и непротиворечивости результатов агрегирования;
- отображение данных в максимально концентрированном виде, при этом без ущерба для их информативности, и наиболее удобным для восприятия способом;
- наличие механизмов интерпретации данных, поддерживающих интеллектуальный, творческий процесс поиска новых знаний и принятия решений на их основе, а также способствующих активизации использования интуиции и опыта специалистов (экспертов) в процессе принятия решений.

**Обработка и анализ гетерогенных данных мультисенсорных систем: общие принципы.** Системы, в которых происходит обработка данных, получаемых из гетерогенных источников, будем называть мультисенсорными системами [13], понимая под сенсором любой источник цифровой информации.

В работе [11] авторами была предложена схема работы с мультисенсорными данными (рис. 2), и было показано, что процесс анализа таких данных по своей конфигурации является инвариантным относительно уровня представления данных. Различаются только методы и алгоритмы реализации его этапов. При этом при переходе от уровня к уровню увеличивается степень структурированности данных (табл. 1).



**Рис. 2.** Схема работы с мультисенсорными данными на разных уровнях представления (источник: [11])

**Таблица 1.** Степень структурированности данных на разных уровнях их представления

Уровень представления данных	Степень структурированности данных
Уровень измерений	Неструктурированные
Концептуальный уровень	Слабо структурированные
Аналитический уровень (уровень моделей/гипотез)	Структурированные
Уровень знаний	Знания (результат обработки данных)

Таким образом, один из ключевых принципов, который должен быть положен в основу технологии обработки, анализа и интерпретации гетерогенных данных мультисенсорных систем – это многоуровневость и итерационность. Другими принципами, на которые следует опираться при реализации указанной технологии, являются распределенность, динамичность и когнитивность. Под распределенностью понимается распределенность как источников накопления данных, так и информационных и инструментальных ресурсов для их обработки и анализа. Принцип динамичности предполагает необходимость учета изменчивости состава и структуры источников данных, а также объектов, описываемых этими данными. При этом указанная изменчивость может проявляться с точки зрения не только времени, но и любых других параметров.

Отдельно следует сказать про принцип когнитивности. В соответствии с этим принципом, основным подходом к обработке данных, находящихся на начальных уровнях формализации (т.е. являющихся неструктурированными либо слабо структурированными), должен являться подход, позволяющий строить модели анализа и интерпретации, опирающиеся на интеллектуальные и когнитивные возможности исследователя и предполагающие их активное использование в данном процессе. Иными словами, модель анализа должна стать средством, позволяющим исследователю самостоятельно обнаруживать новые гипотезы, которые впоследствии будут проверяться с помощью более строгих математических методов.

С учетом перечисленных принципов, можно определить специальные требования к содержанию каждого этапа процесса анализа мультисенсорных данных, а также механизмы реализации данных этапов (табл. 2).

**Таблица 2.** Механизмы реализации этапов процесса анализа данных для разных уровней их представления

Этап процесса анализа данных	Уровень измерений	Концептуальный уровень	Аналитический уровень
Предобработка	Синхронизация; калибровка	Приведение в соответствие с требованиями модели	Устранение аномалий, группировка, фильтрация и т.п.
Первичная обработка	Визуализация многомерных данных	Построение и визуализация когнитивной карты	Подготовка данных к анализу, выбор методов и алгоритмов, обеспечение корректности их работы
Анализ	Визуальная аналитика	Структурно-целевой и сценарный анализ когнитивной карты	Статистический анализ; бизнес-аналитика; имитационное моделирование и др.
Постобработка	Снижение размерности; отбор признаков и факторов для дальнейшего анализа	Формирование и отбор гипотез для дальнейшего анализа	Представление и тиражирование знаний

Как видно из табл. 2, ключевую роль в реализации большинства этапов анализа данных играют методы визуализации, визуальной аналитики и когнитивного моделирования. Рассмотрим содержание этих методов и пути их применения подробнее.

**Проблематика визуализации и визуальной аналитики данных.** Скорость восприятия визуальной информации на порядки превышает скорость восприятия текстовой, а производительность человека, как показали исследования, работающего с визуальной информацией, на 17% выше производительности человека, работающего с текстовыми или цифровыми данными.

Визуализация имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами представления информации, такие как: возможность анализа больших объемов данных со сложной структурой, выделение трендов, паттернов поведения и зависимостей, возможность акцентирование на тех или иных аспектах данных.

Помимо классических паттернов визуализации, таких как, например, графики и диаграммы, на сегодняшний день разработано много паттернов визуализации, позволяющих продемонстрировать более сложные структуры данных. Например, различные карты (погодные или демонстрирующие территориальное распределение), таймлайны (демонстрация изменений или событий, происходящих во времени), различные сети (когнитивные карты, деревья и т.д.). Кроме того, активно разрабатываются различные методы визуализации больших данных. Так же перспективным направлением является визуализация больших и слабо формализованных данных в разных научных областях – от медицины до литературы. Активно разрабатываются различные методы визуализации многомерных данных (например, множественные срезы, множественные оси) [25].

Например, визуализация позволяет проводить анализ больших медицинских данных на новом уровне: например, визуализировать близость семейств генов различных видов [29] или жизненный цикл РНК-связывающих белков [26].

В процессе интеллектуального анализа данных до недавнего времени визуализация использовалась, в основном, только для формирования итогового отчета по результатам анализа. Однако, в настоящее время визуализация активно применяется на всех этапах работы с данными (рис. 3).

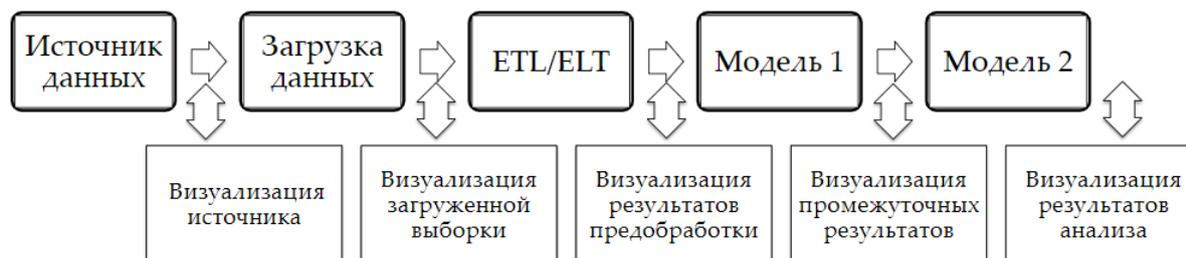


Рис. 3. Визуализация на различных этапах анализа данных

Кроме того, принято выделять следующие виды визуализации.

1. Визуализация информации: визуализация различных структур данных (графики, деревья и т.д.), когда требуется передать информацию визуально

2. Научная визуализация: визуализация данных, для которых характерна естественная геометрическая структура (например, данные магнитно-резонансной томографии, геологические данные и др.) – осуществляется с целью анализа и исследования информации.

3. Визуальная аналитика – объединение интерактивных визуальных представлений с базовыми аналитическими методами (например, методами статистического и интеллектуального анализа данных), с целью активизации и повышения эффективности когнитивных процессов исследователя (осмысление, рассуждение, принятие решений). В данном случае визуальная модель становится инструментом исследования и формулирования новых гипотез в процессе визуального анализа.

Для поддержки визуализации и визуальной аналитики в настоящее время существует множество программных средств, которые можно условно разделить на два класса: средства, поддерживающие весь цикл анализа и визуализации данных, и средства, поддерживающие только визуализацию данных.

К примерам программных средств, поддерживающих полный цикл подготовки, анализа и визуализации данных, относятся такие программные комплексы как Logiom, продукты Microsoft (Excel, Power BI), Google Data Studio, MATLAB, QlikView и др.

К программным продуктам, поддерживающим только визуализацию данных (рендеринг) можно отнести, например, Autodesk 3ds Max (ранее 3D Studio MAX).

Кроме того, существует немало библиотек, разработанных для языка JavaScript, для поддержки интерактивной и адаптивной визуализации в веб-браузере. Примерами таких библиотек могут служить: D3.js, FusionCharts и т.д. Также существуют различные онлайн-сервисы, предназначенные для визуализации данных, такие как Tableau Public, Google Charts, Datawrapper.

Проведенный анализ работ по визуальной аналитике показывает, что на сегодняшний день существует ряд решений, реализующих построение моделей данных на основе синтеза методов математического моделирования, визуализации и анализа данных для отдельных задач в конкретных предметных областях. Так, известны примеры применения визуальной аналитики в задачах вычислительной механики жидкости и газа, связанных, например, с выделением и трассировкой нестационарных структур (отрывных зон и разрывов) в течениях. Подробный обзор методов и подходов, применяемых для исследования процессов анализа и визуализации вихревых течений, приведен в работе [28]. Достаточно интересным является опыт применения визуальной аналитики для анализа и оптимизации параметров распределенных экспериментов области в физики высоких энергий и ядерной физики [7]. Обзор подходов к применению визуальной аналитики в проектировании программного обеспечения можно найти в работе [19].

Анализ и классификация современных методов визуализации многомерных данных приведены в работе [22].

**Актуальные проблемы визуализации.** В настоящее время отсутствует комплексная методология, позволяющая создавать универсальные, предметно-независимые визуальные модели данных, в том числе многомерных данных, получаемых из гетерогенных источников. Прогресс в области вычислительной техники позволяет достаточно эффективно проводить машинную предобработку данных такого рода. Однако, при визуализации обработанных данных возникает проблема, связанная с выбором из графического представления. Классические методы графического представления данных (столбчатые диаграммы, ящики с усами и т.п.), зачастую применяемые при визуализации, разработаны без учета особенностей и размера современных данных и не позволяют одновременно представить всю требуемую информацию в нужном объеме, тогда как применение подходов по снижению размерности приводит к потере части информации при ее графическом отображении и визуальном анализе.

Таким образом, несмотря на то, что визуализация является повсеместно инструментом обмена информации и анализа данных, остаются актуальными следующие вопросы: формализация и создание понятийного аппарата процесса визуализации, систематизация существующих подходов, развитие методов визуального представления визуального анализа, создание инструментов визуализации, в том числе как средства междисциплинарного взаимодействия. Последнее особо актуально, поскольку при решении практических задач необходимо взаимодействие специалистов из разных предметных областей, что требует организации взаимодействия между людьми, обобщения разных подходов, совмещения разного понятийного аппарата и т.п.

Решения, направленные на развитие новых подходов к визуализации и визуальной аналитике многомерных гетерогенных данных, в настоящее время создаются. Так в работах [12-14] предлагается комплексный подход к визуализации многомерных данных, когда на основе оригинального алгоритма построения визуальных моделей, в зависимости от решаемых аналитических задач, предлагается выбор метафоры визуализации многомерных гетерогенных данных. Созданы программные инструменты («Аналитический визуализатор данных», «Анализатор визуального представления»), технология когнитивной интерпретации гетерогенных данных. Следует отметить, что данное решение инвариантно относительно структуры и форм представления данных и позволяет совместно использовать

вычислительные и когнитивных ресурсы, кроме того обладает интерактивным интерфейсом для настройки отображения визуальной модели.

Описанный подход использовался при решении ряда задач [10, 12, 13], например:

- представление общей совокупности знаний в предметной области, содержащей экспериментальные сведения;
- реконструкция недостающих данных в описании объектов нефтедобывающей отрасли;
- визуализация экспериментальных медико-биологических данных и др.

Особо следует отметить эффективность применения инструментов визуальной аналитики при поиске новых гипотез.

Роль визуализации оказывается важной при фильтрации множества альтернатив в задачах многокритериального анализа решений, когда источником информации об альтернативах являются мультисенсорные системы. Например, в задачах планирования вычислительного эксперимента такая информация включает в себя параметры моделирования и результаты расчетов, и число альтернатив достигает нескольких сотен, а для их оценки используются десятки критериев. В этом случае, благодаря применению визуальной аналитики, фильтрацию альтернатив можно свести к сравнительному анализу их визуальных образов, т.е. визуальных представлений векторных критериальных оценок. Некоторые результаты применения данного подхода, а также созданный для решения этой задачи программный модуль «AlternativesVisualizer» описаны в работе [9].

**Когнитивный анализ и моделирование слабоструктурированных систем.** Одним из подходов к исследованию слабоструктурированных систем, широко применяемым в настоящее время, является когнитивный подход [1]. В соответствии с определением, приведенным в указанной статье, когнитивный подход ориентирован на разработку формальных моделей и методов, поддерживающих интеллектуальный процесс решения проблем благодаря учету в этих моделях и методах когнитивных возможностей (восприятие, представление, познание, понимание, объяснение) человека при решении управленческих задач. Методы структурно-целевого и имитационного моделирования систем на основе когнитивного подхода принято объединять под общим термином «когнитивное моделирование». В общем виде под когнитивным моделированием понимается исследование структуры системы и процессов ее функционирования и развития путем анализа ее когнитивной модели. В основе когнитивной модели системы лежит когнитивная карта, которая отражает субъективное представление исследователя о ней (индивидуальное или коллективное) в виде множества семантических категорий (называемых факторами или концептами) и набора причинно-следственных связей между ними.

Процесс когнитивного моделирования начинается с построения когнитивной карты исследуемой системы на основе имеющихся данных. На следующем этапе происходит непосредственно моделирование, основными целями которого являются формирование и проверка гипотез о структуре исследуемой системы, позволяющих объяснить ее поведение, а также выработка стратегий поведения в той или иной ситуации с целью достижения заданных целевых состояний.

Имеющийся положительный опыт применения когнитивного подхода для анализа и моделирования слабоструктурированных систем [2, 4, 5, 15, 18] позволяет говорить о

целесообразности его использования в целом для обработки, анализа и интерпретации слабоструктурированных многопараметрических данных.

Для успешной реализации когнитивного подхода для решения указанных выше задач, необходимо создание технологии, которая должна в себя включать:

1) методы и алгоритмы идентификации структуры и параметров когнитивной карты на основе комплексирования и совместного использования разнородных многопараметрических данных об исследуемой системе;

2) методы и алгоритмы структурно-целевого анализа, в задачи которых входит нахождение факторов, оказывающих наиболее значимое влияние на целевые, выявление противоречий между целями и т.д.;

3) методы и алгоритмы сценарного анализа, целью которого является прогнозирование состояния моделируемой системы при различных управляющих воздействиях, а также поиск альтернативных управляющих решений по приведению системы в целевое состояние;

4) методы и алгоритмы визуализации когнитивных моделей.

В качестве математического аппарата, применяемого для представления когнитивных моделей и лежащего в основе методов их анализа, чаще всего используется нечеткая логика. Благодаря этому возник целый класс когнитивных моделей, основанный на различных типах нечетких когнитивных карт (НКК) [6, 23, 24]. Наиболее распространенными типами НКК являются НКК Б. Коско, НКК В.Б. Силова, продукционные и реляционные НКК.

Среди программных средств поддержки когнитивного моделирования можно выделить ряд отечественных и зарубежных разработок, среди которых системы «Канва», «Ситуация», «Strice», «Mental Modeler», «FCMapper», «FCM Expert», «ИГЛА». Обзор этих и некоторых других систем можно найти в работе [17]. Здесь можно отметить, что за годы, прошедшие с момента публикации данной статьи, многие системы практически не получили дальнейшего развития, а некоторые системы наоборот продолжают активно развиваться. Примером такой системы является система «ИГЛА», которая позволяет строить нечеткие когнитивные модели, основанные на НКК Силова, выполнять их структурно-целевой и сценарный анализ, на основе чего осуществлять поиск и моделирование управляющих воздействий для приведения исследуемой системы в желаемое целевое состояние. Система «ИГЛА» была использована при решении ряда практических задач, например:

- анализ и моделирование стратегий управления инновационной деятельностью машиностроительного предприятия [8];
- анализ и моделирование стратегий управления научным потенциалом региона и прогнозирование региональной потребности в кадрах высшей научной квалификации [3];
- управление качеством в сварочном производстве [27];
- автоматизация трудноформализуемых этапов проектирования технологической оснастки [16];
- анализ и планирование программных проектов [20];
- анализ и моделирование стратегий управления комплексным развитием сельских территорий [21].

**Заключение.** Таким образом, можно отметить, что в современных условиях становится все более актуальным развитие средств визуализации и когнитивного моделирования (создание единого понятийного аппарата, унифицированное описание

методологий и т.п.). При этом возрастает потребность в разработке программно-инструментальных средств для развития «открытых» программных продуктов, и актуальным является развитие методик применения указанных средств с учетом специфики предметной области, где осуществляется анализ данных.

Актуальной задачей является исследование эргономических основ при создании интерфейсов с привлечением средств визуализации и средств визуальной аналитики для усиления когнитивного потенциала исследователя. В данном контексте также требуются формализация и развитие интеллектуальных средств визуального и когнитивного анализа (математический аппарат, алгоритмизация и реализация).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 18-11-00215.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) // Управление большими системами. 2007. Вып. 16. С. 26–39.
2. Авдеева З.К., Горелова Г.В., Коврига С.В., Панкратова Н.Д. Угрозы безопасности мегаполиса, когнитивное моделирование // Системные исследования и информационные технологии. 2014. № 4. С. 10–22.
3. Аверченков В.И., Кожухар В.М., Подвесовский А.Г., Сазонова А.С. Мониторинг и прогнозирование региональной потребности в специалистах высшей научной квалификации: монография. Брянск: БГТУ. 2010. 163 с.
4. Анохина М.Е. Моделирование стратегии управления экономическим ростом сельского хозяйства. Часть 1 // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2019. № 2. С. 23–34.
5. Анохина М.Е. Моделирование стратегии управления экономическим ростом сельского хозяйства. Часть 2 // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. 2019. № 3. С. 50–53.
6. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая линия – Телеком. 2012. 284 с.
7. Галкин Т.П., Григорьева М.А. и др. Применение методов визуальной аналитики для кластеризации и категоризации задач анализа и обработки данных экспериментов в области физики высоких энергий и ядерной физики // Научная визуализация. 2018. Т. 10. № 5. С. 32–44.
8. Ерохин Д.В., Лагерева Д.Г., Ларичева Е.А., Подвесовский А.Г. Стратегическое управление инновационной деятельностью предприятия: монография. Брянск: БГТУ. 2010. 196 с.
9. Захарова А.А., Коростелев Д.А., Федонин О.Н. Алгоритмы визуализации для фильтрации многокритериальных альтернатив // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 4. С. 66–80.
10. Захарова А.А., Пак А.Я., Шкляр А.В., Пак Т.А. Визуально-когнитивный анализ многомерных данных для характеристики металломатричных композитов AL/SiC // Светотехника. 2018. № 6. С. 58–65.

11. Захарова А.А., Подвесовский А.Г. Технология анализа слабоформализованных данных мультисенсорных систем с применением методов распределенной экспертизы // Труды Междунар. науч. конф. по физико-технической информатике СРТ2018. М.-Протвино: Изд-во ИФТИ. 2018. С. 221–229.
12. Захарова А.А., Шкляр А.В. Основные принципы построения визуальных моделей данных на примере интерактивных систем трехмерной визуализации // Научная визуализация. 2014. Т. 6. № 2. С. 62–73.
13. Захарова А.А., Шкляр А.В., Вехтер Е.В. Методика решения задач анализа данных при использовании аналитических визуальных моделей // Научная визуализация. 2017. Т. 9. № 4. С. 78–88.
14. Захарова А.А., Шкляр А.В. Метафоры визуализации // Научная визуализация. 2013. Т. 5. № 2. С. 16–24.
15. Кондрашина О.Н., Анохина М.Е. Использование нечетких когнитивных карт в оценке качества экономического роста отдельной отрасли // Экономика и предпринимательство. 2017. № 5-1. С. 896–899.
16. Копелиович Д.И., Подвесовский А.Г., Сафонов А.Л., Вилуха А.В., Исаев Р.А. Применение нечетких когнитивных моделей в автоматизации проектирования технологической оснастки // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 3. С. 20–35.
17. Кулинич А.А. Компьютерные системы моделирования когнитивных карт: подходы и методы // Проблемы управления. 2010. № 3. С. 2–16.
18. Мельник М.С., Орехов В.Д., Причина О.С. Моделирование тенденций и закономерностей трудовой деятельности в России: когнитивный подход // Проблемы экономики и юридической практики. 2018. № 3. С. 94–101.
19. Намиот Д.Е., Романов В.Ю. 3D визуализация архитектуры и метрик программного обеспечения // Научная визуализация. – 2018. – Т. 10. – № 5. – С. 123-139.
20. Подвесовский А.Г., Титарев Д.В., Исаев Р.А. Нечеткие когнитивные модели в задачах анализа и планирования программных проектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 8. – С. 22-31.
21. Подгорская С.В., Подвесовский А.Г., Исаев Р.А., Тарасов А.С., Бахматова Г.А. Моделирование сценарного развития сельских территорий на основе нечеткой когнитивной модели // Проблемы управления. 2019. № 5. С. 49–59.
22. Романова И.К. Современные методы визуализации многомерных данных: анализ, классификация, реализация, приложения в технических системах // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. № 3. С. 133–167.
23. Силов В.Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС. 1995. 228 с.
24. Groumpos P. Why Model Complex Dynamic Systems Using Fuzzy Cognitive Maps? // Robot Autom Eng J, 2017, Vol. 1(3): RAEJ.MS.ID.555563.
25. Dill J. et al. (Eds.) Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization // Springer-Verlag London Limited, 2012.
26. OrthoMCL DB: Ortholog Groups of Protein Sequences. Режим доступа: <https://orthomcl.org/orthomcl/> (дата обращения 10.11.2019)

27. Podvesovskii A.G., Gulakov K.V., Dergachyov K.V., Korostelyov D.A., Lagerev D.G. The choice of parameters of welding materials on the basis of fuzzy cognitive model with neural network identification of nonlinear dependence // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE Catalog Number: CFP1561Y-ART. Pp. 02-38-NSAP.
  28. Tricoche X., Garth C. Topological Methods for Visualizing Vortical Flows // Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration. Springer-Verlag. 2009. Pp.89–108.
  29. TriTryp DB: Kinetoplastid Genomic Resource. Режим доступа: <https://tritrypdb.org/tritrypdb/> (дата обращения 10.11.2019)
  30. Tukey J.W. The future of data analysis // Annals of Mathematical Statistics. 1962. Vol. 33. №1. Pp. 1–67.
- 

**UDK 004.62**

**VISUAL ANALYTICS AND COGNITIVE METHODS FOR PROCESSING  
AND ANALYSIS OF HETEROGENEOUS DATA IN MULTI-SENSOR  
SYSTEMS: ISSUES AND TRENDS**

**Alena A. Zakharova**

Dr. Tech. Sc., Senior Researcher

Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences  
4, Miusskaya square, 125047, Moscow, Russia,

Professor of Informatics and Software Engineering Department

Bryansk State Technical University

7, 50 let Oktyabrya blvd., 241035, Bryansk, Russia, e-mail: [zaa@tu-bryansk.ru](mailto:zaa@tu-bryansk.ru)

ORCID: 0000-0003-4221-7710

**Aleksandr G. Podvesovskii**

Cand. Tech. Sc., Associate Professor

Head of Informatics and Software Engineering Department

К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информатика и программное обеспечение»

Bryansk State Technical University

7, 50 let Oktyabrya blvd., 241035, Bryansk, Russia, e-mail: [apodv@tu-bryansk.ru](mailto:apodv@tu-bryansk.ru)

ORCID: 0000-0002-1118-3266

**Dmitrii G. Lagerev**

Cand. Tech. Sc., Associate Professor of Informatics and Software Engineering Department

Bryansk State Technical University

7, 50 let Oktyabrya blvd., 241035, Bryansk, Russia, e-mail: [lagerevdg@tu-bryansk.ru](mailto:lagerevdg@tu-bryansk.ru)

ORCID: 0000-0002-2702-6492

**Abstract.** The article deals with problem of heterogeneous multivariate data analysis in multi-sensor systems. The structure of data analysis process in various levels of their representation is described, and the role of visual analytics and cognitive modeling as a basis for its realization is discussed. A review of present methods of visual analytics and

cognitive modeling is provided, and the actual lines of development of these approaches are specified.

**Keywords:** data analysis, heterogeneous data, multi-sensor systems, visualization, visual analytics, cognitive modeling.

### References

1. Avdeeva Z.K., Kovriga S.V., Makarenko D.I. Kognitivnoe modelirovanie dlja reshenija zadach upravlenija slabostrukturirovannymi sistemami (situacijami) [Cognitive Modeling for Solving Problems of Control of Semi-structured Systems (Situations)] // Upravlenie bol'shimi sistemami = Large Systems Control. 2007. Issue 16. Pp. 26–39. (in Russian)
2. Avdeeva Z.K., Gorelova G.V., Kovriga S.V., Pankratova N.D. Ugrozy bezopasnosti megapolisa, kognitivnoe modelirovanie [Security Threats of a Megacity] // Sistemnye issledovaniya i informacionnye tehnologii = System Researches and Information Technologies. 2014. no. 4. Pp. 10–22. (in Russian)
3. Averchenkov V.I., Kozhukhar V.M., Podvesovskii A.G., Sazonova A.S. Monitoring i prognozirovanie regional'noj potrebnosti v specialistah vysshej nauchnoj kvalifikacii [Monitoring and Forecasting of Regional Demand for Specialists of the Higher Scientific Qualification]: monograph. Bryansk: Bryansk State Technical University. 2010. 163 p. (in Russian)
4. Anokhina M.E. Modelirovanie strategii upravlenija jekonomicheskim rostom sel'skogo hozjajstva [Modeling Strategy for Management of Economic Growth of Agriculture]. Part 1 // Jekonomika sel'skohozjajstvennyh i pererabatyvajushhih predpriyatij = Economy of agricultural and processing enterprises. 2019. no. 2. Pp. 23–34. (in Russian).
5. Anokhina M.E. Modelirovanie strategii upravlenija jekonomicheskim rostom sel'skogo hozjajstva [Modeling Strategy for Management of Economic Growth of Agriculture]. Part 2 // Jekonomika sel'skohozjajstvennyh i pererabatyvajushhih predpriyatij = Economy of agricultural and processing enterprises. 2019. no. 3. Pp. 50-53. (in Russian)
6. Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S. Nechetkie modeli i seti [Fuzzy Models and Networks]. Moscow. Goryachaya Liniya – Telekom = Hot Line – Telecom. 2012. 284 p. (in Russian)
7. Galkin T.P., Grigoryeva M.A. (et al.) Primeneniye metodov vizual'noy analitiki dlya klasterizatsii i kategorizatsii zadach analiza i obrabotki dannykh eksperimentov v oblasti fiziki vysokikh energiy i yadernoy fiziki [An Application of Visual Analytics Methods to Cluster and Categorize Data Processing Jobs in High Energy and Nuclear Physics Experiments] // Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization. 2018. Vol. 10 (5). Pp. 32–44. (in Russian)
8. Erokhin D.V., Lagerev D.G., Laricheva E.A., Podvesovskii A.G. Strategicheskoe upravlenie innovacionnoj dejatel'nost'ju predpriyatija [Strategic Management of Innovation Activity of Enterprise]: monograph. Bryansk: Bryansk State Technical University. 2010. 196 p. (in Russian)
9. Zakharova A.A., Korostelyov D.A., Fedonin O.N. Algoritmy vizualizatsii dlya fil'tratsii mnogokriterial'nykh al'ternativ [Visualization Algorithms for Multi-criteria Alternatives

- Filtering] // Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization. 2019. Vol. 11 (4). Pp. 66-80. (in Russian)
10. Zakahrova A.A., Pak A. Ya., Shklyar A.V., Pak T.A. Vizual'no-kognitivnyj analiz mnogomernyh dannyh dlja harakteristiki metallo-matrichnyh kompozitov [Visual and Cognitive Analysis of Multidimensional Data for Description of Metal Matrix Composites AL/SIC] // Svetotekhnika = Light & Engineering. 2018. no 6. Pp. 58–65. (in Russian)
  11. Zakahrova A.A., Podvesovskii A.G. Tehnologija analiza slaboformalizovannyh dannyh mul'tisensornyh sistem s primeneniem metodov raspredelennoj jekspertizy [Technology for Analysis of Ill-formalized Data in Multi-sensor Systems with Application of Distributed Expertise Methods] // Trudy Mezhdunar. nauch. konf. po fiziko-tehnicheskoi informatike CPT2018 = Proceedings of International Scientific Conference on Computing for Physics and Technology CPT2018. Moscow-Protvino. Institute of Computing for Physics and Technology. 2018. Pp. 221–229 (in Russian).
  12. Zakharova A.A., Shklyar A.V. Osnovnye principy postroeniya vizual'nyh modelej dannyh na primere interaktivnyh sistem trehmerno vizualizacii [Basic Principles of Data Visual Models Construction, by the Example of Interactive Systems for 3D Visualization] // Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization. 2014. Vol. 6 (2). Pp. 62–73. (in Russian)
  13. Zakharova A.A., Vekhter E.V., Shklyar A.V. Metodika reshenija zadach analiza dannyh pri ispol'zovanii analiticheskikh vizual'nyh modelej [Methods of Solving Problems of Data Analysis Using Analytical Visual Models] // Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization. 2017. Vol. 9 (4). Pp. 78-88 (in Russian).
  14. Zakharova A.A., Shklyar A.V. Metafory vizualizacii [Visualization Metaphors] // Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization. 2013. Vol. 5 (2). Pp. 16–24. (in Russian)
  15. Kondrashina O.N., Anokhina M.E. Ispol'zovanie nechetkih kognitivnyh kart v ocenke kachestva jekonomicheskogo rosta otdel'noj otrasli [Using of Fuzzy Cognitive Maps in Quality Assessment of Economic Growth of Separate Sector] // Jekonomika i predprinimatel'stvo = Journal of Economy and entrepreneurship. 2017. no. 5-1. Pp. 896–899. (in Russian)
  16. Kopeliovich D.I., Podvesovskii A.G., Safonov A.L., Vilyukha A.V., Isaev R.A. Primenenie nechetkih kognitivnyh modelej v avtomatizacii proektirovaniya tekhnologicheskoi osnastki [Application of Fuzzy Cognitive Models in Computer-Aided Production Tooling Design] // Vestnik komp'yuternyh i informacionnyh tekhnologij = Herald of Computer and Information Technologies. 2018. no. 3. Pp. 20–35. (in Russian)
  17. Kulinich A.A. Komp'yuternyye sistemy modelirovaniya kognitivnykh kart: podkhody i metody [Computer systems for cognitive maps simulation: Approaches and methods] // Problemy upravleniya = Automation and Remote Control. 2012. Vol 73 (9). Pp. 1553–1571. (in Russian)
  18. Mel'nik M.S., Orekhov V.D., Prichina O.S. Modelirovanie tendencij i zakonomernostej trudovoj dejatel'nosti v Rossii: kognitivnyj podhod [Simulation of Trends and Legislation of Labor Activities in Russia: Cognitive Approach] // Problemy jekonomiki i juridicheskoi praktiki = Economic problems and legal practice. 2018. no. 3. Pp. 94–101. (in Russian)

19. Namiot D.E., Romanov V.Yu. 3D vizualizatsiya arkhitektury i metrik programmno obespecheniya [3D visualization of architecture and software metrics] // Nauchnaya vizualizatsiya = Scientific Visualization. 2018. T. 10. № 5. Pp. 123–139. (in Russian)
20. Podvesovsky A.G., Titarev D.V., Isaev R.A. Nechetkiye kognitivnyye modeli v zadachakh analiza i planirovaniya programmnykh proyektov [Fuzzy cognitive models in the problems of analysis and planning of software projects] // Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy = Herald of Computer and Information Technologies. 2019. № 8. Pp. 22–31. (in Russian)
21. Podgorskaya S.V., Podvesovsky A.G., Isaev R.A., Tarasov A.S., Bakhmatova G.A. Modelirovaniye stsenarnogo razvitiya sel'skikh territoriy na osnove nechetkoy kognitivnoy modeli [Modeling the scenario development of rural areas based on a fuzzy cognitive model] // Problemy upravleniya = Automation and Remote Control. 2019. № 5. Pp. 49–59. (in Russian)
22. Romanova I.K. Sovremennyye metody vizualizatsii mnogomernykh dannykh: analiz, klassifikatsiya, realizatsiya, prilozheniya v tekhnicheskikh sistemakh [Modern methods of visualization of multidimensional data: analysis, classification, implementation, applications in technical systems] // Nauka i obrazovaniye: nauchnoye izdaniye MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of Bauman MSTU. 2016. № 3. Pp. 133–167. (in Russian)
23. Silov V.B. Prinyatiye strategicheskikh resheniy v nechetkoy obstanovke [Making strategic decisions in a fuzzy environment]. Moscow. INPRO-RES = Publishing house "INPRO-RES". 1995. 228 p. (in Russian)
24. Groumpos P. Why Model Complex Dynamic Systems Using Fuzzy Cognitive Maps? // Robot Autom Eng J, 2017, Vol. 1(3): RAEJ.MS.ID.555563.
25. Dill J. et al. (Eds.) Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization // Springer-Verlag London Limited, 2012.
26. OrthoMCL DB: Ortholog Groups of Protein Sequences. Available at: <https://orthomcl.org/orthomcl/> (accessed 10.11.2019)
27. Podvesovskii A.G., Gulakov K.V., Dergachyov K.V., Korostelyov D.A., Lagerev D.G. The choice of parameters of welding materials on the basis of fuzzy cognitive model with neural network identification of nonlinear dependence // Proceedings of 2015 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). IEEE Catalog Number: CFP1561Y-ART. Pp. 02-38-NSAP.
28. Tricoche X., Garth C. Topological Methods for Visualizing Vortical Flows // Mathematical Foundations of Scientific Visualization, Computer Graphics, and Massive Data Exploration. Springer-Verlag. 2009. Pp.89–108.
29. TriTryp DB: Kinetoplastid Gemomic Resource. Available at: <https://tritrypdb.org/tritrypdb/> (accessed 10.11.2019)
30. Tukey J.W. The future of data analysis // Annals of Mathematical Statistics. 1962. Vol. 33. № 1. Pp. 1–67.

## МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ОЦЕНОЧНЫХ КАРТ ОПАСНОСТИ КРИЗИСНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ КАРТОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

**Черкашин Александр Константинович**

Д.г.н., профессор,

зав. лабораторией теоретической географии, e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Красноштанова Наталья Евгеньевна**

К.г.н., н.с., e-mail: [kne1988@rambler.ru](mailto:kne1988@rambler.ru)

Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 664033 г. Иркутск, ул. Улан-Баторская 1

**Аннотация.** С использованием векторной модели представления данных обоснована возможность расчета оценочных функций по интегральным показателям состояния систем и реализованы процедуры ГИС-технологии оценивания и картографирования опасных кризисных ситуаций. Особенностью предлагаемой методики является комплексный учет разнородной природной и социально-экономической информации о районе исследования и введение средовой поправки для каждого местоположения. В качестве оценочных критериев применяются соотношения теории надёжности как функций разности характеристик состояния территориальных объектов и их среды. Индексы состояния и среды рассчитываются методом главных компонент по показателям, автоматически послойно снятым с векторных карт по регулярной сетке точек. Территориальная оценка и картографирование опасности возникновения кризисных ситуаций выполнена на примере территории Слюдянского района Иркутской области.

**Ключевые слова:** векторная модель, ГИС-технология, кризисная природно-экономическая ситуация, оценочные карты, географическая среда.

**Цитирование:** Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Методика создания оценочных карт опасности кризисных ситуаций на основе картографической информации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 75–88. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-06

**Введение.** Одна из центральных проблем системного анализа – решение задач оценивания ситуаций по разным показателям, функциям и функционалам с целью выбора оптимального варианта действия. Часто такие задачи связаны со сравнительной оценкой процессов и явлений в неоднородной среде, изменяющейся по временным и пространственным параметрам. В географии есть специальное направление создания тематических оценочных карт интегрального содержания, объединяющих пространственную информацию карт комплексных атласов территорий путем статистической свертки информации баз данных с последующей ее трансформацией в соответствии с целевой функцией оценивания [6, 7]. Интегральные карты дают представление о потенциальных свойствах участков территории для комфортного проживания и эффективной хозяйственной деятельности населения, использования ресурсов разными отраслями хозяйства. В них должны учитываться особенности географического положения и весь спектр природных и

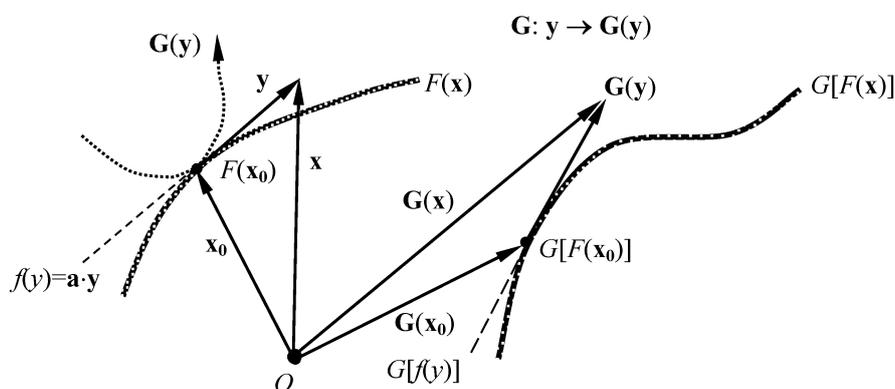
социально-экономических факторов, влияющих на территориальное развитие. Территория характеризуется статистическими показателями состояния природных или природно-экономических систем и условиями географической среды жизнедеятельности.

За рубежом такие работы проводятся по технологии картографирования окружающей среды (КОС) с использованием ГИС и Интернета [16]. КОС включает обработку и визуализацию пространственной информации об экологической среде. В КОС при определении направлений исследования и интерпретации полученных результатов участвуют разные специалисты. На первом этапе выделяются показатели состояния окружающей среды, которые необходимо картографировать в соответствии с решаемой хозяйственной или общественной проблемой. Оптимально, если для КОС собираются данные, которые могут быть использованы для экспертизы различных проектов.

Геоинформационные технологии оценочного картографирования представлены традиционными этапами информационного поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, отображения и распространения пространственных данных и знаний. Наиболее важным ее этапом становится производство новой информации через обработку имеющихся сведений с использованием адекватных вычислительных алгоритмов, которые основываются на математических технологиях, т.е. логистических процессах в виде последовательности действий по преобразованию исходных данных и понятий с применением различных математических средств, методов и ограничительных гипотез в конечный результат, удовлетворяющий содержательной постановке проблемы.

В данной статье разрабатываются и реализуются алгоритмы оценочного геоинформационного картографирования опасности возникновения кризисных ситуаций на основе математических процедур формирования векторных пространств и полей.

**1. Векторная модель.** Термины «векторные пространства» и «векторные поля» широко используются в современной науке для формализации связей в основном в физической науке, что привело к «геометризации» физической теории и позволило математически распространить эти понятия на пространства разной размерности и различных свойств. В информатике векторная модель представлена векторами коллекции документов из общего векторного пространства термов для решения задач информационного поиска. Модель сопоставляет каждому документу частотный спектр слов и соответствующий вектор в лексическом пространстве; по близости векторов определяются релевантные документы [22]. Такая векторная модель применима в различных приложениях.



**Рис. 1.** Векторная модель представления данных в исходной  $F(x)$  и преобразованной операцией  $G:y \rightarrow G(y)$  форме  $G[F(x)]$  (пояснения в тексте)

Рассматривается многомерное пространство  $X \subset \mathbb{R}^n$  координат  $\mathbf{x}_i$ , каждая точка которого характеризуется радиус-вектором  $\mathbf{x} = \{\mathbf{x}_i\}$ ,  $i=1,2,\dots,n$  с компонентами  $\mathbf{x}_i = x_i \mathbf{e}_i$ , исходящего из начала координат  $O$  (Рис.1). Здесь  $\mathbf{e} = \{\mathbf{e}_i\}$  - векторный базис пространства  $X$ ,  $x = \{x_i\}$  – координаты вектора  $\mathbf{x}$ . Вектор  $\mathbf{x}$  параметризует объект, а вектор  $\mathbf{x}_0 = \{\mathbf{x}_{0i}\}$  – среду объекта. Разность векторов равна вектору  $\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$  с компонентами  $y_i = x_i - x_{0i}$ . Точка  $x_0$  соответствует началу, а точка  $x$  – концу вектора  $\mathbf{y}$ . Множество векторов  $\mathbf{y}$  определяет векторное поле, в котором все координаты точек  $\mathbf{x}$  рассматриваются относительно координат  $\mathbf{x}_0$  в системе отношений состояния объекта  $\mathbf{x}$  и его среды  $\mathbf{x}_0$ . Пространство  $X \subset \mathbb{R}^n$ , в каждой точке  $\mathbf{x}_0$  которого заданы векторы  $\mathbf{y}$ , называется векторным линейным пространством. Векторы  $\mathbf{y}$  связаны с локальной системой координат  $y = \{y_i\}$  с началом в точке  $\mathbf{x}_0$ .

Векторная модель в такой формулировке достаточно формальна, и требуется ввести естественные ограничения на изменчивость  $\mathbf{y}$ , чтобы получить содержательные выводы и предложить методы анализа данных. Будем основываться на принципе Гаусса наименьшего принуждения (отклонения) [8], согласно которому для любых истинных движений мера отклонения от свободного движения минимальна:  $S(\mathbf{y}) = \sum_i m_i y_i^2 \rightarrow 0$ ,  $y_i = x_i - x_{0i}$ , где  $x = \{x_i\}$ ,

$x_0 = \{x_{0i}\}$  — характеристики истинного и свободного движения;  $y = \{y_i\}$  — мера принуждения;  $m = \{m_i\}$  — весовые коэффициенты (массы). Вектор принуждения  $\mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$  отражает последствия влияния местных сил на поведение системы. Свободным считается средообусловленное движение  $\mathbf{x}_0$  без дополнительных нагрузок. Минимум  $S(\mathbf{y})$  при постоянных  $m_i$  достигается при  $\frac{\partial S}{\partial y_i} = 2m_i y_i = 0$  и обеспечивается в средообусловленном состоянии  $x_i = x_{0i}$  по всем  $x_i$ .

Дополнительно будем считать, что все средовые точки (начала векторов)  $\mathbf{x}_0$  соответствуют поверхности  $M$ , заданной функцией  $F(x)$  (см. Рис.1). Начало вектора  $\mathbf{y}$  находится на средовой поверхности  $M$  в точке  $F(x_0)$ , а сам вектор размещается в (гипер)плоскости, которая локально описывается общим уравнением:

$$\Phi(x) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} + b, f(y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} = \sum_i a_i y_i, \mathbf{y} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

где  $f(y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}$  – скалярное произведение двух векторов  $\mathbf{y} = \{y_i\}$  и  $\mathbf{a} = \{a_i\}$ ;  $b = \Phi(x_0) = F(x_0)$  – константа. Следуя принципу Гаусса, потребуем, чтобы функция  $\Phi(x)$  минимально отклонялась от функции состояния среды  $F(x)$ :

$$S(\mathbf{y}) = [F(x) - \Phi(x)]^2 = [F(x) - \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} - F(x_0)]^2 = [f(y) - \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}]^2 \rightarrow 0. \quad (2)$$

Этот критерий для всех  $x_i$  и  $y_i$  достигается при

$$\frac{\partial S(\mathbf{y})}{\partial y_i} = \frac{\partial S(x - x_0)}{\partial x_i} = 2 \left[ \frac{\partial F(x)}{\partial x_i} - a_i \right] [f(y) - \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}] = 0, \frac{\partial F(x)}{\partial x_i} = \frac{\partial f(y)}{\partial y_i},$$

т.е. при условии  $f(y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y}$  и/или  $a_i = \frac{\partial F}{\partial x_i}$ . Это означает, что  $f(y)$  описывает касательную

плоскость к точке  $F(x_0) \in M$ , которая максимально приближена к функции  $F(x)$  в окрестности этой точки. Локальное сходство поверхности  $M$  и функции  $F(x)$  с линейной функцией  $f(y)$  линейного касательного пространства позволяет считать  $M$  многообразием. Векторы  $\mathbf{y}$  лежат в касательной (гипер)плоскости  $f(y)$ , образуя пучок векторов с центром  $F(x_0)$ . Все векторы в

окрестности каждой точки  $x_0$  удовлетворяют уравнению векторного поля касательного пространства (расслоения)

$$f(y) = \mathbf{a} \cdot \mathbf{y} = \sum_i \frac{\partial f}{\partial y_i} y_i, f(y) = F(x) - F(x_0) . \quad (3)$$

Соотношение (3) – универсальное уравнение, не имеющее ни одного неизвестного коэффициента; они появляются в процессе его решения. Это уравнение Эйлера для однородных функций первого порядка  $f(ky)=kf(y)$ , величина которых зависит от масштаба  $k$  переменных. Оно справедливо для любой аналитической функции  $F(x)$  многообразия, т.е. соответствует оператору преобразования информации в касательном слое. Если  $y_i$  рассматривать как переменные значения координат, то (3) - уравнение (гипер)плоскости. При бесконечно малом значении  $y \rightarrow dy$  уравнение (3) является формулой полного дифференциала. Также (3) можно считать операцией преобразования координат, компонентов вектора или свертки информации  $y \rightarrow f(y)$ . Так, например, поступают при реализации метода главных компонент МГК [20], переходя от исходных переменных  $y = \{y_i\}$  к системе независимых переменных  $f(y) = \{f_i(y)\}$  – главных компонент. МГК используется в разных областях науки для минимизации размерности массива данных, сжатия информации, решения задач классификации, количественного анализа локальной связности. В частности, МГК применяется при обработке растровых дистанционных мультиспектральных данных для типизации земель и картографирования [21]. Первая главная компонента  $z_1 = f_1(y)$  учитывает основную вариацию данных и характеризует состояние системы  $\mathbf{x}$ , а вторая компонента  $z_2 = f_2(y)$  принимает во внимание остаточную дисперсию и отражает состояние среды  $\mathbf{x}_0$ . В качестве  $y$  используются центрированные и нормированные значения исходных данных  $\mathbf{x}$ .

Функция  $f(y)$  также соответствует мере финслерова пространства [23], выражающей своеобразное расстояние между точками  $\mathbf{x}$  и  $\mathbf{x}_0$ , например, евклидовой мерой  $f(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}$ .

В финслеровой геометрии рассматриваются многообразия с финслеровой метрикой  $f(y)$  - нормы, заданной на каждом касательном пространстве  $f(y)$  и которая гладко меняется от точки к точке  $y$ . В этой геометрии автоматически выполняется принцип относительности переменных и функций относительно средовых характеристик  $x_0$  и  $F(x_0)$ . При разработке методов оценки сначала желательно рассчитать интегральные показатели  $f(y)$  на основе набора (вектора) координатных характеристик  $y = \{y_i\}$ , а затем вычислять разные оценочные функции  $G(y)$  типа функции кривой Гаусса  $G(y) = \alpha \exp[-\beta f^2(y)]$ .

Трансформация векторного поля  $\mathbf{G}: y \rightarrow \mathbf{G}(y)$  (Рис. 1) рассматривается как замена переменных с целью упрощения задачи или получения новых информативных показателей для оценочных расчетов. В геометрических терминах она соответствует подбору подходящих диффеоморфизмов преобразования векторного поля или поля направлений [1]. Они выражаются в действии гладких отображений  $\mathbf{G}$  векторов  $y$  одной области линейного пространства в другую:  $\mathbf{G}(y) = \{g_i(y)\}$  – функции преобразования координат  $y$ . Вектор векторного поля  $\mathbf{G}(y)$  на многообразии  $F(x)$  является изгибанием стрелки вектора  $y$ , касательного к  $F(x)$ . Многообразие  $F(x)$  в каждой точке  $\mathbf{x}_0$  преобразуется в многообразие  $G[F(x)]$ . В итоге над каждой точкой  $\mathbf{x}_0$  и соответствующим касательным слоем  $f(y)$  многообразия надстраиваются соответствующие структуры и функции  $G[F(x)] = G[f(y)]$ .

В локальной области  $y$  выполняются следующие преобразования

$$G[F(x)] = G[f(y)] = \sum_i \frac{\partial G[f(y)]}{\partial y_i} y_i = \sum_i \frac{\partial G[f(y)]}{\partial f} \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} y_i = \sum_i \frac{\partial G[f(y)]}{\partial f} a_i y_i = \frac{\partial G[f(y)]}{\partial f} \sum_i \frac{\partial f(y)}{\partial y_i} y_i = \frac{\partial G[f(y)]}{\partial f} f(y), \quad (4)$$

устанавливающее зависимость  $G[f(y)]$  от  $z = f(y)$  в каждом слое. Следовательно, при вычислении разных оценочных функций  $G(z)$  может быть использована одна и та же интегральная величина  $z$ , при расчете которой исключаются условия среды. Вычисления осуществляются как бы в «чистом виде» одинаково по единому уравнению для разных местоположений в локальной системе координат  $y$ , что необходимо для унификации интегрально-оценочного картографирования с учетом особенностей местности. Оценка проводится по базе данных, содержащих пространственную информацию из различных источников.

**2. Методика расчетов.** Любое опасное явление географически обусловлено, т.е. зависит от момента, места происшествя и сложившихся обстоятельств [17]. Опасность характеризует общую для всех объектов среду формирования рисков существования и развития различных природных, технических и социально-экономических систем. Одной из форм проявления экономической опасности в обществе являются различные кризисные ситуации (КС), которые возникают при погружении объектов в опасную среду, характеризуемую факторами и условиями ее влияния. При этом не всякое событие считается кризисным, а только то, которое выходит за рамки допустимого состояния системы, ее пороговых значений [2].

Оценка опасности возникновения КС напрямую связана с определением меры неопределенности деятельности, которая связана с функциями распределения вероятности, расчетом возможности и надежности процессов, точности и истинности знаний, деформацией явлений, соотношением величин, т.е. разных научных интерпретаций обычно неубывающих ценностных функций со значениями на интервале  $[0, 1]$ . Это также связано со степенью доверия и мерой ответственности в процессе принятия решений и оценки эффективности.

Оценка осуществляется на границе случайности и необходимости событий с использованием разных подходов. Моделирование нечеткости и неопределенности, в частности, реализуется не вероятностными методами, а с использованием теории возможностей, которая позволяет математически моделировать реальность на основе опытных фактов, знаний, гипотез и суждений [3, 11]. В теории возможности могут использоваться такие же относительные переменные и функции, что и в теории вероятности и надежности, но без вероятностной интерпретации переменных, подобно тому, как это, например, применяется в теории упругости и выражается в понятиях напряжения, абсолютной и относительной деформации [13].

В качестве оценочных функций опасности КС естественно и удобно использовать уравнения теории надежности [15, 18]:  $E(z) = -\ln P^*(z)$ , где  $P^*(z)$  – функция надежности (безопасности, обеспеченности, устойчивости функционирования), вероятность безотказной работы системы до достижения состояния  $z$ ;  $E(z) = -\ln P^*(z)$  – вероятность не достигнуть состояния  $z$  (интегрированная опасность).

В качестве показателя  $1 \geq P^*(z) \geq 0$  можно использовать любое индексное соотношение теории возможностей вида  $P^*(z) = \Phi/\Phi_0$  при условии  $\Phi_0 \geq \Phi \geq 0$ . Затем рассчитывается интегрированная опасность  $E(z) = -\ln P^*(z) = \ln \Phi_0 - \ln \Phi$ . Величина  $E(z)$  как вероятностная переменная не может превосходить единичного значения, поэтому условие  $E(z) \leq E_p = 1$  задает пороговые значения по всем сравниваемым параметрам, а именно,  $\ln \Phi_0 - \ln \Phi_p = 1$ , откуда  $\Phi_p = \Phi_0/e = 0,368\Phi_0$ , т.е. допустимые отклонения  $\Phi$  от  $\Phi_0$  составят  $\Delta\Phi_0 = 0,632\Phi_0$  от индивидуальной нормы  $\Phi_0$ .

Для аппроксимации  $P^*(z)$  в данном случае оправданно использовать функцию Гомпертца [14]  $P^*(z) = \exp\{-\exp(kz)\}$ , для которой функция интегрированной опасности

$$E(z) = -\ln P^*(z) = \exp(kz) = \Phi/\Phi_0, \quad (5)$$

где  $k$  – постоянный коэффициент. Будем полагать, что лучшие по качественным характеристикам системы имеют большее значение  $z=f(y)$  (финслеровой метрики), т.е. более удалены от критического значения  $y=0$ , обладают меньшей опасностью и большей надежностью функционирования.

При использовании уравнения Гомпертца все варианты функций надежности зависят от безразмерной величины  $E(z)$ , например,  $P^*(z) = \exp[-E(z)]$  (функция надежности),

$$P(z) = \frac{dP^*(z)}{dz} = -kE(z) \exp\{-E(z)\} \quad (\text{плотность отказов, при } k < 0),$$

$$p(z) = P(z)/P^*(z) = \frac{dE(z)}{dz} = kE(z) \quad (\text{интенсивность отказов, риск}).$$

В финансово-экономической сфере величина  $p(z)$  соразмерна ставке рефинансирования, инфляции или показателям амортизации оборудования, а в экологических системах связана с интенсивностью убыли популяций за счет гибели и миграции организмов.

Через функцию  $E(z)$  рассчитываются разные функционалы, интегрирующие свойства функции  $G(z)$  по переменным  $z$ . На основе функции опасности  $E(z)$  для разных систем и разных наборов входных данных  $x$  можно вычислять сопоставимые функциональные оценки и генерировать сравнительные оценочные карты.

**3. Постановка задачи и алгоритм решения.** Технологическая схема картографических работ хорошо представлена и реализована на примере агроландшафтного картографирования [10]. Традиционно ГИС-технология создания карт и реализации ГИС-проектов включает [4] ввод исходных данных, создание базы данных, визуализацию данных, контроль качества информации, обработку данных (пространственный анализ и моделирование), визуализацию результатов обработки с редактированием и оформлением карт. Важнейшим в ГИС-технологии является блок-этап преобразования информации, от содержания которого зависит качество итогового геоинформационного продукта. Используемые на этом этапе средства и методы пространственного системного анализа определяют новизну и эффективность картографирования, поскольку полностью сформированная база пространственных данных – это инвариантная основа решения разных географических задач, когда результат зависит от теоретических и математических моделей интерпретации данных и соответствующих методов и процедур их преобразования. На первичной базе данных выстраиваются циклы производства информации, включающие процедуры количественного анализа данных и карт.

Кризисные экономические ситуации проявляются под влиянием различных дестабилизирующих факторов [9], в том числе отрицательных изменениях в воспроизводственных процессах экономики, социальной сферы и деградации природной среды региона, угрожающих качеству жизни населения, политической стабильности общества и жизнеспособности хозяйства региона и страны в целом. Для управления кризисными ситуациями и выхода из них необходимо объективное картографическое отображение КС. Для этого разрабатывается ГИС-технология создания оценочных карт опасности возникновения КС, которая представляет собой последовательность действий от сбора и преобразования исходной информации до картографического представления результатов искомым функций (рис. 2).



Рис. 2. Формирование базы пространственных данных и последовательность обработки информации для создания оценочных карт возникновения кризисных ситуаций.

На первом этапе формируется база пространственных данных о природе и социально-экономических объектах региона исследования. Здесь важно разнородную природную и социально-экономическую информацию свести в единую информационную систему. Для этого формируется регулярная сеть точек с шагом, позволяющим покрыть все разнообразие природных и социально-экономических выделов территории. На основе этой сетки формируется база данных содержащая информацию по каждой точке о состоянии природной

и социально-экономической среды. Для дальнейшего математического анализа и преобразования важно проверить исходные данные на коррелированность и выбрать из группы линейно зависимых показателей только один показатель. Следующий этап представлен процедурами математического анализа данных и расчетов требуемых функций, зависящих от целей исследовательского процесса с последующим выведением полученных результатов на карту. Полученные для каждой точки регулярной сетки значения функций группируются по градациям величин, позволяя получать на итоговых картах ареалы с различными природно-экономическими ситуациями.

**4. Объект и методы исследования.** Предлагаемая ГИС-технология создания оценочных карт опасности возникновения КС была апробирована для территории Слюдянского района Иркутской области. Исходный картографический материал для создания БД взят из Атласа района [12] и дополнен обновленной статистической информацией. БД формировалась с помощью программы ArcGis 9.3. Элемент информации - пиксел GRID-файла, соответствующий квадрату со стороной около 450 метров. По регулярной сетке точек (21835 шт.), соотнесенных с пикселями GRID-файла, для каждой точки из слоев векторных карт извлекались значения показателей. Природная информация представлена характеристиками: положение относительно крайней северной точки района по направлению на восток и юг (расстояние, км), опасность геоморфологических процессов (0 – безопасные, 1 - опасные, 2 - катастрофические), наводнений (градации от 0 до 4, 4 – высокая опасность), лавиноопасность (0-4), пожароопасность (1-3), природоохранное зонирование (0 – без существенных ограничений, 1 – территория заказников, 2 – центральной экологической зоны, 3 – то же в Прибайкальском национальном парке).

Для природных объектов социально-экономические показатели приняты равными нулю. Для освоенной территории информация представлена следующими данными: номер муниципального образования в территориальном порядке, дорожная инфраструктура (1-3, 3 – высокоразвитая), численность населения городов и поселков (данные 2016 г.), число отраслей хозяйства (градации 1-3, 3 – от 8 до 10 отраслей), естественный прирост населения (1-3, 3 – от 10 до 15 человек на 1000 жителей), миграционная активность (1-4, 4 - от 15 до 35 человек на 1000 жителей), заболеваемость (1-3, 3 – 1200-1600 случаев на 1000 жителей), преступность (1-4, 4 – 3,5 преступлений на 100 человек).

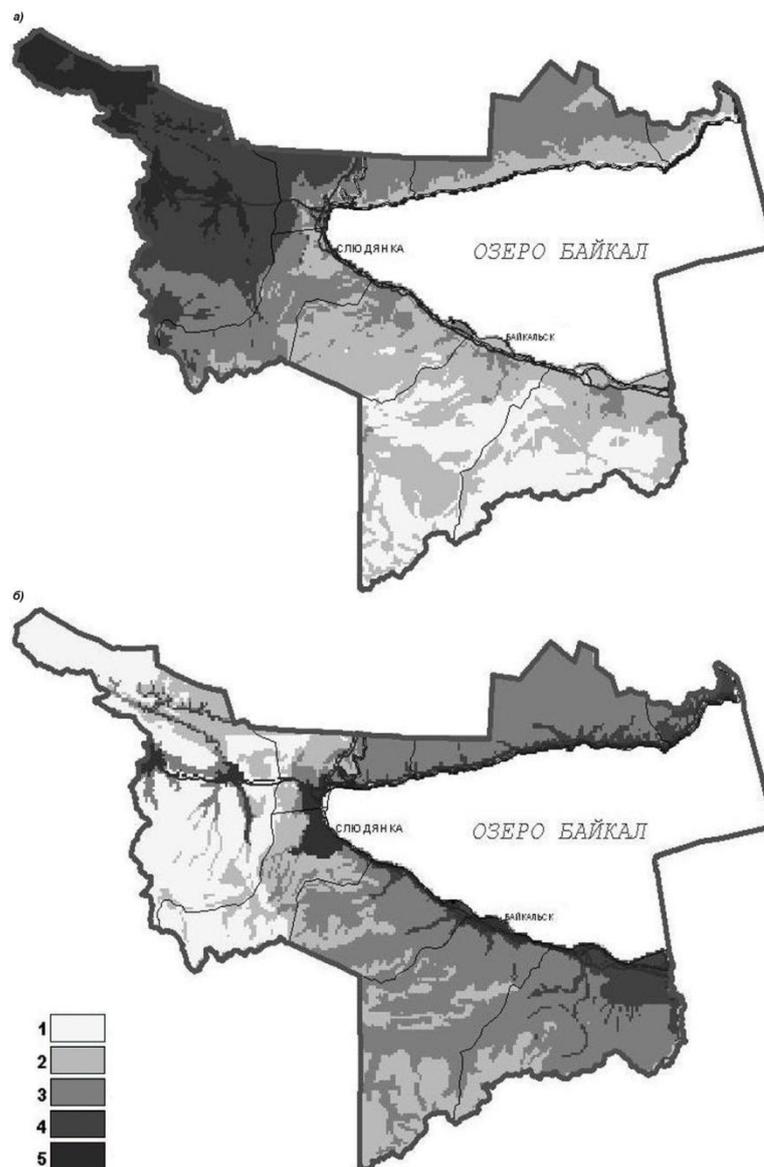
Перечисленные показатели исходных карт несут различную информацию о состоянии природы, экономики и населения, об ограничениях хозяйственной деятельности, о факторах опасности среды жизнедеятельности. Помимо этой информации для оценки наступления кризисной природно-экономической ситуации важно учитывать также пороговые значения или предельные величины характеристик среды, несоблюдение которых приводит к развитию КС. Экономическая безопасность региона достигается, когда система индикаторов не превышает пороговые значения, которые меняются с изменением уровня развития экономики.

Для вычислений можно использовать статистические методы регрессионного или факторного многомерного анализа, а также метод главных компонент (МГК), где первая компонента ГК1 отражает состояние системы  $z_1$ , а вторая ГК2 – характеризует фоновые условия среды  $z_2$  [6]. Величина  $z = z_1 - z_2$  определяет степень отклонения состояния системы от средовой нормы, которая при превышении порогового значения  $z \geq z_0$  указывает на кризисное развитие ситуации.

**5. Результаты и выводы.** По МГК расчеты проводились с использованием программы  $R$  [19] и созданной базы данных. В качестве основной оценки использовался показатель интегрированной опасности  $E(z) = \exp(kz)$ , который рассчитан по формуле (5) при  $z = z_1 - z_2$ , где  $z_1 = GK1 + 0,45$ ,  $z_2 = 0,15GK2 + 0,45$ . Выбранные коэффициенты 0,15 и 0,45 обеспечивают  $1 > z_2 > 0$  и итоговую независимость величины  $z$  от  $z_2$ . При этом большинство значений  $z$  для природных объектов (95 % всех точек) находятся в окрестности нуля, т.е. близки к критической мере экономической опасности жизнедеятельности  $E=1$ . Участки населенных пунктов характеризуются положительной величиной  $z$  и при  $k < 0$  имеют низкие показатели опасности. Знание величин  $z$  и  $E(z)$  для отдельных поселений позволяет вычислить коэффициент  $k = \ln E / z$ . Величина  $E$  оценивалась по демографической реакции населения на природные и социально-экономические изменения в районе – по соотношению численности населения в 2016 г. к максимальной численности 1967 г., например, в г. Слюдянка  $E = -\ln(18302/23000) = 0,228$ . Из формулы (5) получаем значение  $z = 14,8$ , откуда  $k = -0,10$ .

На основе предлагаемого алгоритма проведено геоинформационное картографирование и создана серия интегральных карт КС для территории Слюдянского района Иркутской области [5]. Из них на рис. 3 представлены две карты, характеризующие состояние природно-экономической среды  $z_2$  участков территории и интегрированную опасность  $E(z)$  возникновения кризисных природно-экономических ситуаций. На карте (Рис.3а) состояния среды выделяются участки пониженных значений  $z_2$ , относящиеся к прибрежной зоне, межгорным понижениям и плато. На карте интегрированной опасности (Рис. 3б) наименьшие значения соответствуют территориям населенных пунктов и их окрестностям, а также участкам вдоль автомобильных и железных дорог. По низким значениям выделяются также неосвоенные долины таежных рек, перспективные для хозяйственного использования преимущественно в рекреационных целях. Эта карта также иллюстрирует пространственное варьирование рисков хозяйственной деятельности  $p(z) = -kE(z)$ . На основании расчетных значений опасности  $E(z)$  создаются другие оценочные тематические карты. Согласно расчетным формулам, устойчивость экономического развития и показатель качества жизнедеятельности изменяются в обратной зависимости от опасности возникновения кризисных ситуаций.

**Заключение.** Показано, что при оценочных расчетах и картографировании вместо функций многих переменных можно использовать функцию одной интегральной переменной, отражающей различие состояния системы и ее среды. Для обоснования применяется векторная модель представления связи данных и процедуры дифференциальной геометрии (векторного расслоения, диффеоморфизма многообразий и их расслоений). Здесь естественным образом реализуется принцип Гаусса наименьшего принуждения – минимума отклонения состояния системы от состояния ее среды. Интегральный показатель  $z=f(y)=\mathbf{a}\cdot\mathbf{y}$  является функцией локальных координат состояния объекта относительно состояния ее среды, своеобразной метрикой связи этих состояний. Любая оценочная функция формируется как надстройка над касательным слоем  $f(y)$  векторов состояния  $y$  и определяется этим показателем по формуле (4).



**Рис. 3.** Оценка опасности возникновения кризисных природно-экономических ситуаций:  
 а) характеристика состояния природно-экономической среды  $x_0=z_2$  участков территории Слюдянского района; градации значений: 1 – 0,0-0,2; 2 – 0,2-0,4; 3 – 0,4-0,6; 4 – 0,6-0,8; 5 – 0,8-1,0. б) интегрированная опасность  $E$  возникновения кризисных природно-экономических ситуаций; градации: 1 – 1,11-1,08; 2 – 1,08-1,06; 3 – 1,06-1,00; 4 – 1,00-0,51; 5 – 0,51-0,22.

На этой математической основе разработан алгоритм последовательной реализации процедур ГИС-технологии создания серии интегральных оценочных карт опасности возникновения КС. При этом учитывались разнородные данные, как о природных, так и социально-экономических характеристиках региона. В основу математического аппарата для преобразования исходной БД положены соотношения теории надежности, в частности, расчет величины интегрированной опасности  $E(z)$  как функции разности  $z=z_1-z_2$  состояния территориальных объектов  $z_1$  и их среды  $z_2$ . Индексы состояния и среды рассчитываются методом выделения главных компонент по показателям, послойно снятым с векторных карт по регулярной сетке точек. Оценочные функции разного вида вычисляются по величине интегрированной опасности  $E(z)$ . Кризисная ситуация наступает, когда показатель опасности

становится  $E > 1$ . Вычисленные поточечные значения искомым функций с помощью ГИС-программы классифицируются и выводятся на карту, отражая пространственное распределение различных кризисных ситуаций по всей совокупности независимых данных.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арнольд В.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М. Наука. 1971. 240 с.
2. Вечканов Г.С. Экономическая теория. СПб. Питер. 2009. 448 с.
3. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. М. Радио и связь. 1990. 288 с.
4. Ковин Р.В., Марков Н.Г. Геоинформационные системы. Томск. Изд-во Томского политехн. ун-та. 2008. 175 с.
5. Красноштанова Н.Е., Черкашин А.К. Оценочное картографирование опасности возникновения кризисных природно-экономических ситуаций // Геодезия и картография. 2017. №11. С. 40–49.
6. Лесных С.И., Черкашин А.К. Создание интегральных карт на примере территории муниципального района // География и природные ресурсы. 2017. №4. С. 180–189.
7. Лесных С.И., Черкашин А.К. Статистические методы создания интегральных карт (уровень муниципального района) // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №4. С. 116–123.
8. Маркеев А.П. О принципе Гаусса // Сборник научно-методических статей: Теоретическая механика. Вып. 23. М.: Изд-во Моск. ун-та. 2000. С. 29–45.
9. Матвеев А.В. Факторы и угрозы устойчивости и устойчивому развитию региональных экономических систем // Российский экономический интернет-журнал. 2006. №4. С. 1–15.
10. Перфильев С.Е. Технологии геосистемного и экологического картографирования агроландшафтов Центральной Сибири (Красноярский край) // География и природные ресурсы. 2008. №3. С. 127–133.
11. Пытьев Ю.П. Основы теории возможностей. Методы оптимального оценивания и принятия решений. Мера возможности: определение, свойства // Вестник Московского университета. Серия: Физика. Астрономия. 1997. № 3. С. 3–7.
12. Слюдянский район Иркутской области: природа, хозяйство и население. Атлас. Иркутск. Изд-во ИГ СО РАН. 2012. CD. 48 карт.
13. Стружанов В.В., Бурмашева Н.В. Теория упругости: основные положения. Екатеринбург. Изд-во Урал. ун-та. 2019. 204 с.
14. Черкашин А. К., Красноштанова Н. Е. Модели оценки рисков в природно-технических системах // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 149–160.
15. Черкашин А.К., Красноштанова Н.Е. Моделирование оценки риска хозяйственной деятельности в районах нового нефтегазового освоения // Проблемы анализа риска. 2015. № 6. С. 21–29.
16. Armitage R.P. Environmental mapping // Encyclopedia of Geography. Kansas: University of Kansas. 2010. Pp. 973–976.
17. Hewitt K. Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters. New York: Routledge. 2014. 410 p.

18. Høyland A., Rausand M. System Reliability Theory: Models and Statistical Methods. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 2004. 518 p.
  19. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning with Applications in R. New York: Springer. 2013. 426 p.
  20. Jolliffe I.T. Principal Component Analysis. New York: Springer-Verlag. 2002. 487 p.
  21. Lark R. M. Contributions of principal components to discrimination of classes of land cover in multi-spectral imagery // International Journal of Remote Sensing. 1995. 4(16). Pp. 779–787.
  22. Salton G., Allan J., Buckley C. Automatic structuring and retrieval of large text files // Electronic publishing. 1992. 5(1). Pp. 1–17.
  23. Shen Z. Lectures on Finsler Geometry. World Scientific Publishers. 2001. 256 p.
- 

**UDK 910.1:528.94:51-7**

**METHODOLOGY FOR CREATING ASSESSMENT MAPS OF THE CRISIS  
SITUATIONS HAZARD ON THE BASIS OF CARTOGRAPHIC INFORMATION**

**Aleksander K. Cherkashin**

Dr., Professor,

Head of the Laboratory "Theoretical geography", e-mail: [cherk@mail.icc.ru](mailto:cherk@mail.icc.ru)

**Natalia E. Krasnoshtanova**

Dr., scientific researcher, e-mail: [kne1988@rambler.ru](mailto:kne1988@rambler.ru)

V.B. Sochava Institute of Geography

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

1, Ulan-Batorskaya st., 664033, Irkutsk, Russia

**Abstract.** The possibility of calculating the assessment functions by the integral indicators of the state of systems using the vector model of data presentation is justified. Also, the procedures of GIS technology for assessing and mapping hazard crisis situations are implemented. Comprehensive accounting of heterogeneous natural and socio-economic information about the study area and the applying of environmental adjustments for each location are features of the proposed methodology. Relations of the reliability theory as functions of the characteristics difference of the territorial objects state and their environment are used as assessment criteria. The indices of state and environment are calculated by the method of principal components according to indicators automatically taken in vector maps layers using a regular grid of points. The territorial assessment and mapping of the crisis situations hazard are carried out on the example of the Slyudyanka district of Irkutsk region.

**Keywords:** vector model, GIS technology, crisis natural and economic situation, assessment maps, geographical environment.

**References**

1. Arnol'd V.I. Obyknovennye differencial'nye uravnenija [Ordinary Differential Equations]. Moscow. Nauka = Science. 1971. 240 p. (in Russian)

2. Vechkanov G.S. Jekonomicheskaja teorija [Economic theory]. Sankt-Peterburg. Piter = St. Petersburg. Publishing house "Peter". 2009. 448 p. (in Russian)
3. Djubua D., Prad A. Teorija vozmozhnostej. Prilozhenija k predstavleniju znanij v informatike [Theory of Opportunities. Applications to the representation of knowledge in computer science]. Moscow. Radio i svjaz' = Publishing House "Radio and Communications". 1990. 288 p. (in Russian)
4. Kovin R.V., Markov N.G. Geoinformacionnye sistemy [Geoinformation systems.]. Tomsk. Izd-vo Tomskogo politehn. un-ta = Tomsk Polytechnic University Publishing House. 2008. 175 p. (in Russian)
5. Krasnoshtanova N.E., Cherkashin A.K. Ocenochnoe kartografirovanie opasnosti vozniknovenija krizisnyh prirodno-ekonomicheskikh situacij [The assessment mapping of the hazard of the occurrence of crisis natural and economic situations] // Geodezija i kartografija = Geodesy and Cartography. 2017. №11. Pp. 40–49. (in Russian)
6. Lesnyh S.I., Cherkashin A.K. Sozdanie integral'nyh kart na primere territorii municipal'nogo rajona [Creation of integrated maps on the example of the territory of a municipal district] // Geografija i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources. 2017. №4. Pp. 180–189. (in Russian)
7. Lesnyh S.I., Cherkashin A.K. Statisticheskie metody sozdanija integral'nyh kart (uroven' municipal'nogo rajona) [Statistical methods for creating integrated maps (municipal district level)] // Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii = Information and mathematical technologies in science and management. 2016. №4. Pp. 116–123. (in Russian)
8. Markeev A.P. O principe Gaussa [About the Gauss Principle] // Sbornik nauchno-metodicheskikh statej: Teoreticheskaja mehanika = Collection of scientific and methodological articles: Theoretical Mechanics. Moscow. Izdatel'stvo moskovskogo universiteta = Moscow University Press. 2000. Tom. 23. Pp. 29–45. (in Russian)
9. Matveev A.V. Faktory i ugrozy ustojchivosti i ustojchivomu razvitiju regional'nyh jekonomicheskikh system [Factors and threats to the sustainability and sustainable development of regional economic systems] // Rossijskij jekonomicheskij internet-zhurnal = Russian economic online journal. 2006. №4. Pp. 1–15. (in Russian)
10. Perfil'ev S.E. Tehnologii geosistemnogo i jekologicheskogo kartografirovanija agrolandshaftov Central'noj Sibiri (Krasnojarskij kraj) [Technologies of geosystem and ecological mapping of agrolandscapes of Central Siberia (Krasnodar Territory)] // Geografija i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources. 2008. №3. Pp. 127–133. (in Russian)
11. Pyt'ev Ju.P. Osnovy teorii vozmozhnostej. Metody optimal'nogo ocenivanija i prinjatija reshenij. Mera vozmozhnosti: opredelenie, svojstva [Fundamentals of Opportunity Theory. Methods for optimal assessment and decision making. Measure of opportunity: definition, properties] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Serija: Fizika. Astronomija = Moscow University Physics Bulletin. 1997. № 3. Pp. 3–7. (in Russian)
12. Sljudjanskij rajon Irkutskoj oblasti: priroda, hozjajstvo i naselenie. Atlas. [Slyudyansky district of the Irkutsk region: nature, economy and population. Atlas]. Irkutsk. Izd-vo IG SO RAN. 2012. CD. 48 kart. (in Russian)
13. Struzhanov V.V., Burmasheva N.V. Teorija uprugosti: osnovnye polozhenija [Theory of elasticity: basic principles]. Ekaterinburg. Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta = Ural University Publishing House. 2019. 204 p. (in Russian)

14. Cherkashin A.K., Krasnoshtanova N.E. Modeli ocenki riskov v prirodno-tehnicheskikh sistemah [Risk assessment models in natural-technical systems] // *Geografija i prirodnye resursy = Geography and Natural Resources*. 2014. № 2. Pp. 149–160. (in Russian)
15. Cherkashin A. K., Krasnoshtanova N. E. Modelirovanie ocenki riska hozjajstvennoj dejatel'nosti v rajonah novogo neftegazovogo osvoenija [Modeling the risk assessment of economic activity in areas of new oil and gas development] // *Problemy analiza riska = Issues of risk analysis*. 2015. № 6. Pp. 21–29. (in Russian)
16. Armitage R.P. Environmental mapping // *Encyclopedia of Geography*. Kansas: University of Kansas. 2010. Pp. 973–976.
17. Hewitt K. *Regions of Risk: A Geographical Introduction to Disasters*. New York: Routledge. 2014. 410 p.
18. Høyland A., Rausand M. *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods*. New Jersey: John Wiley& Sons, Inc. 2004. 518 p.
19. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. *An Introduction to Statistical Learning with Applications in R*. New York: Springer. 2013. 426 p.
20. Jolliffe I.T. *Principal Component Analysis*. New York: Springer-Verlag. 2002. 487 p.
21. Lark R. M. Contributions of principal components to discrimination of classes of land cover in multi-spectral imagery // *International Journal of Remote Sensing*. 1995. 4(16). Pp. 779–787.
22. Salton G., Allan J., Buckley C. Automatic structuring and retrieval of large text files // *Electronic publishing*. 1992. 5(1). Pp. 1–17.
23. Shen Z. *Lectures on Finsler Geometry*. World Scientific Publishers. 2001. 256 p.

УДК 004.62

## АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ К СТРУКТУРЕ АНСАМБЛЯ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

**Захарова Алёна Александровна**

Д.т.н., профессор кафедры «Информатика и программное обеспечение»,  
Брянский государственный технический университет,  
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7, e-mail: [zaa@tu-bryansk.ru](mailto:zaa@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0003-4221-7710

**Подвесовский Александр Георгиевич**

К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информатика и программное обеспечение»  
Брянский государственный технический университет,  
241035, Россия, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, д. 7, e-mail: [apodv@tu-bryansk.ru](mailto:apodv@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0002-1118-3266

**Толстенюк Виктория Павловна**

Магистрант, Брянский государственный технический университет,  
241035, г. Брянск, бульвар 50-летия Октября 7, e-mail: [tolstenok21@yandex.ru](mailto:tolstenok21@yandex.ru)

**Аннотация.** В статье рассматриваются особенности медико-биологических данных и их влияние на выбор методов при разработке ансамбля моделей. Все медико-биологические данные условно делятся на пять групп, так как могут иметь различную природу, а для их систематизации необходимо применять шкалирование. Так же в статье приведен ряд особенностей медико-биологических данных, которые оказывают непосредственное влияние на выбор способа формирования ансамбля (в зависимости от требуемых результатов), а также на выбор методов, входящих в ансамбль. В статье приведены следующие методы: корреляционный анализ, ассоциативные правила, карты Кохонена и деревья решений. Таким образом, особенности входных данных при формировании ансамбля необходимо учитывать на начальном этапе, чтобы избежать дальнейших ошибок при работе над ансамблем и интерпретации результатов.

**Ключевые слова:** медико-биологические данные, особенности медико-биологических данных, ансамбль моделей, интеллектуальный анализ данных.

**Цитирование:** Захарова А.А., Подвесовский А.Г., Толстенюк В.П. Анализ требований к структуре ансамбля моделей для обработки медико-биологических данных // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 89–98. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-07

**Введение.** Интеллектуальный анализ стал частью большого числа исследований и технологий в современном мире и включает такие направления как статистика, машинное обучение, искусственный интеллект, распознавание образов, визуализацию и алгоритмизацию. Инструменты Data Mining применяются в различных сферах: от бизнеса до медицины.

Если говорить о применении методов интеллектуального анализа данных в медицине, то данное направление активно развиваться, но главным ограничением являются

особенности медико-биологических данных, для качественного анализа которых одного метода будет недостаточно. При работе с такими данными большинство алгоритмов не позволяет достичь желаемой точности. В подобных случаях целесообразно использовать ансамбли моделей. В этом случае главная задача ансамбля состоит в генерации разнообразных индивидуальных моделей, которые позволят повысить точность и качество результата [2].

Применение инструментов Data Mining в области медицины позволяет получить новые комплексные решения, которые ранее не были доступны.

**1. Особенности медико-биологических данных.** Понятие «медико-биологические данные» включает в себя не только выработанные человеческим организмом различные сигналы, которые свидетельствуют о состоянии человека, а также состояние окружающей среды, которое непосредственно оказывает влияние на жизнедеятельность человека.

Все медико-биологические данные можно условно разбить на пять групп:

а) Количественные данные. Это параметры, характеризующиеся дискретными величинами, такими как рост, вес, показания общего анализа крови или показатель заболеваемости населения.

б) Качественные данные. Качественными данными являются признаки, которым нельзя дать точную оценку, но при этом можно ранжировать, например, систематизировать по ряду условных баллов. К таким данным относятся балльные характеристики уровня боли, качества жизни человека или качества окружающей его среды.

в) Статические картины органов человека или всего тела. Такого рода данные можно получать благодаря средствам медицинской радиологии, которые отображают состояние пациента в целом или отдельных органов. Примером таких данных являются рентгенограмма, томограмма и т.д.

г) Данные, характеризующие динамическую картину органов человека. Данные такого рода можно получить только при постоянном отслеживании движущихся органов человека, таких как сердце или легкие.

д) Данные, характеризующие динамические физиологические функции, такие как электрокардиограмма, электроэнцефалограмма и другие [3].

Медико-биологические данные могут быть отображены в различных форматах (текстовый, числовой, графический и т.д.), а также могут обладать различными признаками, поэтому точной группировки, которая бы отразила все характеристики, особенности и способы регистрации такого рода данных просто не существует.

Особое внимание стоит уделить понятиям «признак» и «параметр». Эти понятия различны, поэтому при работе с медико-биологическими данными их необходимо четко различать, но при этом данное деление весьма условно [4].

Признак – бинарный параметр, принимающий два значения: наличие или отсутствие.

Параметр – это значение, которое можно охарактеризовать в абсолютных или относительных величинах.

Чтобы систематизировать и обработать медико-биологические данные, их необходимо упорядочить. Для этого было предложено использовать ряд шкал измерения:

- Шкала наименований – объединение объектов в ряд непересекающихся классов, при этом принято считать, что объекты, относящиеся к одному классу, являются идентичными.

- Шкала порядка. Данная шкала отражает направление процесса: порядок возрастания или убывания признака.
- Интервальная шкала – шкала, имеющая единицу измерения, что является ее отличительной особенностью.
- Шкала отношений – это разновидность интервальной шкалы, имеющая точку отсчета, то есть точку, в которой исследуемый параметр практически отсутствует [3].

Также медико-биологические данные необходимо привести к единому формализованному виду.

Единый унифицированный вид позволяет сопоставлять результаты различных исследований, анализов и отчетной документации. В Российской Федерации формализация данных регулируется законом «О стандартизации» и общепринятой считается формализация параметрических данных о пациенте на основе международного стандарта СИ. Отдельные стандарты регулируют передачу, обмен данными и архитектуру клинических документов.

Первым шагом при работе с любыми данными, в том числе и с медико-биологическими, необходимо определить их тип. Чаще всего используются два типа данных: качественные и количественные. Качественные данные можно ранжировать, а количественные – квантовать.

Работая с медико-биологическими данными, необходимо учитывать ряд особенностей [1, 8]:

- Нельзя использовать обнуление, то есть в случае пропусков информации пустые значения заменять на ноль нельзя, так как это в большинстве случаев совпадает с кодированием нормы по данному признаку или внесет ложную информацию в дальнейшую работу с данными.
- Не рекомендуется использовать в малых выборках среднее значение по классу ввиду их неоднородности.
- Необходимо четко разделять понятия «переменная» и «признак». Так же необходимо учитывать дихотомичность, так как переменные могут принимать одно из двух значений.
- Необходимо правильно определить значение градации качественного признака. Например, при определении боли по шкале от 1 до 5. Поэтому чтобы уйти от субъективного значения необходимо провести дополнительные исследования.
- Обратит внимание на формат записи дат. Он должен быть записан в единой форме для всех исследуемых данных.
- Обратит внимание на наличие дублирующих значений и ошибки ввода.
- При необходимости структурировать данные для получения адекватных результатов и исключения ошибок.

**2. Разработка ансамбля моделей с учетом особенностей медико-биологических данных.** Ансамбль моделей – это комбинация нескольких методов, которые позволяют создать более точную и эффективную модель, чем модель, в основе которой лежит только один метод. То есть при нахождении решения для одной задачи или доказательства выдвинутой гипотезы будет применена не одна модель, а несколько. При этом будет иметь значение не результат работы одной отдельно взятой модели, а результат работы ансамбля в целом [11].

Обучение ансамбля – это процесс обучения набора базовых методов с последующим объединением результатов их прогнозирования в единый прогноз агрегированного классификатора методов. Таким образом благодаря агрегированному классификатору методов можно получить более точный результат. Под понятием «агрегированный классификатор методов» подразумеваются все методы, входящие в ансамбль моделей.

Цель объединения моделей – улучшить (усилить) решение, которое дает отдельная модель. При этом предполагается, что единственная модель никогда не сможет достичь той эффективности, которую обеспечит ансамбль [9].

Можно выделить три ключевых причины объединения методов (моделей) в ансамбль:

- Уменьшает вероятность влияния разного рода случайностей (например, выбросы) на агрегированную гипотезу.
- Ансамбль моделей ищет глобальным оптимум и избегает локальных оптимумов, так как ведет поиск из разных точек исходного множества гипотез.
- Существует возможность того, что агрегированная гипотеза будет находиться за пределами множества базовых гипотез, в этом случае при построении комбинированной гипотезы можно просто расширить множество возможных гипотез.

Первым шагом для разработки ансамбля является выбор класса ансамбля. Все ансамбли можно разделить на два класса:

- Ансамбли, состоящие из базовых методов только одного типа (только из деревьев решений, нейронных сетей и т. д.).
- Ансамбли, состоящие из базовых методов разного типа (деревья решений, карты Кохонена, различные алгоритмы кластеризации и т. д.).

Для работы с медико-биологическими данными оптимальным будет выбор ансамбля, состоящего из методов различного типа, так как такой класс ансамблей обладает большей гибкостью и точностью.

Большую роль играет правильный выбор метода формирования ансамбля. Во многом выбор зависит от поставленных целей, так как каждый метод направлен на решение определенных задач. Далее рассмотрим два наиболее популярных и часто используемых метода.

Бустинг – алгоритм, относящийся к итерационным и предназначенный для увеличения точности модели. Каждой записи данных на каждой итерации алгоритма присваивается вес. Первый метод обучается на всех примерах с равными весами. На каждой последующей итерации веса расставляются соответственно классифицированным примерам, т. е. веса правильно классифицированных примеров уменьшаются, а неправильно классифицированных – увеличиваются. Следовательно, приоритетными для следующего метода станут неправильно распознанные примеры, обучаясь на которых новый метод будет исправлять ошибки метода на прошлой итерации [5].

Бэггинг направлен на повышение стабильности модели. Данный метод строит модель ансамбля, используя бутстреп-агрегирование, которое генерирует множественные модели для получения более надежных предсказаний. Алгоритм бэггинга подразумевает следующие шаги. Сначала формируется несколько выборок путем случайного отбора из исходного множества данных. Затем на основе каждой выборки строится метод, и выходы всех методов агрегируются с использованием голосования или простого усреднения. Очевидно, что

точность предсказания построенных с помощью беггинга комбинированных методов оказывается значительно выше, чем точность отдельных моделей [7].

Для работы с медико-биологическими данными подойдет любой из методов.

Важным этапом при работе с медико-биологическими данными является предобработка, так как данные могут поступать из нескольких источников и вводиться вручную (поэтому могут присутствовать пустые или дублирующие значения, ошибки ввода и т.д.), также может присутствовать различное шкалирование одних и тех же параметров, поступивших из разных источников.

В большинстве случаев, поступившие данные не пригодны для анализа, так как они слабоструктурированные, в них встречаются пропуски, дублирующие и аномальные значения. Если начать работать с данными в исходном виде, то результат работы ансамбля моделей будет неудовлетворительным. Например, каждому пациенту может быть поставлено до нескольких разных диагнозов, которые занесены в одно поле. Таким образом, для ансамбля моделей входной параметр «Диагноз» вместо 4 различных значений будет иметь только одно, состоящее сразу из нескольких диагнозов.

Пропуски и дублирующие значения также внесут помехи в работу модели, что отрицательно скажется на итоговом результате.

На рис. 1 показаны данные, которые прошли процедуру предобработки.

id_Пациента	Возраст	1-муж;2-жен; Пол	Диагноз (код МКБ)	Название диагноза	Гемоглобин	Отклонение
1	28	1	E78.0	Чистая гиперхолестеринемия	141	0
1	28	1	G90.9	Расстройство вегетативной [автономной]	141	0
1	28	1	H35.0	Фоновая ретинопатия и ретинопатия	141	0
1	28	1	H52.1	Миопия	141	0

Рис. 1. Данные после предобработки

После предобработки появилось новое поле «id\_Пациента», каждый диагноз заносится в отдельное поле, устранены дублирующие и пустые значения. Далее данные можно использовать для разработки ансамбля моделей.

**3. Выбор метода.** Существуют ограничения при выборе методов для обработки медико-биологических данных. Чаще всего используются следующие методы:

а) Корреляционный анализ.

Используется при оценке зависимостей выходных полей данных от входных факторов и при устранении незначимых факторов. Основной принцип заключается в поиске в наименьшей степени коррелированных (взаимосвязанных) значений с выходным результатом. Полученные факторы исключаются из результирующего набора данных почти без потерь важной информации. Для принятия решения об исключении фактора используется порог значимости. Если корреляция (степень взаимозависимости) между входным и выходным факторами меньше порога значимости, то соответствующий фактор отбрасывается как незначимый.

При работе с медико-биологическими данными корреляционный анализ позволяет выявить наиболее значимые показатели для каждой группы пациентов.

б) Ассоциативные правила.

Ассоциативные правила [6] позволяют находить закономерности между связанными событиями. Для работы с ассоциативными правилами данные необходимо представить в

виде транзакций. Например, одному пациенту соответствует один и более диагнозов. Пример данных в виде транзакций представлен на рис. 1. На рис. 2 показан пример работы ассоциативных правил.

№	Условие	Следствие	Поддержка		Достоверность	Лифт
			Кол-во	%		
1	Гиперметропия	Нейросенсорная потеря слуха двусторонняя	3	3,00	33,33	11,11
2	Гиперметропия	Хроническая обструктивная легочная болезнь неуточненная	3	3,00	33,33	8,33
3	Хроническая обструктивная легочная болезнь неуточнена	Гиперметропия	3	3,00	75,00	8,33
4	Гиперметропия	Эссенциальная [первичная] гипертензия	3	3,00	33,33	2,38
5	Эссенциальная [первичная] гипертензия	Гиперметропия	3	3,00	21,43	2,38
6	Пресбиопия	Расстройство вегетативной [автономной] нервной системы не	4	4,00	26,67	2,22
7	Расстройство вегетативной [автономной] нервной системы	Пресбиопия	4	4,00	33,33	2,22
8	Пресбиопия	Чистая гиперхолестеринемия	6	6,00	40,00	1,53
9	Чистая гиперхолестеринемия	Пресбиопия	6	6,00	23,08	1,53
10	Расстройство вегетативной [автономной] нервной системы	Чистая гиперхолестеринемия	5	5,00	41,67	1,60
11	Чистая гиперхолестеринемия	Расстройство вегетативной [автономной] нервной системы не	5	5,00	19,23	1,60
12	Чистая гиперхолестеринемия	Эссенциальная [первичная] гипертензия	5	5,00	19,23	1,37
13	Эссенциальная [первичная] гипертензия	Чистая гиперхолестеринемия	5	5,00	35,71	1,37

Рис. 2. Пример работы метода «Ассоциативные правила»

Применение ассоциативных правил позволяет выявить связанные диагнозы и увидеть степень связи и количество случаев.

в) Карты Кохонена.

Самоорганизующиеся карты Кохонена [12] являются удобным графическим инструментом для работы с медико-биологическими данными. С помощью карт можно увидеть значимые различия в данных, подробно описать их состав или выявить закономерности. На рис. 3 показан пример работы метода «Самоорганизующиеся карты Кохонена».

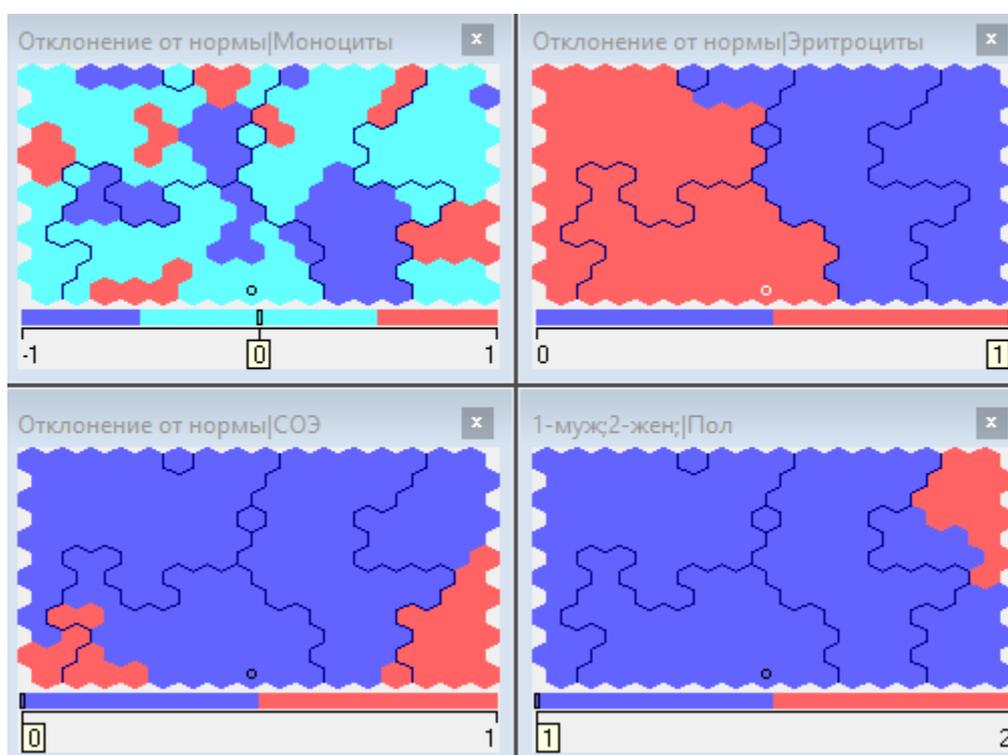


Рис. 3. Пример работы метода «Самоорганизующиеся карты Кохонена»

г) Дерево решений.

Деревья решений [6] – это способ представления правил в иерархической, последовательной структуре, где каждому объекту соответствует единственный узел, дающий решение. Под правилом понимается логическая конструкция, представленная в виде «если ... то ...». Пример работы метода показан на рис. 4.

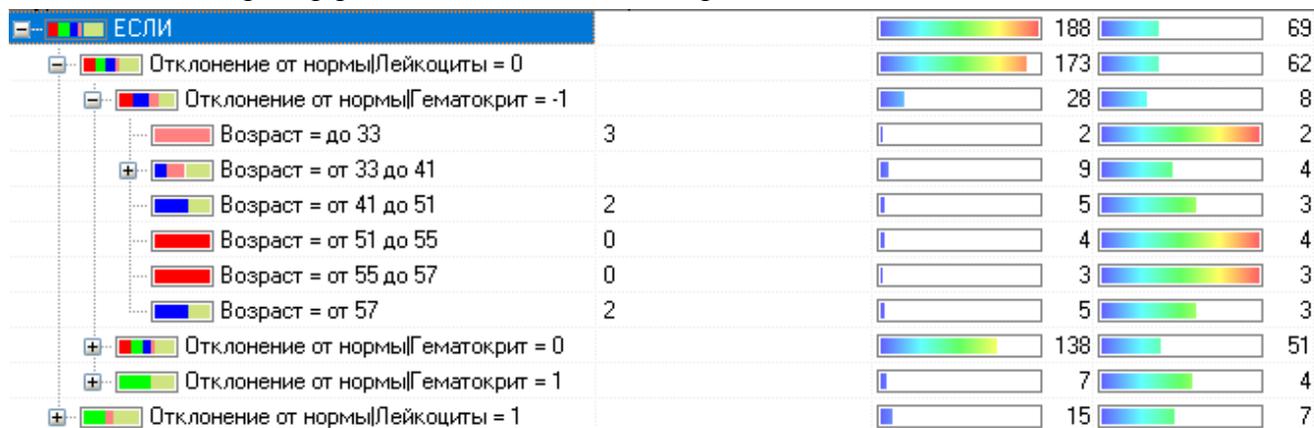


Рис. 4. Пример работы метода «Дерево решений»

Применительно к медико-биологическим данным, деревья решений менее эффективны, чем самоорганизующиеся карты Кохонена. Даже на малых выборках (порядка 100–200 записей) дерево решений получается достаточно большим и трудноинтерпретируемым.

Таким образом, стандартный алгоритм разработки ансамбля моделей предложено скорректировать с учетом особенностей медико-биологических данных и примет следующий вид:

- Шаг 1. Проанализировать исходные данные и при необходимости провести предобработку данных.
- Шаг 2. Определить группу, признак и параметр для медико-биологических данных. Так же необходимо грамотно подобрать единую шкалу для анализа данных.
- Шаг 3. В зависимости от поставленных задач выбрать метод формирования ансамбля.
- Шаг 4. Правильно подобрать методы и последовательность их использования.
- Шаг 5. Интерпретировать полученный результат.

В результате работы ансамбля можно будет увидеть не только скрытые закономерности, но и выдвинуть ряд значимых гипотез, ранее не найденных [10].

**Заключение.** Медико-биологические данные оказывают непосредственное влияние на алгоритм разработки ансамбля моделей. В большинстве случаев исходные данные нуждаются в предобработке: необходимо убрать дублирующие значения, структурировать данные и исправить ошибки ручного ввода. Так же при работе с такими данными необходимо правильно определить их тип (например, количественные или качественные данные), правильно определить признак и параметр, а для упорядочивания использовать единую шкалу.

Медико-биологические данные обладают рядом особенностей, но при работе с ними наиболее значимыми являются пропуски информации (в этом случае нельзя использовать обнуление, так как оно может совпасть с кодированием нормы кого-либо признака), наличие дублирующих значений и ошибок ввода, а также слабая структуризация данных.

Так же предложен алгоритм разработки ансамбля моделей, который учитывает особенности слабоструктурированных выборок медико-биологических данных. Данный алгоритм прошел апробацию на малых выборках и показал свою эффективность.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-07-00844.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барьеры и перспективы цифровой трансформации: проблемы управления большими данными в индустрии здравоохранения. Режим доступа: <http://www.medlinks.ru/article.php?sid=83028> (дата обращения 11.11.2019)
2. Кашницкий Ю.С., Игнатов Д.И. Ансамблевый метод машинного обучения, основанный на рекомендации классификаторов // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2015. Т. 19. № 4. С. 37–55.
3. Королюк И.П. Медицинская информатика. Самара: СамГМУ. 2012. 244 с.
4. Мангалова Е.С. Исследование влияния разнообразия индивидуальных моделей на точность ансамбля // Решетневские чтения. 2015. Т. 2. С. 67–68.
5. Орешков В.И. Методы и модели интеллектуального анализа данных в задачах управления в социальных и экономических системах: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Рязань. 2013. 23 с.
6. Паклин Н.Б., Орешков В.И. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям. СПб.: Питер. 2013. 704 с.
7. Сошенко А.Е., Королева Н.А. Ансамбли моделей для прогнозирования. Режим доступа: [http://arbir.ru/articles/a\\_4053.htm](http://arbir.ru/articles/a_4053.htm) (дата обращения 11.11.2019)
8. Цветкова Л.А., Черченко О.В. Технология Больших Данных в медицине и здравоохранении России и мира // Врач и информационные технологии. 2016. № 3. С. 60–73.
9. Цыганкова И.А. Метод интеллектуальной обработки медико-биологических данных // Программные продукты и системы. 2009. № 3. С. 120–123.
10. Geger E.V., Podvesovskii A.G., Kuzmin S.A., Tolstenok V.P. Methods for the Intelligent Analysis of Biomedical Data // CEUR Workshop Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2019). Vol. 2485. Pp. 308–311.
11. Hamed R. Bonab, Fazli Can. A Theoretical Framework on the Ideal Number of Classifiers for Online Ensembles in Data Streams // 25th Conference on Information and Knowledge Management, ACM, New York. 2016. Pp. 2053–2056.
12. Kohonen T. The Self-Organizing Map // Proceeding of the IEEE. 1990. Vol. 78. Pp. 1464–1480.

UDK 004.62

## ANALYSIS OF REQUIREMENTS FOR THE ENSEMBLE OF MODELS STRUCTURE FOR BIOMEDICAL DATA PROCESSING

**Alena A. Zakharova**

Dr. Tech. Sc., Professor of Informatics and Software Engineering Department  
Bryansk State Technical University  
7, 50 let Oktyabrya blvd., 241035, Bryansk, Russia, e-mail: [zaa@tu-bryansk.ru](mailto:zaa@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0003-4221-7710

**Aleksandr G. Podvesovskii**

Cand. Tech. Sc., Associate Professor  
Head of Informatics and Software Engineering Department  
К.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информатика и программное обеспечение»  
Bryansk State Technical University  
7, 50 let Oktyabrya blvd., 241035, Bryansk, Russia, e-mail: [apodv@tu-bryansk.ru](mailto:apodv@tu-bryansk.ru)  
ORCID: 0000-0002-1118-3266

**Viktoria P. Tolstenok**

Graduate Student, Bryansk State Technical University  
7, 50 let Oktyabrya blvd., 241035, Bryansk, Russia, e-mail: [tolstenok21@yandex.ru](mailto:tolstenok21@yandex.ru)

**Abstract.** The article discusses the features of biomedical data and their influence on the choice of classifiers in the development of the ensemble of models. All biomedical data are conventionally divided into five groups, so they can have a different nature, and scaling is necessary for their systematization. The article also presents several features of biomedical data. Biomedical features have a direct impact on the choice of ensemble formation method (depending on the desired results), as well as on the choice of classifiers included in the ensemble. The following classifiers are presented in the article: correlation analysis, associative rules, Kohonen maps and decision trees. Thus, the features of the input data during the formation of the ensemble must be considered at the initial stage in order to avoid further errors when working on the ensemble and interpretation of the results.

**Keywords:** biomedical data, features of biomedical data, ensemble of models, data mining.

### References

1. Bar'ery i perspektivy cifrovoj transformacii: problemy upravlenija bol'shimi dannymi v industrii zdavoohranenija [Barriers and Opportunities of Digital Transformation: Problems of Big Data Control in the Industry of Public Health]. Available at: <http://www.medlinks.ru/article.php?sid=83028> (accessed 11.11.2019) (in Russian)
2. Kashnickij Ju.S., Ignatov D.I. Ansamblevyj metod mashinnogo obuchenija, osnovannyj na rekomendacii klassifikatorov [Ensemble Method of Machine Learning Based on Classifiers Recommendations] // Intellektual'nye sistemy. Teorija i prilozhenija. = Intelligent systems. Theory and applications. 2015. Vol. 19 (4). Pp. 37–55. (in Russian)

3. Koroljuk I.P. Medicinskaja informatika [Medical Infomatics]. Samara: Samara State Medical University. 2012. 244 p. (in Russian)
4. Mangalova E.S. Issledovanie vlijaniya raznoobrazija individual'nyh modelej na tochnost' ansamblja [Research of Influence of Individual Models Diversity on Ensemble Accuracy] // Reshetnevskie chtenija = Reshetnev Readings. 2015. Vol. 2. Pp. 67–68 (in Russian)
5. Oreshkov V.I. Metody i modeli intellektual'nogo analiza dannyh v zadachah upravlenija v social'nyh i jekonomicheskikh sistemah [Methods and Models of Intelligent Data Analysis in Tasks of Management in Social and Economic Systems]: Dissertation abstract. Ryazan. 2013. 23 p. (in Russian)
6. Paklin N.B., Oreshkov V.I. Biznes-analitika: ot dannyh k znanijam [Business Intelligence: from Data to Knowledge]. Saint-Petersburg. Piter. 2013. 704 p. (in Russian)
7. Soshenko A.E., Koroleva N.A. Ansambli modelej dlja prognozirovanija [Ensemble of Models for Forecasting]. Available at: [http://arbir.ru/articles/a\\_4053.htm](http://arbir.ru/articles/a_4053.htm) (accessed 11.11.2019) (in Russian)
8. Tsvetkova L.A., Cherchenko O.V. Tekhnologiya Bol'shikh Danykh v meditsine i zdavookhranenii Rossii i mira [Big Data Technology in medicine and healthcare of Russia and the world] // Vrach i informatsionnyye tekhnologi = Doctor and information technology. 2016. № 3. Pp. 60–73. (in Russian)
9. Tsygankova I.A. Metod intellektual'noj obrabotki mediko-biologicheskikh dannyh [Method of Intellectual Processing of Medical and Biologic Data] // Programmnye produkty i sistemy = Software and Systems. 2009. no. 3. Pp. 120–123 (in Russian)
10. Geger E.V., Podvesovskii A.G., Kuzmin S.A., Tolstenok V.P. Methods for the Intelligent Analysis of Biomedical Data // CEUR Workshop Proceedings of the 29th International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2019). Vol. 2485. Pp. 308–311.
11. Hamed R. Bonab, Fazli Can. A Theoretical Framework on the Ideal Number of Classifiers for Online Ensembles in Data Streams // 25th Conference on Information and Knowledge Management. ACM, New York. 2016. Pp. 2053–2056.
12. Kohonen T. The Self-Organizing Map // Proceeding of the IEEE. 1990. Vol. 78. Pp. 1464–1480.

**ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ  
ПЕРСОНАЛА**

**Мишенков Евгений Александрович**

Заместитель главного конструктора – начальник научно-конструкторского отдела,  
e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Малышев Александр Анатольевич**

Начальник научно-исследовательского отдела, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Кулагин Александр Васильевич**

Начальник группы, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Сагун Дмитрий Юрьевич**

Инженер, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

ФГУП «ВНИИА им. Н. Л. Духова» 127055, г. Москва, ул. Суцеская 22

**Аннотация.** В наше время крайне актуальна проблема промышленной безопасности на предприятиях. Техногенные катастрофы оказывают значительное негативное воздействие на все сферы. Анализ статистических данных аварий, наблюдавшихся на территории России, произошедших на различных объектах в последние десять лет, показал, что 60 % из них случились из-за ошибок персонала [7]. В статье рассматривается целесообразность разработки виртуального тренажера как инструмента для повышения квалификации и оценки эффективности обучения персонала. На основе системы виртуального моделирования и 3D-визуализации «Varco I-Space 4» CAVE и среды разработки Unity 3D Engine будет рассмотрен подход к созданию виртуального тренажера, принципы моделирования нештатных ситуаций, способы оценки эффективности обучения персонала.

**Ключевые слова:** моделирование аварийных ситуаций, Unity 3D, виртуальная реальность.

**Цитирование:** Мишенков Е.А., Малышев А.А., Кулагин А.В., Сагун Д.Ю. Подход к моделированию нештатных ситуаций с использованием виртуального тренажера для обучения персонала // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 99–110. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-08

**Введение.** Виртуальный тренажер это инструмент, который позволяет пользователю погрузиться в искусственный мир и непосредственно действовать в нем с помощью специальных сенсорных устройств, которые связывают его движения с аудиовизуальными эффектами. При этом зрительные, слуховые, осязательные и моторные ощущения пользователя заменяются их имитацией, генерируемой компьютером. Характерными признаками виртуальной реальности являются моделирование в режиме реального времени, имитация окружающей обстановки с высокой степенью реализма, а также возможность воздействовать на окружающую среду и иметь при этом обратную связь (виртуальная среда отзывается на действия пользователя). [8, 9]

Как известно, около 80 % информации человек воспринимает визуально [10], а усваивает 90 % полученной информации только при самостоятельном формулировании и решении проблемы [5]. Функциональность индивидуальных средств визуализации — мониторов — оказывается ограниченной в случаях, когда речь идет о визуализации для коллективной работы (многопользовательская визуализация). Как показывает практика, для подобных задач наилучшим образом подходят системы с «эффектом погружения», где изображение воспроизводится максимально реалистично, в 3D, на большом экране в масштабе 1:1, что позволяет работать с виртуальными 3D-моделями, практически аналогичными реально-существующим. Виртуальный тренажер позволяет визуализировать реалистичное изображение окружающей среды на основе уже существующей, используя фотограмметрию, или создавать по инженерному проекту (если такое «окружение» существует только «на бумаге») [4, 6].

Смоделировать аварийную ситуацию и провести обучение персонала для отработки действий в нештатной ситуации с использованием виртуального тренажера значительно проще, чем с реальными физическими объектами. При разработке виртуального тренажера в него можно заложить структуру для дальнейшего расширения функционала (масштабируемость виртуального тренажера), создать систему симуляции виртуальной системы (систему взаимозависимых объектов), функционал для оперативной замены элементов «исследуемого» объекта, конструкции (загружать файлы с внешнего носителя, без изменения программы запуска тренажера) [3]. Это позволит сделать тренажер более гибким инструментом для обучения. Также виртуальный тренажер можно использовать как систему по сбору статистических данных об эффективности проведения обучения. Виртуальный тренажер позволяет подготовить персонал к работе в любых ситуациях: от сложно воспроизводимых в обычных условиях до чрезвычайных, опасных для жизни и здоровья. Виртуальный тренажер – гибкий инструмент, он позволяет решать и другие задачи, связанные с виртуальным моделированием. Например, обеспечить эффективное взаимодействие с продуктом (изделием) на всех этапах жизненного цикла, повысить эффективность производства, эксплуатации и утилизации. Рассмотрим основные этапы жизненного цикла продукта (изделия) и роли виртуального моделирования в нем [1].

Предварительное проектирование.

1. Виртуальное моделирование изделия, процесса производства, процесса эксплуатации (максимально реалистичная работа с цифровым макетом, отказ от физических макетов на ранней стадии разработки).
2. Обсуждение компоновки с заказчиками, субподрядчиками и т. д. (вовлечение заказчика в постановку и корректировку ТТХ).
3. Анализ ремонтпригодности (сборки, разборки).
4. Виртуальный анализ эргономики в реальном времени (нет необходимости делать натурные макеты).
5. Визуальные коммуникации с субподрядчиками, заказчиками и т. д.

Планирование производства.

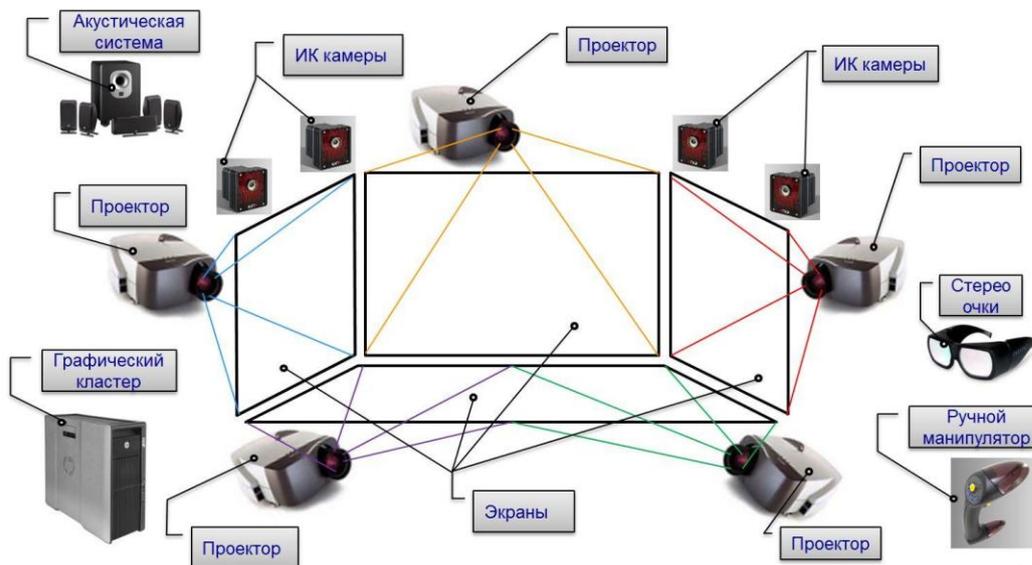
1. Максимально реалистичное представление данных и их увязка (разработчики, технологи, субподрядчики, заказчики).
2. Быстрые симуляторы отработки ручных процессов (симулятор сварки, заклепки, покраски и т. д.).

3. Визуальные коммуникации по общей компоновке процесса производства.
  4. Быстрое моделирование ручных операций и создание обучающих видеороликов.
- Эксплуатация.

1. Повышение эксплуатационных характеристик за счет моделирования (симуляции) работы изделия в различных контекстах эксплуатации.
2. Обучение сложным процессам эксплуатации (обучение персонала).
3. Обучающие видеоролики работы экспертов в реальном времени (в 10 раз быстрее ручной разработки).

**Система виртуального моделирования «Barco I-Space 4» CAVE.** Для погружения в виртуальную реальность используются различные технические средства, например, система виртуального моделирования и 3D визуализации «Barco I-Space 4» CAVE.

Эта система является аппаратной частью для создания виртуального тренажера. Система визуализации управляется многокластерной системой. ПК-мастер, отвечает за синхронизацию 5-ти кластеров, которые передают сигнал на проекторы рисунок 1. Проекторы выводят на стенки и пол комнаты изображение. Очки отсекают спектр изображения выводимого с проекторов для левого и правого глаза, тем самым формируют стереоизображение. Пользователь системы имеет возможность перемещаться по комнате. Отслеживание перемещения происходит с помощью инфракрасных датчиков, регистрирующих положение меток на очках. Перемещение аватара пользователя (виртуальная проекция пользователя) внутри виртуальной сцены и взаимодействие с объектами виртуальной сцены осуществляется с помощью пространственного манипулятора (аватар перемещает рабочую область «куб»). Перемещение меток на очках внутри рабочей зоны «куба» изменяет перспективу выводимого изображения на стенки системы.



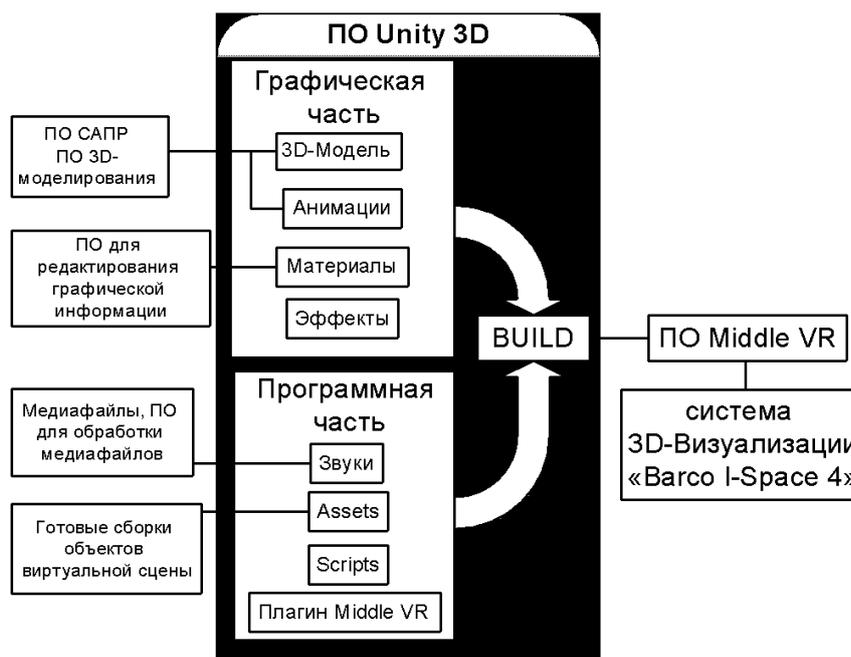
**Рис. 1.** Система виртуального моделирования «Barco I-Space 4» CAVE

Программная часть виртуального тренажера создается в программах для виртуального моделирования и разработки, таких как: Unreal Engine, Cryengine, Unity 3D Engine. Виртуальный тренажер, который будет рассмотрен в этой статье, создавался на основе ПО Unity 3D Engine (рисунок 2). Опираясь на техническое задание, описывается проект

виртуального тренажёра: требования к программной структуре (архитектуре), требования к объектам виртуальной сцены, сценарии работы виртуальной сцены.

В ПО Unity 3D Engine осуществлялось создание сценария работы виртуальной сцены, описывалась работа объектов виртуальной сцены и возможность взаимодействия с ними. Объект виртуальной сцены – внутрипрограммный компонент с совокупностью определенных графических, программных, звуковых свойств.

За объединение программой и аппаратной частей виртуального тренажера отвечает ПО Middle VR. Оно запускает скомпилированный программный продукт в системе виртуального моделирования и 3D-визуализации «Barco I-Space 4».



**Рис. 2.** Схематичное представление разработки виртуального тренажера для системы визуализации «Barco I-Space 4»

**Виртуальный тренажер.** В качестве демонстрации методов моделирования нештатных ситуаций рассмотрим тренажер для отработки навыков операторов робототехнического комплекса (РТК) МТК МФ4 (рисунок 3). Оператору (обучаемому) предстоит выполнить ряд действий по устранению чрезвычайной ситуации (ЧС) на АЭС, используя РТК для демонстрации навыков управления.

Сцена виртуального тренажера представляет собой энергоблок АЭС (рисунки 4,5,6,7). РТК по заданному сценарию необходимо открыть компенсатор давления для стабилизации давления в первичном контуре реактора (рисунок 7). На рисунках 4, 5, 6, 7 отмечен маршрут робота к вентилю (компенсатору давления), он располагается под лестничным пролетом.

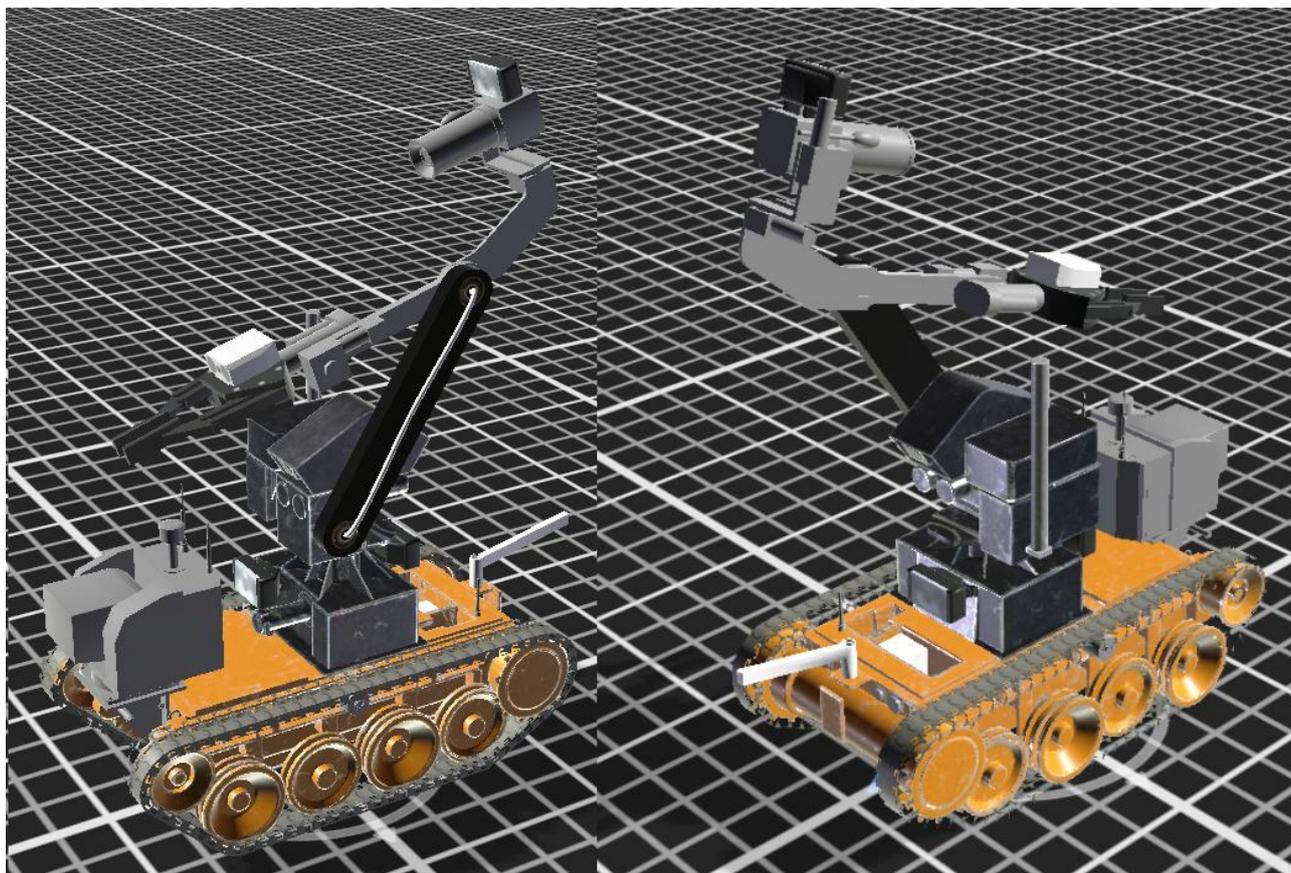


Рис. 3. Робот MF4

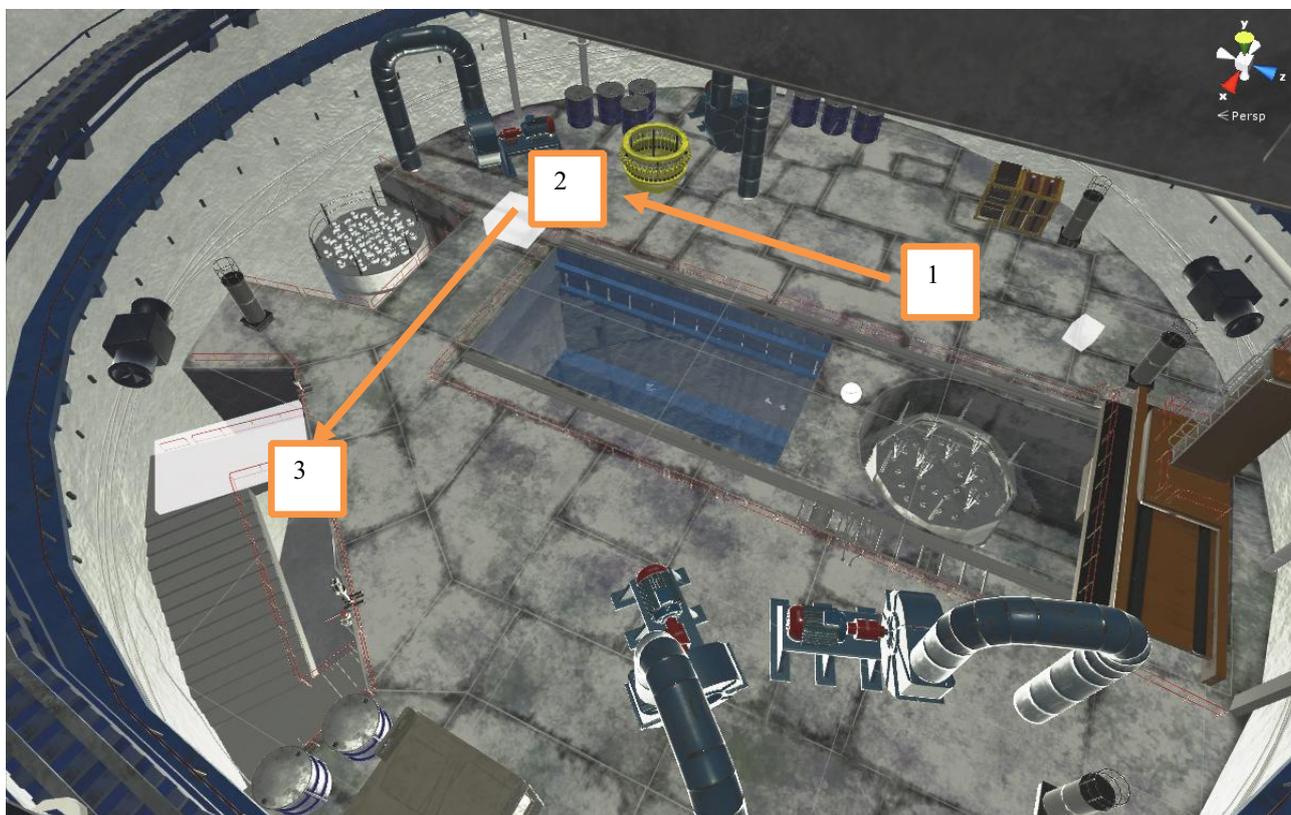


Рис. 4. Сцена виртуального тренажера , 1-2-3 маршрут

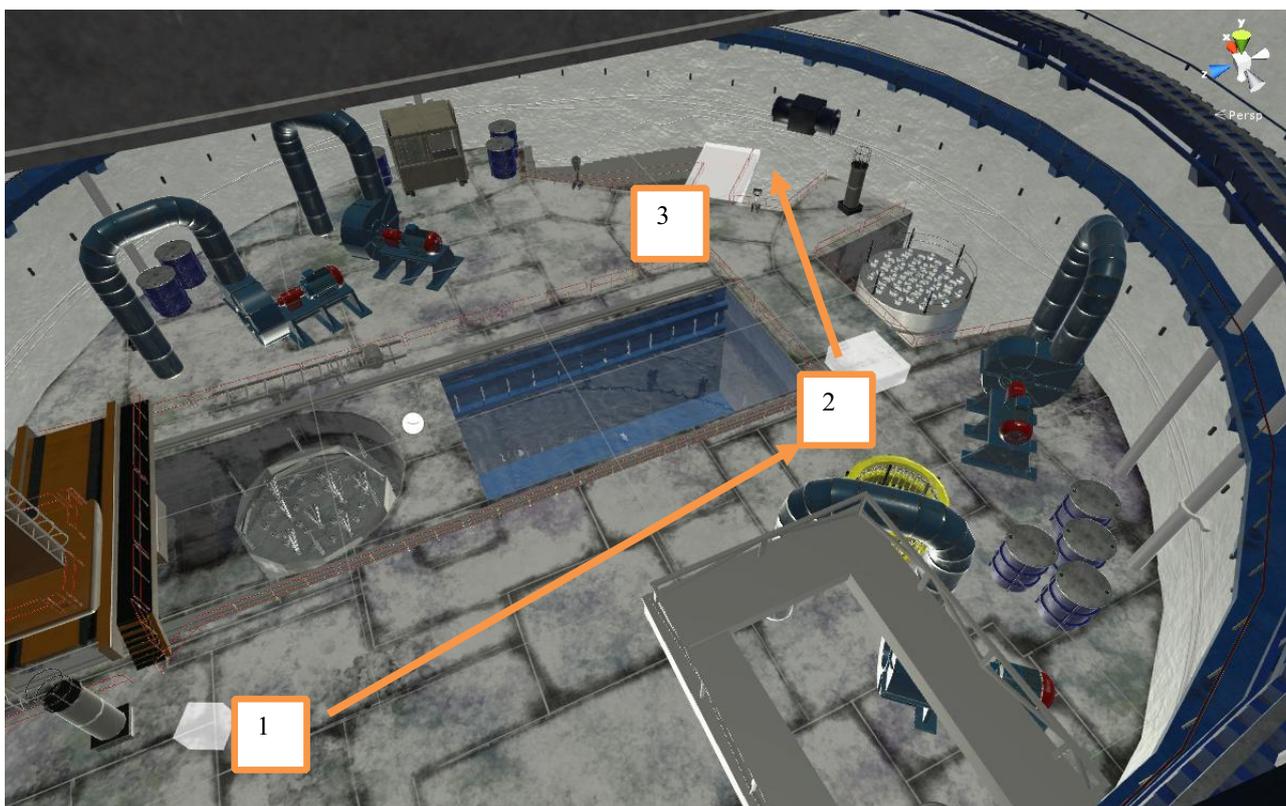


Рис. 5. Сцена виртуального тренажера , 1-2-3 маршрут

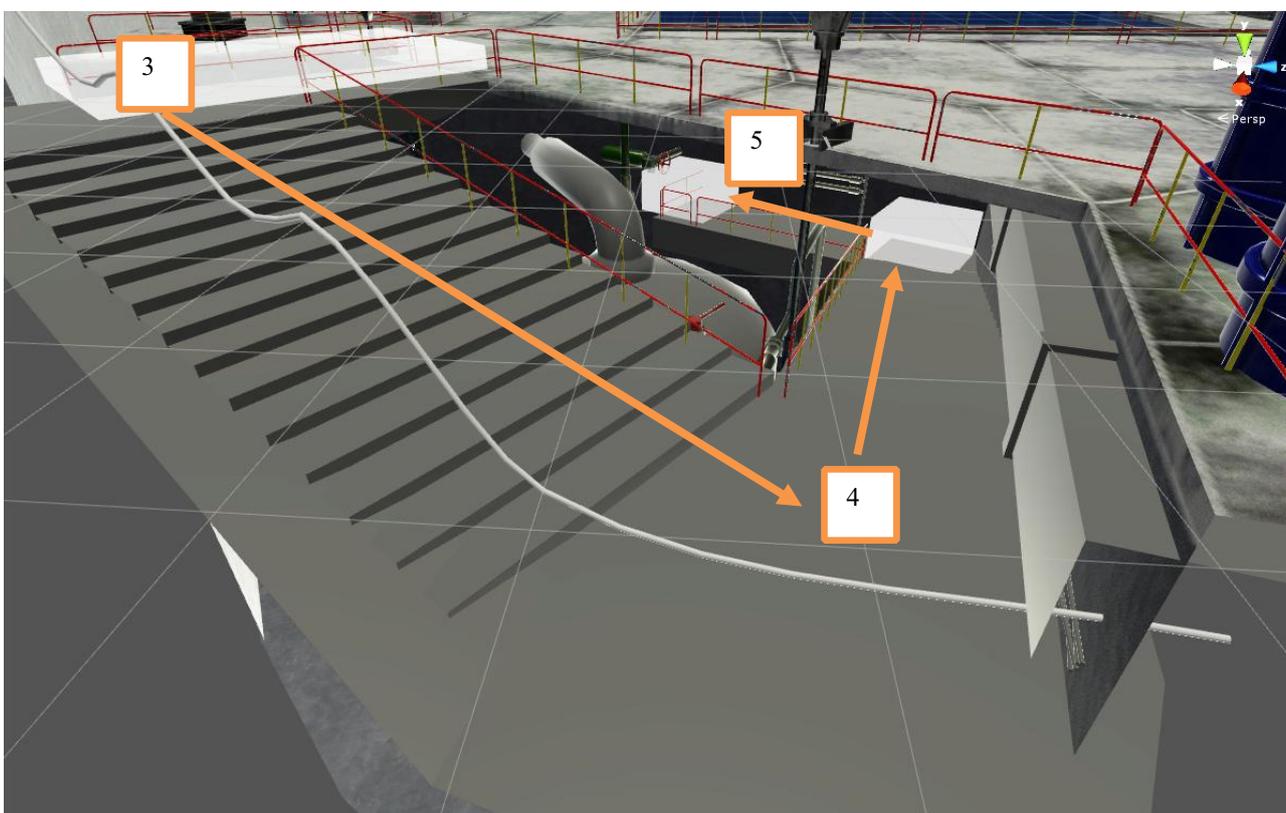


Рис. 6. Сцена виртуального тренажера, спуск к компенсатору давления, 3-4-5 маршрут

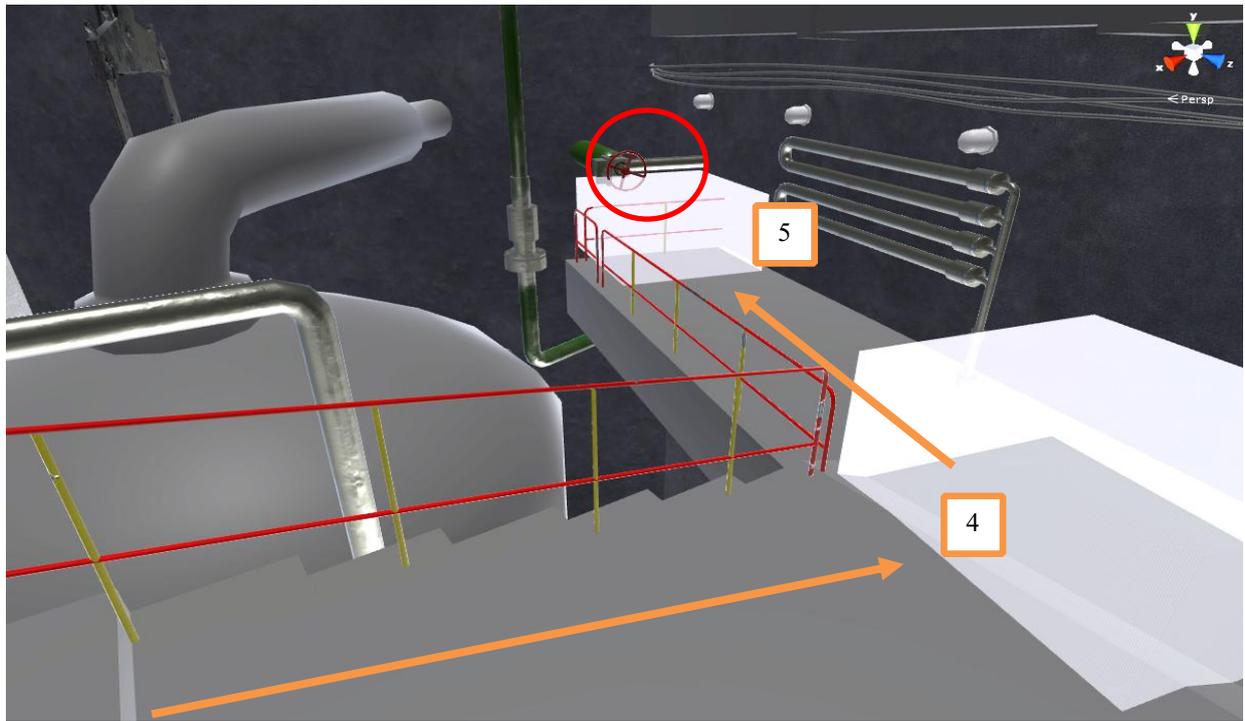


Рис. 7. Сцена виртуального тренажера, компенсатор давления, 3-4-5 маршрут

**Реализация управления.** После запуска виртуального тренажера экраны системы «Barco I-Space 4» визуализируют виртуальную сцену (рисунок 8). Проекторы выводят изображение в стереоформате относительно оператора, давая ему возможность перемещаться внутри системы визуализации для лучшего позиционирования РТК. Система визуализации прикреплена к РТК, при движении РТК движется и камеры виртуальной сцены.

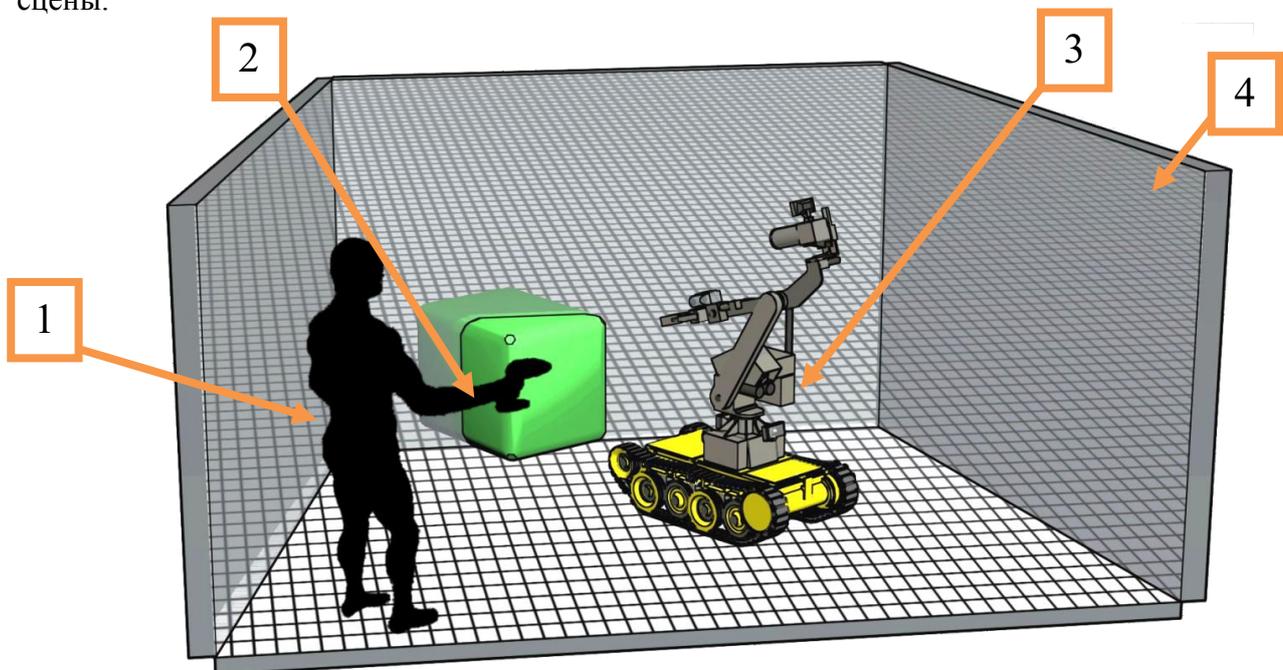


Рис. 8. Система визуализации, 1 – оператор РТК, 2 – объект виртуальной сцены, 3 – виртуальная модель РТК, 4 – система визуализации «Barco I-Space 4»

Оператор имеет возможность переключения в режим пульта управления, где он видит визуализацию реального пульта РТК (рисунок 9), изображение с камеры и другие данные, получаемые с РТК. Такой же набор данных оператор получает при реальном управлении роботом в реальной обстановке (скорость, радиация, угол наклона). Управление роботом РТК осуществляется с помощью подключаемого джойстика, который имитирует работу реального пульта управления роботом.

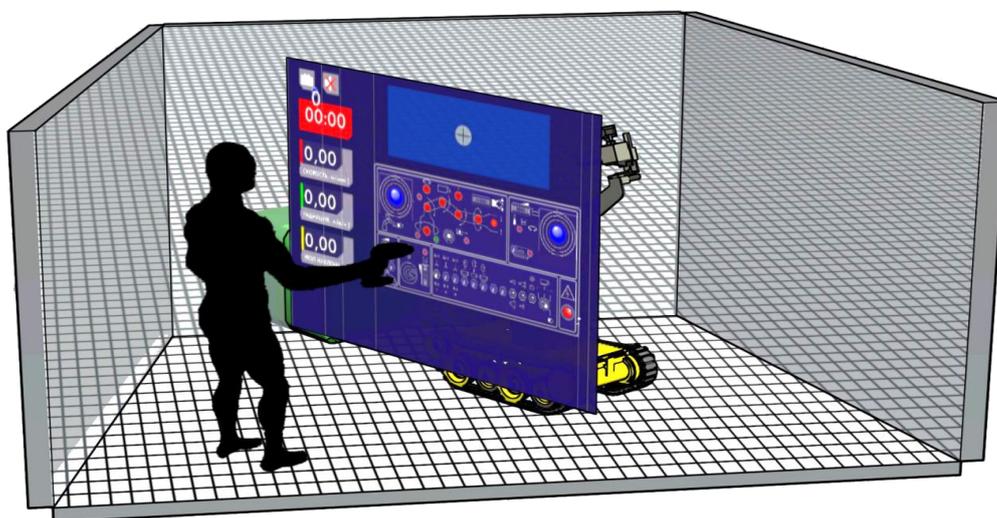


Рис. 9. Визуализация реального пульта управления

**Моделирование нештатной ситуации.** Следуя разработанному сценарию, оператор РТК начнет движение по разработанному маршруту, но на его пути возникает незапланированная (нештатная) преграда в виде груды свалившихся предметов (бочек, рисунок 10). Ситуация считается нештатной потому что она не представлена оператору в описании сценария. Оператору предстоит решить эту задачу, используя РТК: разобрать грудку бочек или найти обходной маршрут. Моделирование других нештатных ситуаций поможет повысить эффективность обучения операторов. Собирая статистику по результатам выполнения сценария, виртуальный тренажер оценивается эффективность обучения операторов.

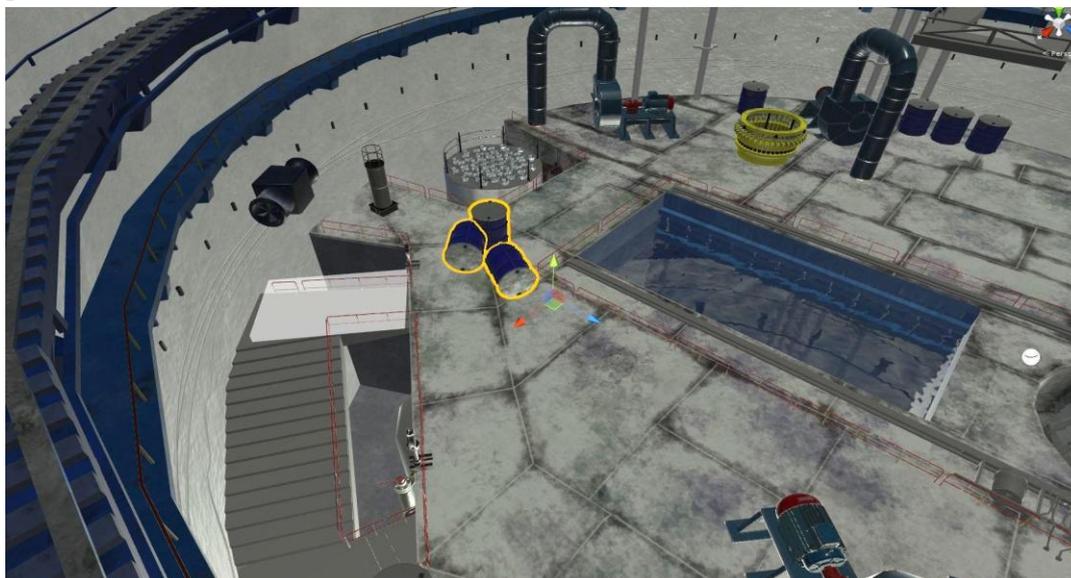


Рис. 10. Нештатная ситуация, обвал груды бочек

**Способы повышения эффективности обучения.** Оценка эффективности обучения можно рассматривать как с точки зрения тренажера (оценивать эффективность обучающего устройства), так и оператора (оценивать показатели по результатам прохождения обучения на тренажере) [2].

При разработке виртуального тренажера приходится прибегать к некоторым упрощениям (условностям): симуляции физики поведения виртуальных объектов, внешнего вида объектов виртуальной сцены, реализации управления виртуальной проекцией пользователя внутри виртуальной сцены, вывод информации на экран по средствами интерфейса. Интуитивность систем управления и интерфейса напрямую влияет на эффективность обучения. Опрос операторов (обучающихся) после прохождения обучения поможет повысить интуитивности интерфейса и системы управления по средствам внесения необходимых корректировки в виртуальный тренажер. Упрощения симуляции физики и визуализации необходимы для достижения необходимой частоты кадров. Необходимый и достаточный уровень детализации объектов (возможность анимации механизмов, физического взаимодействия) виртуальной сцены определяется на этапе формирования виртуального тренажера и может корректироваться в зависимости от потребностей для обучения или при получении отзыва от обучаемого.

В таблице 1 представлена информация по разработанному тренажеру.

**Таблица 1.** Оценка интуитивности обучения

оператор	интуитивность управления	визуализация окружения	интуитивность интерфейса
1	можно разобраться	достаточная детализация	можно разобраться
2	не интуитивно	достаточная детализация	понятен
3	не интуитивно	достаточная детализация	не понятен

Проанализировав таблицу можно прийти к выводу о том, что у операторов РТК возникали проблемы восприятием интерфейса и использованием управления. Эти элементы требуют доработки для повышения эффективности обучения. Вид от третьего лица помогает лучше позиционировать работа в пространстве, позволяя оператору лучше понимать габариты РТК.

Оценить эффективность обучения оператора можно через сбор и обработку статистических данных по результатам прохождения обучения на виртуально тренажере. Можно оценивать скорость прохождения этапов, скорость реакции на нештатную ситуацию (умение за максимально короткое время разобраться и найти выходы из нештатной ситуации), отклонения от намеченного маршрута, навыки управления техникой (касание преград, предельные углы наклона техники, уровень затопления техники).

В рассмотренном виртуальном тренажере обучающая программа фиксировала следующие параметры:

- время прохождения (время за которое робот, управляемый оператором РТК, доберется к компенсатору давления и вернется в стартовую позицию);
- моделируемая нештатная ситуация (Наличие нештатной ситуации в обучении);
- навыки управления РТК (контроль касания преград роботом).

В таблице 2 представлен результат спора статистики по виртуальному тренажеру. Предполагается, что оператор должен выполнять такое задание за 15 минут. Оператор

проходит задание 3 раза, во второй и третьей попытке присутствует моделируемая нештатная ситуация.

**Таблица 2.** Информация о тестировании операторов

оператор	попытка, №	нештатная ситуация*	время прохождения, мин	касание преград
1	1	-	12:20	-
	2	+	14:50	+
	3	+	13:10	+
2	1	-	11:40	+
	2	+	14:30	+
	3	+	13:20	+
3	1	-	14:10	-
	2	+	18:00	+
	3	+	14:30	+

\* - обвал груды бочек во время следования по маршруту

Моделируемая нештатная ситуация оказала влияние на время прохождения маршрута и аккуратность прохождения (были зафиксированы нежелательные соприкосновения робота с объектами виртуальной сцены, что могло бы привести к повреждениям робота в реальной эксплуатации).

Количество моделируемых нештатных ситуаций можно увеличить путем опроса операторов (на основе опыта проведения реальных операций), анализа места отработки (моделирование возможных нештатных ситуаций учитывающих моделируемую местность). На основе таких данных можно смоделировать дерево разветвленных событий (нештатных ситуаций). Используя данные по возможным нештатным ситуациям, при запуске сцены в автоматическом режиме программа виртуального тренажера создаст уникальный сценарий миссии для прохождения обучения.

**Заключение.** Виртуальные тренажеры можно также эффективно использовать для приобретения профессиональных навыков и знаний, обучению работе с оборудованием, управлению техникой, отработке ситуационно-поведенческих моделей.

Использование виртуальных тренажеров позволяет выработать **устойчивые** навыки работы в ситуациях, которые сложно либо невозможно воспроизвести в ходе обычной подготовки, а также выработать склонность к анализу при нестандартных ситуациях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексунин В.А. Маркетинг: Краткий курс. М.: ИТК «Дашков и К». 2007.
2. Березянский И.М. Проблемы статистического анализа результатов экспериментального исследования эффективности применения современных педагогических технологий // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Психология и педагогика. 2012. С. 138–144.
3. Вавилова Н.И. Проектирование виртуальных тренажеров. 2012. Режим доступа: <https://ckto.narod.ru/stvirttr> (дата обращения 10.06.2019)
4. Вигер И. Виртуальная реальность в промышленности. 2016. Режим доступа: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/6568.pdf> (дата обращения 10.06.2019)

5. Моисеева С.О., Денисенко В.И. Проблемы документального обеспечения проекта // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2012. № 1. Режим доступа: <http://ekonomika.snauka.ru/2012/01/347> (дата обращения 10.06.2019)
  6. Образцов И.В., Белов В.В. Виртуальные тренажеры в практике технического образования. 2012. Режим доступа: <https://cdokp.tstu.tver.ru> (дата обращения 10.06.2019)
  7. Техногенная опасность, источники и факторы. Ташкент, Республика Узбекистан. Ташкентский государственный педагогический университет. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnogennaya-opasnost-istochniki-i-factory> (дата обращения 10.06.2019)
  8. Шарго И.Л. Тренажеры для обучения управлению промышленными объектами. Режим доступа: <https://promved.ru/article/article.phtml?id=1749&nomer=61> (дата обращения 10.06.2019)
  9. VR-тренажеры для подготовки кадров. Режим доступа: <http://vrtech.ru/industrialnyie-resheniya/> (дата обращения 10.06.2019)
  10. Marks W.B., Dobbie W.H., MacNichol E.F. Visual pigments of single primate cones // Science (1964) 143: Pp. 1181–1183.
- 

## **APPROACH TO MODELING NON-STANDING SITUATIONS USING A VIRTUAL SIMULATOR TO TRAIN PERSONNEL**

**Evgenii A. Mishenlov**

Deputy Chief Designer – Head of Research Department,

e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Aleksander A. Malyshev**

Head of Research Department, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Aleksander V. Kulagin**

Head of Team, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

**Dmitry Ur. Sagun**

Engineer, e-mail: [dc@vniia.ru](mailto:dc@vniia.ru)

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA)

22, Sushevskaya Str., 127055, Moscow, Russia

**Abstract.** In our time, the problem of industrial safety is especially common in enterprises. Man-made disasters have a significant negative impact on all areas. Analysis of the statistical data of accidents observed on the territory of Russia that occurred at various facilities in the last ten years, showed that 60% of them occurred due to personnel errors [1]. A virtual simulator can be used to improve the skills and evaluate the effectiveness of staff training. The report discusses the possibility of training and ways to assess the effectiveness of staff training using a virtual simulator implemented on the basis of the VE CAVE system using the Unity 3D Engine. The approach to the creation of the virtual simulator structure is considered. The principle of collecting and processing statistics for staff development is considered.

**Keywords:** Emergency Simulation, Unity 3D Engine, virtual reality.

### References

1. Aleksunin V.A. Marketing: Kratkiy kurs [Marketing: Short Course]. Moscow. Izdatel'sko-torgovaya korporatsiya "Dashkov i K" = ITK Dashkov&K. 2007. (in Russian)
2. Berezyansky I.M. Problemy statisticheskogo analiza rezul'tatov eksperimental'nogo issledovaniya effektivnosti primeneniya sovremennykh pedagogicheskikh tekhnologiy [Problems of statistical analysis of the results of an experimental study of the effectiveness of modern pedagogical technologies] // Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Psikhologiya i pedagogika = RUDN Journal of Psychology and Pedagogics. 2012. Pp. 138–144. (in Russian)
3. Vavilova N.I. Proyektirovaniye virtual'nykh trenazherov [Designing virtual simulators]. 2012. Available at: <https://ekto.narod.ru/stvirttr> (accessed 10.06.2019) (in Russian)
4. Viger I. Virtual'naya real'nost' v promyshlennosti [Virtual reality in industry]. 2016. Available at: <https://controleng.ru/wp-content/uploads/6568.pdf> (accessed 10.06.2019) (in Russian)
5. Moiseeva S.O., Denisenko V.I. Problemy dokumental'nogo obespecheniya proyekta [Problems of documentary support of the project] // Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologiy = Economics and management of innovative technologies. 2012. № 1. Available at: <http://ekonomika.snauka.ru/2012/01/347> (accessed 10.06.2019) (in Russian)
6. Obraztsov I.V., Belov V.V. Virtual'nyye trenazhery v praktike tekhnicheskogo obrazovaniya [Virtual simulators in the practice of technical education]. 2012. Available at: [cdokp.tstu.tver.ru](http://cdokp.tstu.tver.ru) (accessed 10.06.2019) (in Russian)
7. Tekhnogennaya opasnost', istochniki i faktory [Technogenic danger, sources and factors]. Tashkent, Republic of Uzbekistan. Tashkent State Pedagogical University. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnogennaya-opasnost-istochniki-i-factory> (accessed 10.06.2019) (in Russian)
8. Shargo I.L. Trenazhery dlya obucheniya upravleniyu promyshlennymi ob'yektami. [Simulators for training in the management of industrial facilities]. Available at: <https://proved.ru/article/article.phtml? Id = 1749 & nomer = 61> (accessed 10.06.2019) (in Russian)
9. VR-trenazhery dlya podgotovki kadrov [VR-simulators for training personnel]. Available at: <http://vrtech.ru/industrialnyie-resheniya/> (accessed 10.06.2019) (in Russian)
10. Marks W.B., Dobbie W.H., MacNichol E.F. Visual pigments of single primate cones // Science (1964) 143: Pp. 1181–1183.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ПОСТРАДАВШИХ ОТ ХРОНИЧЕСКОЙ РТУТНОЙ ИНТОКСИКАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Дьякович Марина Пинхасовна

Д.б.н., профессор, e-mail: [marinapinhas@yandex.ru](mailto:marinapinhas@yandex.ru)

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований»,  
665827, Ангарск, 12а микрорайон, 3, Россия

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Ангарский государственный технический университет»,  
665835, Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия

**Аннотация.** Предложен подход к разработке управляемой модели динамики состояния здоровья и связанного со здоровьем качества жизни пациентов с хронической ртутной интоксикацией при использовании традиционное медикаментозное лечение, дополненное нейрореабилитационной технологией (БОС-тренингом). Ставится и численно решается задача оптимального управления с целью улучшения состояния здоровья и качества жизни таких пациентов. Приводятся результаты численных экспериментов, сценарии изменений и оптимальные режимы при различных начальных состояниях. Полученные результаты позволяют оценить затраты на медикаментозное лечение и реабилитационный БОС-тренинг в зависимости от экспозиционной ртутной нагрузки, обуславливающей тяжесть заболевания, а также выявить динамику состояния здоровья пациентов при возможном изменении управляющих воздействий с учетом ограниченности денежных ресурсов. Обосновывается вектор дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** динамическая управляемая модель, профессиональная патология, хроническая ртутная интоксикация, экспозиционная ртутная нагрузка, численные эксперименты.

**Цитирование:** Дьякович М.П. Моделирование состояния здоровья пострадавших от хронической ртутной интоксикации на производстве // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 111–121. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-09

**Введение.** Продолжительное время в СССР и России основным направлением в развитии производства хлора и каустической соды высокой степени чистоты был ртутный электролиз. Это объяснялось целым рядом причин и в первую очередь большой мощностью единичного электролизера, возможностью изменения токовой нагрузки в широких пределах, высоким качеством каустической соды [11]. Однако основным недостатком этого метода являлось загрязнение производственной и окружающей среды высокотоксичными соединениями ртути. К настоящему времени, этот способ производства прекращен. В Иркутской области одно предприятие полностью закрыто, в другом с 2006 г. осуществлен переход к мембранному методу, так как он более экономичен, более безопасен для окружающей среды и дает возможность получить конечный продукт более высокого

качества. В воздух рабочей зоны химических предприятий Иркутской области с 70-х годов прошлого века в концентрациях, значительно превышающих гигиенические нормативы, поступала ртуть, поэтому у работников химических предприятий широкое распространение получила хроническая ртутная интоксикация (ХРИ) профессионального генеза. Ртуть и через много лет после этого выявляется в биосредах (кровь, волосы) у работников этих цехов [10], а лица, пострадавшие от воздействия ртути на производстве, имеют стойкую утрату трудоспособности и являются постоянными пациентами клиники профзаболеваний и лечебных учреждений по месту своего проживания.

ХРИ имеет широкий спектр клинических проявлений со стороны неврологической, желудочно-кишечной и мочевыделительной систем, кожи. Пациенты с ХРИ демонстрируют дегенеративные неврологические состояния, аутоиммунные заболевания, а также метаболические и митохондриальные нарушения [12,1,7]. Указанное безусловно может сказываться на их качестве жизни [14]. Было зафиксировано значительное снижение связанного со здоровьем качества жизни (СЗКЖ) лиц, пострадавших от ХРИ, в сравнении с таковым в общей популяции мужчин и здоровых работников, контактирующих с ртутью на производстве [3]. Экспозиционная ртутная нагрузка (ЭРН) определяла высокий риск развития ХРИ у работников, а в постконтактном периоде - ухудшение психического и соматического здоровья, снижающих качество жизни пострадавших [5].

Более 95% пострадавших вследствие токсического поражения нервной системы в Иркутской области - это лица с ХРИ, причем у трети пострадавших, несмотря на обязательное выполнение реабилитационных мероприятий, отмечается утяжеление заболевания. Хотя ежегодно 100% пострадавших получают необходимые медицинские препараты, 80% - санаторно-курортное лечение, доля лиц с инвалидностью 2 группы, малоперспективных для медико-социальной реабилитации, растет при нулевом показателе реабилитации [9]. Для повышения эффективности реабилитации пациентов с ХРИ медикаментозную терапию следует сочетать с применением гидропроцедур, ультрафиолетового облучения, лечебной физкультуры и психотерапии. В клинике профессиональных заболеваний ВСИМЭИ была разработана инновационная медицинская технология, которая с учетом степени выраженности патологического процесса интегрирует медикаментозное лечение и биоуправление с биологической обратной связью (БОС). Последнее включает аутогенную тренировку для расслабления мышц,  $\alpha$  - стимулирующий тренинг с музыкальным сопровождением и элементы психотерапии [6].

Выявленное прогрессирование органического поражения психики, дегенеративных изменений пищеварительной, эндокринной и сердечно-сосудистой системах в постконтактный период ХРИ [4] обуславливают важность поиска эффективных методов управления реабилитационным процессом пациентов. Указанное определило актуальность изучения динамики здоровья и СЗКЖ пациентов с ХРИ, получающих медикаментозное лечение, дополненное БОС – тренингом. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что описание моделей и алгоритмов, решающих задачи прогнозирования изменения состояния здоровья и СЗКЖ пациентов с профессиональной патологией при использовании определенных медицинских технологий с учетом эндогенных и экзогенных факторов отсутствует. В то же время в литературе описано применение динамического моделирования с оптимальным управлением в решении медицинских задач. Разработана и численно решена задача оптимального управления динамикой ВИЧ-инфекции [2], известны динамические

модели с оптимальным управлением при изучении экономической эффективности мер профилактики малярии [13], поиска перспективной стратегии лечения онколитическими вирусами опухолевого процесса [15]. Таким образом, предпринятое исследование, заключающееся в разработке динамической модели с оптимальным управлением с целью улучшения состояния здоровья и качества жизни пациентов с ХРИ, отличается новизной.

Методология динамического моделирования позволяет просчитать возможные последствия разных вариантов развития событий, прогнозировать на основе анализа текущей ситуации сценарии развития после внесения возмущения, определять возможные эффекты, давать рекомендации по оптимальным вариантам управления процессом. К переменным динамической модели относятся такие величины, которые могут влиять друг на друга и согласованно изменяться под действием внешних воздействий во время изучения объекта. Параметрами модели являются коэффициенты описывающих ее уравнений. При этом термин «параметр модели» отличается от принятого в медицине аналогичного термина, под которым понимается любая количественная характеристика состояния организма или его систем.

Разработка динамической модели, представленной в данной работе, осуществлялась совместно с к.ф.-м.н. Е.П. Бокмельдер.

**1. Постановка задачи.** На первом этапе динамического моделирования были сформулированы качественные и количественные закономерности, описывающие основные характеристики объекта с привлечением знаний о структуре и характере функционирования рассматриваемого объекта, его свойствах и проявлениях. Этап завершился созданием качественной (описательной) модели объекта. Собственные исследования определили включение в динамическую модель в качестве объясняющих параметров экспозиционную ртутную нагрузку, приводящую к накоплению ртути в организме, и детерминирующую тяжесть профессионального заболевания, а также социально-психологические характеристики пациента в течение его реабилитации. Переменная  $x(t)$  описывает состояние здоровья (объективный показатель, оцениваемый клинически), а  $y(t)$  - СЗКЖ, оцениваемое в момент времени  $t$ , Обе переменные измеряются в удельных процентах, т.е.  $0 \leq x(t) \leq 1$  и  $0 \leq y(t) \leq 1$ . При этом  $x(0) = x_s$  и  $y(0) = y_s$  - состояния в начальный момент времени при определенной величине ЭРН-  $s$  с градациями величины, определяемые как высокая, средняя и низкая. Управление процессом реабилитации в модели происходило в двух направлениях:  $u_1(t)$  - материальные средства (в рублях) на медикаментозное лечение и  $u_2(t)$ - на проведение реабилитационной технологии в момент времени  $t$ .

Задача оптимального управления состоит в минимизации функционала, который отражает стремление улучшить состояние здоровья и СЗКЖ при одновременной экономии затрачиваемых материальных средств

$$J = \int_0^T (q_1 \cdot (1 - x(t))^2 + q_2 \cdot u_1(t) + q_3 \cdot u_2(t) + q_4 (1 - y(t))^2) \cdot dt \quad (1),$$

когда переменные  $x(t)$  и  $y(t)$  удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} x'(t) = -\alpha_1 e^{-\varepsilon_1 t} x(t)(1 - x(t)) + (\beta_1 (1 - e^{-\varepsilon_2 t}) + \gamma_1 (1 - e^{-\varepsilon_1 t})) \cdot x(t)(1 - y(t)) \\ y'(t) = -\alpha_2 e^{-\varepsilon_3 t} (1 - x(t))(1 - y^2(t)) + (\beta_2 (1 - e^{-\varepsilon_4 t}) + \gamma_2 (1 - e^{-\varepsilon_3 t})) (1 - y(t))y(t) \end{cases} \quad (2)$$

с начальными условиями  $x(0) = x_s$ ,  $y(0) = y_s$ , и бюджетными ограничениями на управления  $0 \leq u_1 \leq a$ ,  $0 \leq u_2 \leq b$ . Здесь  $a$  и  $b$  - максимальные затраты, которые лечебное учреждение может позволить потратить на медикаментозное лечение и использование реабилитационной технологии, соответственно;  $t$  - время, в течение которого проводятся лечебных и реабилитационных процедур; коэффициенты  $q_1, q_2, q_3, q_4$  уравнивают масштаб измерения состояния здоровья и затрат на лечение и реабилитацию;  $\alpha_1 > 0$ ,  $\alpha_2 > 0$  - доли темпа ухудшения здоровья и СЗКЖ в течение года без лечения,  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 > 0$  - доли улучшения состояния здоровья и СЗКЖ в течение года при применении БОС-технологии,  $\gamma_1 > 0$ ,  $\gamma_2 > 0$  - доли темпа улучшения состояния здоровья и СЗКЖ в течение года при медикаментозном лечении;  $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_3 > 0$  - коэффициенты, отвечающие за эффективность влияния медикаментозного лечения на состояние здоровья и СЗКЖ, соответственно, а  $\varepsilon_2 > 0$ ,  $\varepsilon_4 > 0$  - коэффициенты, отвечающие за эффективность влияния БОС-технологии на состояние здоровья и СЗКЖ, соответственно. Производные по времени  $x'(t)$  и  $y'(t)$  характеризуют скорость изменения состояния здоровья и СЗКЖ.

В системе уравнений учтено взаимное влияние состояния здоровья и СЗКЖ друг на друга, исходя из представлений о качестве жизни как оценке параметров, позволяющих дифференцированно определить влияние болезни и лечения на психологическое, эмоциональное состояние больного, его социальный статус [8]. Если не использовать БОС-тренинг и не учитывать его положительного влияния на СЗКЖ, что было показано в [10], то состояние здоровья  $x(t)$  будет удовлетворять уравнению:

$$x'(t) = -\alpha_1 \cdot e^{-\varepsilon_1 t} (1 - x(t)) x(t)', \quad x(0) = x_s \quad (3)$$

С учетом того, что  $\alpha_1 \cdot e^{-\varepsilon_1 t} = a = const > 0$ , результатом решения этого уравнения будет:

$$\frac{x'}{(1-x)x} = -a \Rightarrow \frac{x'}{1-x} + \frac{x'}{x} = -a \Rightarrow \ln \frac{x}{1-x} = -at + c \Rightarrow \frac{x}{1-x} = Ae^{-at} \quad (4)$$

С учетом начального условия  $x(t) = \frac{Ae^{-at}}{1 + Ae^{-at}}$ , где  $A = \frac{x_s}{1 - x_s}$  (5)

Таким образом, выполнены ограничения  $0 < x(t) < 1$  и состояние здоровья ухудшается:  $x(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty$ .

С другой стороны, если бы на СЗКЖ не влияло здоровье, то можно было повлиять на СЗКЖ только применением БОС-технологии  $y(t)$ , которое в этом случае будет удовлетворять уравнению:

$$y'(t) = (\beta_2 \cdot (1 - e^{-\varepsilon_4 t_2}) + \gamma_2 \cdot (1 - e^{-\varepsilon_3 t_1})) \cdot (1 - y(t)) \cdot y(t), \quad y(0) = y_s \quad (6)$$

Полагая  $\beta_2 \cdot (1 - e^{-\varepsilon_4 t_2}) + \gamma_2 \cdot (1 - e^{-\varepsilon_3 t_1}) = k = const > 0$ , мы можем решить это уравнение. Получим:

$$\frac{y'}{(1-y)y} = k \Rightarrow \frac{y'}{1-y} + \frac{y'}{y} = k \Rightarrow \ln \frac{y}{1-y} = kt + c \Rightarrow \frac{y}{1-y} = Be^{kt} \quad (7)$$

С учетом начального условия, имеем  $y(t) = \frac{Be^{kt}}{1 + Be^{kt}}$ , где  $B = \frac{y_s}{1 - y_s}$  (8)

Таким образом, выполнены ограничения  $0 < y(t) < 1$  и СЗКЖ улучшается:  $y(t) \rightarrow 1, t \rightarrow \infty$ .

В представленной модели ситуация идеализирована, так как предполагается, что использование БОС-технологии и медикаментозного лечения, поступление материальных потоков в клинику профессиональных заболеваний на реализацию указанных методов происходят в течение года непрерывно.

**2. Основные результаты.** При помощи программного пакета OPTCON-I, разработанного д.т.н. А.Ю. Горновым, реализующего многофункциональную технологию решения задач оптимального управления, были проведены идентификация модели и уточнение значений параметров. Далее анализировались различные сценарии поведения оптимального решения в зависимости от начальных условий и от временного промежутка проведения лечения.

В численных экспериментах управления были ограничены условиями:  $0 \leq u_1 \leq 18000$ ,  $0 \leq u_2 \leq 12000$ , использованы следующие значения параметров:  $q_1 = 1 \cdot 10^4$ ;  $q_2 = 0,35$ ;  $q_3 = 0,5$ ;  $q_4 = 1,6 \cdot 10^4$ ;  $\alpha_1 = 0,1$ ;  $\alpha_2 = 0,2$ ;  $\beta_1 = 0,2$ ;  $\beta_2 = 0,3$ ;  $\gamma_1 = 0,3$ ;  $\gamma_2 = 0,4$ ;  $\varepsilon_1 = 1,512 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_2 = 1,3 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_3 = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_4 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ .

Границы управлений определялись затратами на медикаментозное лечение и на реабилитацию на одного больного в год в денежном выражении. В результате численных экспериментов значения коэффициентов, определенные ранее из их содержательного смысла, корректировались. Целевой функционал выражался в условных единицах, он представлял собой сумму произведений переменных, отражающих затраты, состояние здоровья и СЗКЖ и соответствующих масштабирующих коэффициентов.

Результаты численных экспериментов показаны на рисунках, на которых зеленая кривая  $x(t)$  – состояние здоровья, синяя  $y(t)$  – СЗКЖ, оранжевая  $u_1(t)$  – затраты на медикаментозное лечение, лиловая  $u_2(t)$  – материальные затраты на применение БОС-технологии.

В ходе численных экспериментов были рассмотрены следующие сценарии:

1. «Низкий» (без оптимизации). Рассматривался при нулевых управлениях и начальных состояниях  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$  (рис. 1.). Состояние пациента быстро ухудшается при отсутствии лечения. Здесь  $J=1006905.4$ , т.е. ущерб очень велик.
2. «Средний» (с оптимизацией), без использования БОС-технологии,  $u_2(t) = 0$  (рис. 2). Здесь состояние медленно улучшается, но при условии использования всех имеющихся материальных средств на медикаментозное лечение ( $u_1 = 18000$ ,  $J=246665.2$ ).
3. «Высокий» (с оптимизацией). Сценарий рассматривался для трех градаций величины ЭРН, имеющейся у пациентов:

При высокой ЭРН, т.е. при малых начальных состояниях  $x_s = 0.37$ ,  $y_s = 0.35$ , состояния улучшаются (рис. 2), но расходы материальных средств велики -  $J=150755.1$ . При средней ЭРН, т.е. при начальных состояниях  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$ , состояния также улучшаются (рис. 3), и расходы материальных средств становятся в 2 раза меньше -  $J=73962.7$ . При низкой ЭРН, т.е. при начальных состояниях,  $x_s = 0.8$ ,  $y_s = 0.75$  состояния также улучшаются (рис. 4), и расходы материальных средств становятся в 5 раз меньше,  $J=28691,9$ . На графиках единицы измерения для  $x(t)$  и  $y(t)$  - доли единицы, для  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$  - рубли.

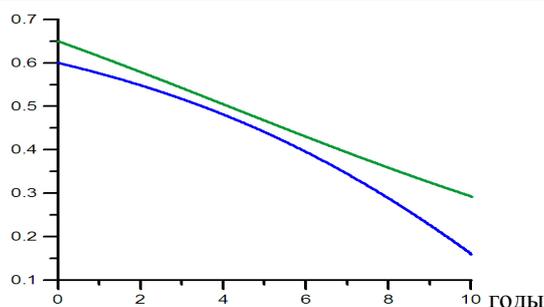


Рис. 1 Траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  при начальных состояниях  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$  и управлениях  $u_1 = 0$ ,  $u_2 = 0$ .

Примечание:  $x(t)$  - линия здоровья (верхняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (нижняя, синяя)

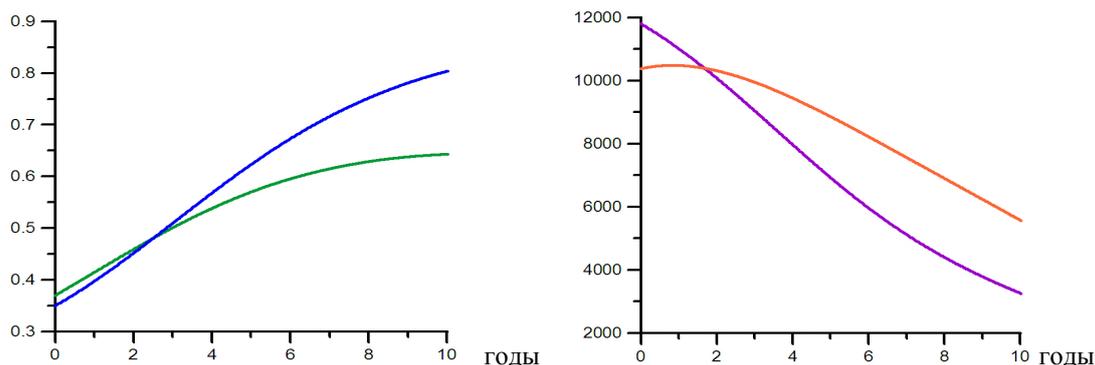


Рис. 2: Оптимальные траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$

и управляющих воздействий  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  при высокой экспозиционной ртутной нагрузке:

$$x_s = 0.37, \quad y_s = 0.35$$

Примечание: график слева  $x(t)$  - линия здоровья (нижняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (верхняя, синяя), график справа  $u_1(t)$  - затраты на медикаментозное лечение (верхняя, оранжевая),  $u_2(t)$  - материальные затраты на применение БОС-технологии (нижняя, лиловая).

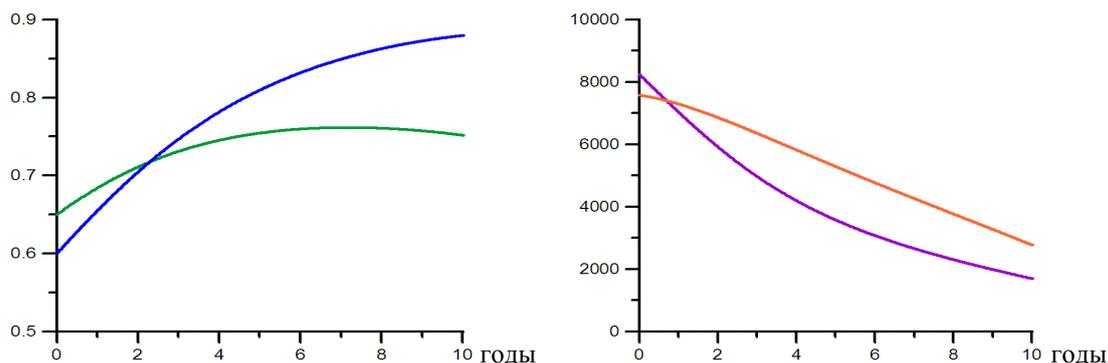


Рис. 3: Оптимальные траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  и управлений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  при средней экспозиционной ртутной нагрузке:  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$

Примечание: график слева  $x(t)$  - линия здоровья (нижняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (верхняя, синяя), график справа  $u_1(t)$  - затраты на медикаментозное лечение (верхняя, оранжевая),  $u_2(t)$  - материальные затраты на применение БОС-технологии (нижняя, лиловая).

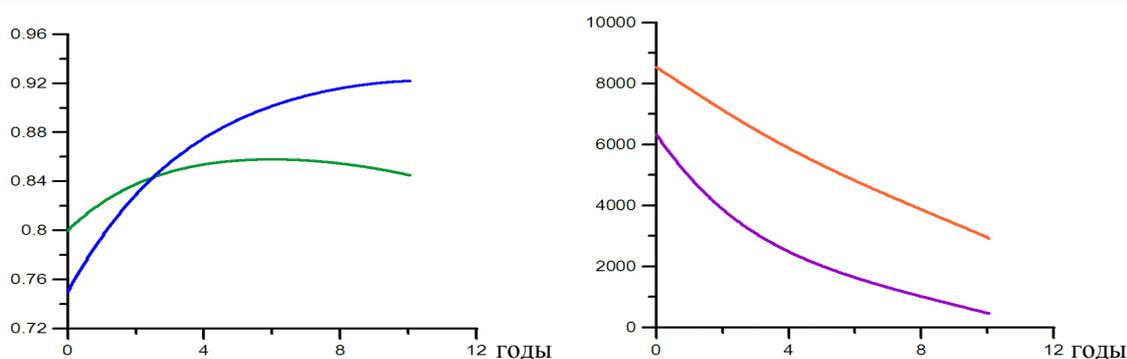


Рис. 4: Оптимальные траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  и управлений  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  при низкой экспозиционной ртутной нагрузке:  $x_s = 0.8$ ,  $y_s = 0.75$

Примечание: график слева  $x(t)$  - линия здоровья (нижняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (верхняя, синяя), график справа  $u_1(t)$  - затраты на медикаментозное лечение (верхняя, оранжевая),  $u_2(t)$  - материальные затраты на применение БОС-технологии (нижняя, лиловая).

Разработанная модель достаточно адекватна, реалистично отражает возможные сценарии развития, позволяет оценить затраты на медикаментозное лечение и реабилитационный БОС-тренинг в зависимости от ЭРН, обуславливающей тяжесть заболевания. Модель позволяет также выявить динамику объективного состояния здоровья пациентов при возможном изменении управляющих воздействий с учетом ограниченности денежных ресурсов. Результаты численных экспериментов с моделью показали, что применение технологии нейрореабилитации - биоуправления в течение года существенно помогает в улучшении состояния здоровья и даже удешевляет лечение. Эффект достигается тем больший и с меньшими затратами, чем меньше была ЭРН.

Изучая динамические свойства СЗКЖ и здоровья группы пациентов, мы абстрагируемся от сложностей взаимодействий свойств каждого конкретного лица. Кроме того, мы не можем учесть все влияющие факторы, также как и все характеристики индивидуумов этой группы. В реальных условиях группа неоднородна с точки зрения исследуемых здесь процессов лечения и реабилитации, что может быть связано с такими факторами, как возраст и/или тяжесть профессионального заболевания. Поэтому при моделировании динамических процессов в исследуемой предметной области необходимо учитывать процессы динамического запаздывания, связанные с индивидуальным состоянием пациентов. Формально это можно сделать, полагая, что исследуемая группа состоит из нескольких подгрупп, каждая из которых характеризуется своим состоянием здоровья и СЗКЖ, поэтому сценарии и рассматривались для пациентов с разной величиной ЭРН.

В завершении следует отметить, что усложнение динамической модели, связанное с увеличением числа параметров, размерности или разнородности переменных величин в некоторых случаях порождает большие трудности, как методологического, так и вычислительного характера. Например, при моделировании нескольких процессов с существенно различной скоростью протекания (например, развитие дегенеративных изменений в различных отделах нервной системы от хронического воздействия ртути), в уравнениях необходимо вводить малые параметры при производных и в результате переходить к моделям иной структуры в форме алгебро-дифференциальных уравнений. Поэтому динамическое моделирование имеет границы применимости, которые подлежат

определению, исходя из тех или иных критериев, связанных с построением и анализом моделей конкретных процессов. Указанные проблемы делают актуальным поиск других методов изучения динамики здоровья и СЗКЖ.

**Заключение.** В результате проведенного исследования была разработана математическая модель оптимального управления состоянием здоровья и СЗКЖ пациентов с ХРИ, которая достаточно адекватна, реалистично отражает возможные сценарии развития, позволяет оценить затраты на медикаментозное лечение и реабилитационный БОС-тренинг в зависимости от ЭРН, обуславливающей тяжесть заболевания, а также выявить динамику объективного физического состояния пациентов при возможном изменении управляющих воздействий с учетом ограниченности денежных ресурсов.

Результаты численных экспериментов с моделью показали, что применение реабилитационной технологии биоуправления в течение года существенно помогает в улучшении состояния здоровья и даже удешевляет лечение. Эффект достигается тем большим и с меньшими затратами, чем меньше была ЭРН, т.е. чем легче была степень ртутной интоксикации пациента, лучше было его психическое и физическое состояние. Таким образом, чем раньше будет выявлена хроническая ртутная интоксикация и начнется реабилитация (медикаментозное лечение и применение БОС-тренинга), тем оно будет успешнее и дешевле. Практическая значимость разработанной модели состоит в получении специалистами в области профессиональной патологии инструмента, на основе которого возможна поддержка принятия качественных и научно обоснованных врачебных решений.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований президиума РАН «Фундаментальные исследования для биомедицинских технологий».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодиенкова Г.М., Боклаженко Е.В. Иммунологические критерии диагностики нейроинтоксикации парами металлической ртути // XXI век. Техносферная безопасность. 2016. том 1. № 4. С. 23–29.
2. Болодурина И.П., Иванова Ю.П. Оптимальное управление процессом применения противовирусных препаратов при лечении ВИЧ-инфекции // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. 2013. Т. 2. № 4. С. 94–102.
3. Дьякович М.П., Казакова П.В. Комплексная оценка психологического статуса и качества жизни пациентов с хронической ртутной интоксикацией // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 3-2. С. 84–88.
4. Дьякович М.П., Катаманова Е.В., Казакова П.В. Количественная оценка динамики фактического здоровья лиц, подвергавшихся воздействию паров ртути на производстве: отдаленный период интоксикации // Вестник Российской академии медицинских наук. 2013. № 68 (2). С. 12–17.
5. Дьякович М.П., Мещакова Н.М., Казакова П.В., Соловьева И.Ю. Влияние стажевой ртутной нагрузки на динамику хронической ртутной интоксикации профессионального генеза // Acta Biomedica Scientifica. 2010. № 1. С. 36–40.

6. Дьякович М.П., Русанова Д.В., Кулешова М.В., Купцова Н.Г., Шевченко О.И., Катаманова Е.В., Донская О.Г., Джафарова О.А., Казакова П.В. Биоуправление в реабилитации пациентов с профессиональными заболеваниями // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 10. С. 10–15.
7. Катаманова Е.В., Константинова Т.Н., Лахман О.Л., Брежнева И.А. Динамика изменений биоэлектрической активности головного мозга у больных с хронической ртутной интоксикацией // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 1 (1). С. 62–66.
8. Новик А.А., Ионова Т.И. Руководство по исследованию качества жизни в медицине. 2-е издание / под ред. акад. РАМН Ю.Л. Шевченко. М.: ЗАО «Олма Медиа Групп». 2007. 320 с.
9. Соловьева И.Ю., Дьякович М.П. Проблемы реабилитации пострадавших вследствие хронической ртутной интоксикации профессионального генеза // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2012. № 4. С. 10–14.
10. Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г., Мещакова Н.М. Оценка загрязнения воздуха рабочей зоны ртутью и содержания ее в биосредах у работников производства каустика и хлора // Acta Biomedica Scientifica. 2010. № 4. С. 59–63.
11. Якименко Л.М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов. М.: «Химия». 1974. 600 с.
12. Malek A, Aouad K, El Khoury R, Halabi-Tawil M, Choucair J. Chronic Mercury Intoxication Masquerading as Systemic Disease: A Case Report and Review of the Literature. Eur J Case Rep Intern Med. 2017 May 24. 4(6):000632. doi: 10.12890/2017\_000623.
13. Okosun KO, Rachid O, Marcus N. Optimal control strategies and cost-effectiveness analysis of a malaria model // Biosystems. 2013. 111(2):83-101. doi: 10.1016/j.biosystems.2012.09.008.
14. Steckling N, Plass D, Bose-O'Reilly S, Kobal AB, Krämer A, Hornberg C. Disease profile and health-related quality of life (HRQoL) using the EuroQol (EQ-5D+C) questionnaire for chronic metallic mercury vapor intoxication // Health Qual Life Outcomes. 2015. 13:196. doi: 10.1186/s12955-015-0388-0.
15. Su Y, Jia C, Chen Y. Optimal Control Model of Tumor Treatment with Oncolytic Virus and MEK Inhibitor // Biomed Res Int. 2016; 2016:5621313. doi: 10.1155/2016/5621313. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5210284/> (accessed 11.11.2019).

---

**UDK 519.86:613.6**

**MODELING THE HEALTH STATUS OF PERSONS WHO HAVE SUFFERED FROM  
CHRONIC MERCURY INTOXICATION IN THE WORKPLACE**

**Marina P. Dyakovich**

Doctor of Biological Science, professor, leading Researcher of Ecological and Hygienic Research Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution «East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research», 12A microdistrict, 3, 665827, Angarsk, Russia

Head of the Department of Economics, Management and Psychology of Management, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Angarsk State Technical University", Tchaikovsky, 60, 665835, Angarsk, Russia, e-mail: [marinapinhas@yandex.ru](mailto:marinapinhas@yandex.ru)

**Abstract.** An approach to the development of a controlled model of the dynamics of health status and health-related quality of life of patients with chronic mercury intoxication using traditional drug treatment, supplemented by neurorehabilitation technology (BOS-training) is proposed. The optimal control problem is set and numerically solved in order to improve the health and quality of life of such patients. The results of numerical experiments, scenarios of changes and optimal modes for different initial States are presented. The results obtained allow us to estimate the costs of drug treatment and rehabilitation of biofeedback training depending on the exposure of mercury load, causing the severity of the disease, as well as to identify the dynamics of the health of patients with a possible change in the control effects, taking into account the limited financial resources. The vector of further research is substantiated.

**Keywords:** dynamic controlled model, occupational pathology, chronic mercury intoxication, exposure mercury load, numerical experiments.

**Acknowledgment.** The study was carried out with financial support of the program fundamental scientific research of the RAS Presidium «Fundamental research for biomedical technologies».

#### References

1. Bodienkova G.M., Boklazhenko E.V. Immunologicheskie kriterii diagnostiki nejroin-toksikacii parami metallicheskoj rtuti [Immunological criteria for the diagnosis of neurointoxication with metallic mercury vapor] // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technosphere Safety. XXI Century. 2016. Tom 1. №. 4. Pp. 23–29. (in Russian)
2. Bolodurina I.P., Ivanova Yu.P. Optimal'noe upravlenie processom primeneniya an-tivirusnyh preparatov pri lechenii VICH-infekcii [Optimal management of the use of antiviral drugs in the treatment of HIV infection] // Vestnik YUUrGU. Ser. Vychisli-tel'naya matematika i informatika = Bulletin of the south Ural state university. Series: computational mathematics and software engineering. 2013. T. 2. № 4. Pp. 94–102. (in Russian)
3. D'yakovich M. P., Kazakova P.V. Kompleksnaya ocenka psihologicheskogo statusa i kachestva zhizni pacientov s hronicheskoy rtutnoj intoksikaciej [Comprehensive assessment of the psychological status and quality of life of patients with chronic mercury intoxication] // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 3-2. Pp. 84–88. (in Russian)
4. D'yakovich M.P., Katamanova E.V., Kazakova P.V. Kolichestvennaya ocenka dinamiki fakticheskogo zdorov'ya lic, podvergavshihsya vozdejstviyu parov rtuti na proizvodstve: otdalennyj period intoksikacii [Quantification of the dynamics of the actual health of persons exposed to mercury vapor in the workplace: a long period of intoxication] // Vestnik Rossijskoj akademii medicinskih nauk = Annals of the Russian academy of medical sciences. 2013. № 68 (2). Pp. 12–17. (in Russian)
5. D'yakovich M.P., Meshchakova N.M., Kazakova P.V., Solov'eva I.Yu. Vliyanie stazhevoj rtutnoj nagruzki na dinamiku hronicheskoy rtutnoj intoksikacii professional'nogo geneza [The effect of senior mercury load on the dynamics of chronic mercury intoxication of occupational origin] // Acta Biomedica Scientifica. 2010. № 1. Pp. 36–40. (in Russian)

6. D'yakovich M.P., Rusanova D.V., Kuleshova M.V., Kupcova N.G., Shevchenko O.I., Katamanova E.V., Donskaya O.G., Dzhafarova O.A., Kazakova P.V. Bioupravlenie v reabilitacii pacientov s professional'nymi zabolevaniyami [Biofeedback in the rehabilitation of patients with occupational diseases] // *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017. № 10. Pp.10–15. (in Russian)
7. Katamanova E.V., Konstantinova T.N., Lahman O L., Brezhneva I. A. Dinamika izmene-nij bioelektricheskoy aktivnosti golovnogogo mozga u bol'nyh s hronicheskoy rtutnoj intoksikaciej [The dynamics of changes in the bioelectric activity of the brain in patients with chronic mercury intoxication] // *Acta Biomedica Scientifica*. 2011. № 1 (1). Pp. 62–66. (in Russian)
8. Novik A.A., Ionova T.I. Rukovodstvo po issledovaniyu kachestva zhizni v medicine [Guide to the study of the quality of life in medicine]. 2-e izdanie / pod red. akad. RAMN YU.L = 2nd edition / ed. Acad. RAMS Yu.L. Shevchenko. SHEvchenko. Moscow. ZAO «Olma Media Grupp» = CJSC Olma Media Groupю 2007. 320 p. (in Russian)
9. Solov'eva I. YU., D'yakovich M. P. Problemy reabilitacii postradavshih vsledstvie hronicheskoy rtutnoj intoksikacii professional'nogo geneza [Problems of rehabilitation of victims due to chronic mercury intoxication of occupational origin]// *Mediko-social'naya ekspertiza i reabilitaciya = Medico-Social Expert Evaluation and Rehabilitation*. 2012. №4. Pp.10–14. (in Russian)
10. Shayahmetov S.F., Liseckaya L.G., Meshchakova N.M. Ocenka zagryazneniya vozduha rabochej zony rtut'yu i sodержaniya ee v biosredah u rabotnikov proizvodstva kaustika i hlora [Assessment of air pollution of the working area with mercury and its content in biological media among caustic and chlorine production workers] // *Acta Biomedica Scientifica*. 2010. №4. Pp. 59–63. (in Russian)
11. Yakimenko L.M. Proizvodstvo hlora, kausticheskoy sody i neorganicheskikh hlorproduktov [Production of chlorine, caustic soda and inorganic chlorine products]. Moscow. Himiya = Chemistry. 1974.600 p. (in Russian)
12. Malek A, Aouad K, El Khoury R, Halabi-Tawil M, Choucair J. Chronic Mercury Intoxication Masquerading as Systemic Disease: A Case Report and Review of the Literature. *Eur J Case Rep Intern Med*. 2017 May 24. 4(6):000632. doi: 10.12890/2017\_000623.
13. Okosun KO, Rachid O, Marcus N. Optimal control strategies and cost-effectiveness analysis of a malaria model // *Biosystems*. 2013. 111(2):83-101. doi: 10.1016/j.biosystems.2012.09.008.
14. Steckling N, Plass D, Bose-O'Reilly S, Kobal AB, Krämer A, Hornberg C. Disease profile and health-related quality of life (HRQoL) using the EuroQol (EQ-5D+C) questionnaire for chronic metallic mercury vapor intoxication // *Health Qual Life Outcomes*. 2015. 13:196. doi: 10.1186/s12955-015-0388-0.
15. Su Y, Jia C, Chen Y. Optimal Control Model of Tumor Treatment with Oncolytic Virus and MEK Inhibitor // *Biomed Res Int*. 2016; 2016:5621313. doi: 10.1155/2016/5621313. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5210284/> (accessed 11.11.2019).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ПОСТРАДАВШИХ ОТ ХРОНИЧЕСКОЙ РТУТНОЙ ИНТОКСИКАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ

Дьякович Марина Пинхасовна

Д.б.н., профессор, e-mail: [marinapinhas@yandex.ru](mailto:marinapinhas@yandex.ru)

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований»,  
665827, Ангарск, 12а микрорайон, 3, Россия

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Ангарский государственный технический университет»,  
665835, Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия

**Аннотация.** Предложен подход к разработке управляемой модели динамики состояния здоровья и связанного со здоровьем качества жизни пациентов с хронической ртутной интоксикацией при использовании традиционное медикаментозное лечение, дополненное нейрореабилитационной технологией (БОС-тренингом). Ставится и численно решается задача оптимального управления с целью улучшения состояния здоровья и качества жизни таких пациентов. Приводятся результаты численных экспериментов, сценарии изменений и оптимальные режимы при различных начальных состояниях. Полученные результаты позволяют оценить затраты на медикаментозное лечение и реабилитационный БОС-тренинг в зависимости от экспозиционной ртутной нагрузки, обуславливающей тяжесть заболевания, а также выявить динамику состояния здоровья пациентов при возможном изменении управляющих воздействий с учетом ограниченности денежных ресурсов. Обосновывается вектор дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** динамическая управляемая модель, профессиональная патология, хроническая ртутная интоксикация, экспозиционная ртутная нагрузка, численные эксперименты.

**Цитирование:** Дьякович М.П. Моделирование состояния здоровья пострадавших от хронической ртутной интоксикации на производстве // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 111–121. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-09

**Введение.** Продолжительное время в СССР и России основным направлением в развитии производства хлора и каустической соды высокой степени чистоты был ртутный электролиз. Это объяснялось целым рядом причин и в первую очередь большой мощностью единичного электролизера, возможностью изменения токовой нагрузки в широких пределах, высоким качеством каустической соды [11]. Однако основным недостатком этого метода являлось загрязнение производственной и окружающей среды высокотоксичными соединениями ртути. К настоящему времени, этот способ производства прекращен. В Иркутской области одно предприятие полностью закрыто, в другом с 2006 г. осуществлен переход к мембранному методу, так как он более экономичен, более безопасен для окружающей среды и дает возможность получить конечный продукт более высокого

качества. В воздух рабочей зоны химических предприятий Иркутской области с 70-х годов прошлого века в концентрациях, значительно превышающих гигиенические нормативы, поступала ртуть, поэтому у работников химических предприятий широкое распространение получила хроническая ртутная интоксикация (ХРИ) профессионального генеза. Ртуть и через много лет после этого выявляется в биосредах (кровь, волосы) у работников этих цехов [10], а лица, пострадавшие от воздействия ртути на производстве, имеют стойкую утрату трудоспособности и являются постоянными пациентами клиники профзаболеваний и лечебных учреждений по месту своего проживания.

ХРИ имеет широкий спектр клинических проявлений со стороны неврологической, желудочно-кишечной и мочевыделительной систем, кожи. Пациенты с ХРИ демонстрируют дегенеративные неврологические состояния, аутоиммунные заболевания, а также метаболические и митохондриальные нарушения [12,1,7]. Указанное безусловно может сказываться на их качестве жизни [14]. Было зафиксировано значительное снижение связанного со здоровьем качества жизни (СЗКЖ) лиц, пострадавших от ХРИ, в сравнении с таковым в общей популяции мужчин и здоровых работников, контактирующих с ртутью на производстве [3]. Экспозиционная ртутная нагрузка (ЭРН) определяла высокий риск развития ХРИ у работников, а в постконтактном периоде - ухудшение психического и соматического здоровья, снижающих качество жизни пострадавших [5].

Более 95% пострадавших вследствие токсического поражения нервной системы в Иркутской области - это лица с ХРИ, причем у трети пострадавших, несмотря на обязательное выполнение реабилитационных мероприятий, отмечается утяжеление заболевания. Хотя ежегодно 100% пострадавших получают необходимые медицинские препараты, 80% - санаторно-курортное лечение, доля лиц с инвалидностью 2 группы, малоперспективных для медико-социальной реабилитации, растет при нулевом показателе реабилитации [9]. Для повышения эффективности реабилитации пациентов с ХРИ медикаментозную терапию следует сочетать с применением гидропроцедур, ультрафиолетового облучения, лечебной физкультуры и психотерапии. В клинике профессиональных заболеваний ВСИМЭИ была разработана инновационная медицинская технология, которая с учетом степени выраженности патологического процесса интегрирует медикаментозное лечение и биоуправление с биологической обратной связью (БОС). Последнее включает аутогенную тренировку для расслабления мышц,  $\alpha$  - стимулирующий тренинг с музыкальным сопровождением и элементы психотерапии [6].

Выявленное прогрессирование органического поражения психики, дегенеративных изменений пищеварительной, эндокринной и сердечно-сосудистой системах в постконтактный период ХРИ [4] обуславливают важность поиска эффективных методов управления реабилитационным процессом пациентов. Указанное определило актуальность изучения динамики здоровья и СЗКЖ пациентов с ХРИ, получающих медикаментозное лечение, дополненное БОС – тренингом. Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что описание моделей и алгоритмов, решающих задачи прогнозирования изменения состояния здоровья и СЗКЖ пациентов с профессиональной патологией при использовании определенных медицинских технологий с учетом эндогенных и экзогенных факторов отсутствует. В то же время в литературе описано применение динамического моделирования с оптимальным управлением в решении медицинских задач. Разработана и численно решена задача оптимального управления динамикой ВИЧ-инфекции [2], известны динамические

модели с оптимальным управлением при изучении экономической эффективности мер профилактики малярии [13], поиска перспективной стратегии лечения онколитическими вирусами опухолевого процесса [15]. Таким образом, предпринятое исследование, заключающееся в разработке динамической модели с оптимальным управлением с целью улучшения состояния здоровья и качества жизни пациентов с ХРИ, отличается новизной.

Методология динамического моделирования позволяет просчитать возможные последствия разных вариантов развития событий, прогнозировать на основе анализа текущей ситуации сценарии развития после внесения возмущения, определять возможные эффекты, давать рекомендации по оптимальным вариантам управления процессом. К переменным динамической модели относятся такие величины, которые могут влиять друг на друга и согласованно изменяться под действием внешних воздействий во время изучения объекта. Параметрами модели являются коэффициенты описывающих ее уравнений. При этом термин «параметр модели» отличается от принятого в медицине аналогичного термина, под которым понимается любая количественная характеристика состояния организма или его систем.

Разработка динамической модели, представленной в данной работе, осуществлялась совместно с к.ф.-м.н. Е.П. Бокмельдер.

**1. Постановка задачи.** На первом этапе динамического моделирования были сформулированы качественные и количественные закономерности, описывающие основные характеристики объекта с привлечением знаний о структуре и характере функционирования рассматриваемого объекта, его свойствах и проявлениях. Этап завершился созданием качественной (описательной) модели объекта. Собственные исследования определили включение в динамическую модель в качестве объясняющих параметров экспозиционную ртутную нагрузку, приводящую к накоплению ртути в организме, и детерминирующую тяжесть профессионального заболевания, а также социально-психологические характеристики пациента в течение его реабилитации. Переменная  $x(t)$  описывает состояние здоровья (объективный показатель, оцениваемый клинически), а  $y(t)$  - СЗКЖ, оцениваемое в момент времени  $t$ , Обе переменные измеряются в удельных процентах, т.е.  $0 \leq x(t) \leq 1$  и  $0 \leq y(t) \leq 1$ . При этом  $x(0) = x_s$  и  $y(0) = y_s$  - состояния в начальный момент времени при определенной величине ЭРН-  $s$  с градациями величины, определяемые как высокая, средняя и низкая. Управление процессом реабилитации в модели происходило в двух направлениях:  $u_1$  - материальные средства (в рублях) на медикаментозное лечение и  $u_2$  - на проведение реабилитационной технологии в момент времени  $t$ .

Задача оптимального управления состоит в минимизации функционала, который отражает стремление улучшить состояние здоровья и СЗКЖ при одновременной экономии затрачиваемых материальных средств

$$J = \int_0^T (q_1 \cdot (1-x)^2 + q_2 \cdot u_1 + q_3 \cdot u_2 + q_4 \cdot (-y)^2) dt \quad (1),$$

когда переменные  $x(t)$  и  $y(t)$  удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} x'(t) = -\alpha_1 e^{-\varepsilon_1 u_1} x - x + \beta_1 (e^{-\varepsilon_2 u_2} + \gamma_1 (e^{-\varepsilon_1 u_1} - x - y)) \\ y'(t) = -\alpha_2 e^{-\varepsilon_3 u_1} (-x - y^2) + \beta_2 (e^{-\varepsilon_4 u_2} + \gamma_2 (e^{-\varepsilon_3 u_1} - x - y)) \end{cases} \quad (2)$$

с начальными условиями  $x(0) = x_s$ ,  $y(0) = y_s$ , и бюджетными ограничениями на управления  $0 \leq u_1 \leq a$ ,  $0 \leq u_2 \leq b$ . Здесь  $a$  и  $b$  - максимальные затраты, которые лечебное учреждение может позволить потратить на медикаментозное лечение и использование реабилитационной технологии, соответственно;  $t$  - время, в течение которого проводятся лечебных и реабилитационных процедур; коэффициенты  $q_1, q_2, q_3, q_4$  уравнивают масштаб измерения состояния здоровья и затрат на лечение и реабилитацию;  $\alpha_1 > 0$ ,  $\alpha_2 > 0$  - доли темпа ухудшения здоровья и СЗКЖ в течение года без лечения,  $\beta_1 > 0$ ,  $\beta_2 > 0$  - доли улучшения состояния здоровья и СЗКЖ в течение года при применении БОС-технологии,  $\gamma_1 > 0$ ,  $\gamma_2 > 0$  - доли темпа улучшения состояния здоровья и СЗКЖ в течение года при медикаментозном лечении;  $\varepsilon_1 > 0$ ,  $\varepsilon_3 > 0$  - коэффициенты, отвечающие за эффективность влияния медикаментозного лечения на состояние здоровья и СЗКЖ, соответственно, а  $\varepsilon_2 > 0$ ,  $\varepsilon_4 > 0$  - коэффициенты, отвечающие за эффективность влияния БОС-технологии на состояние здоровья и СЗКЖ, соответственно. Производные по времени  $x'(t)$  и  $y'(t)$  характеризуют скорость изменения состояния здоровья и СЗКЖ.

В системе уравнений учтено взаимное влияние состояния здоровья и СЗКЖ друг на друга, исходя из представлений о качестве жизни как оценке параметров, позволяющих дифференцированно определить влияние болезни и лечения на психологическое, эмоциональное состояние больного, его социальный статус [8]. Если не использовать БОС-тренинг и не учитывать его положительного влияния на СЗКЖ, что было показано в [10], то состояние здоровья  $x(t)$  будет удовлетворять уравнению:

$$x'(t) = -\alpha_1 \cdot e^{-\varepsilon_1 u_1} \cdot (-x(t)) \cdot \overline{y}(t)', \quad x(0) = x_s \quad (3)$$

С учетом того, что  $\alpha_1 \cdot e^{-\varepsilon_1 u_1} = a = const > 0$ , результатом решения этого уравнения будет:

$$\frac{x'}{(-x) \cdot \overline{y}} = -a \Rightarrow \frac{x'}{1-x} + \frac{x'}{x} = -a \Rightarrow \ln \frac{x}{1-x} = -at + c \Rightarrow \frac{x}{1-x} = Ae^{-at} \quad (4)$$

С учетом начального условия  $x(t) = \frac{Ae^{-at}}{1 + Ae^{-at}}$ , где  $A = \frac{x_s}{1-x_s}$  (5)

Таким образом, выполнены ограничения  $0 < x(t) < 1$  и состояние здоровья ухудшается:  $x(t) \rightarrow 0$ ,  $t \rightarrow \infty$ .

С другой стороны, если бы на СЗКЖ не влияло здоровье, то можно было повлиять на СЗКЖ только применением БОС-технологии  $y(t)$ , которое в этом случае будет удовлетворять уравнению:

$$y'(t) = \beta_2 \cdot (-e^{-\varepsilon_4 u_2}) \cdot \overline{y}(t) + \gamma_2 \cdot (-e^{-\varepsilon_3 u_1}) \cdot (-y(t)) \cdot \overline{y}(t), \quad y(0) = y_s \quad (6)$$

Полагая  $\beta_2 \cdot (-e^{-\varepsilon_4 u_2}) + \gamma_2 \cdot (-e^{-\varepsilon_3 u_1}) = k = const > 0$ , мы можем решить это уравнение. Получим:

$$\frac{y'}{(-y) \cdot \overline{y}} = k \Rightarrow \frac{y'}{1-y} + \frac{y'}{y} = k \Rightarrow \ln \frac{y}{1-y} = kt + c \Rightarrow \frac{y}{1-y} = Be^{kt} \quad (7)$$

С учетом начального условия, имеем  $y(t) = \frac{Be^{kt}}{1 + Be^{kt}}$ , где  $B = \frac{y_s}{1-y_s}$  (8)

Таким образом, выполнены ограничения  $0 < y(t) < 1$  и СЗКЖ улучшается:  $y(t) \rightarrow 1$ ,  $t \rightarrow \infty$ .

В представленной модели ситуация идеализирована, так как предполагается, что использование БОС-технологии и медикаментозного лечения, поступление материальных потоков в клинику профессиональных заболеваний на реализацию указанных методов происходят в течение года непрерывно.

**2. Основные результаты.** При помощи программного пакета OPTCON-I, разработанного д.т.н. А.Ю. Горновым, реализующего многофункциональную технологию решения задач оптимального управления, были проведены идентификация модели и уточнение значений параметров. Далее анализировались различные сценарии поведения оптимального решения в зависимости от начальных условий и от временного промежутка проведения лечения.

В численных экспериментах управления были ограничены условиями:  $0 \leq u_1 \leq 18000$ ,  $0 \leq u_2 \leq 12000$ , использованы следующие значения параметров:  $q_1 = 1 \cdot 10^4$ ;  $q_2 = 0,35$ ;  $q_3 = 0,5$ ;  $q_4 = 1,6 \cdot 10^4$ ;  $\alpha_1 = 0,1$ ;  $\alpha_2 = 0,2$ ;  $\beta_1 = 0,2$ ;  $\beta_2 = 0,3$ ;  $\gamma_1 = 0,3$ ;  $\gamma_2 = 0,4$ ;  $\varepsilon_1 = 1,512 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_2 = 1,3 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_3 = 1 \cdot 10^{-4}$ ;  $\varepsilon_4 = 2,5 \cdot 10^{-4}$ .

Границы управлений определялись затратами на медикаментозное лечение и на реабилитацию на одного больного в год в денежном выражении. В результате численных экспериментов значения коэффициентов, определенные ранее из их содержательного смысла, корректировались. Целевой функционал выражался в условных единицах, он представлял собой сумму произведений переменных, отражающих затраты, состояние здоровья и СЗКЖ и соответствующих масштабирующих коэффициентов.

Результаты численных экспериментов показаны на рисунках, на которых зеленая кривая  $x(t)$  – состояние здоровья, синяя  $y(t)$  – СЗКЖ, оранжевая  $u_1$  – затраты на медикаментозное лечение, лиловая  $u_2$  – материальные затраты на применение БОС-технологии.

В ходе численных экспериментов были рассмотрены следующие сценарии:

1. «Низкий» (без оптимизации). Рассматривался при нулевых управлениях и начальных состояниях  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$  (рис. 1.). Состояние пациента быстро ухудшается при отсутствии лечения. Здесь  $J=1006905.4$ , т.е. ущерб очень велик.
2. «Средний» (с оптимизацией), без использования БОС-технологии,  $u_2 = 0$  (рис. 2). Здесь состояние медленно улучшается, но при условии использования всех имеющихся материальных средств на медикаментозное лечение ( $u_1 = 18000$ ,  $J=246665.2$ ).
3. «Высокий» (с оптимизацией). Сценарий рассматривался для трех градаций величины ЭРН, имеющейся у пациентов:

При высокой ЭРН, т.е. при малых начальных состояниях  $x_s = 0.37$ ,  $y_s = 0.35$ , состояния улучшаются (рис. 2), но расходы материальных средств велики -  $J=150755.1$ . При средней ЭРН, т.е. при начальных состояниях  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$ , состояния также улучшаются (рис. 3), и расходы материальных средств становятся в 2 раза меньше -  $J=73962.7$ . При низкой ЭРН, т.е. при начальных состояниях  $x_s = 0.8$ ,  $y_s = 0.75$  состояния также улучшаются (рис. 4), и расходы материальных средств становятся в 5 раз меньше,  $J=28691.9$ . На графиках единицы измерения для  $x(t)$  и  $y(t)$  - доли единицы, для  $u_1$ ,  $u_2$  - рубли.

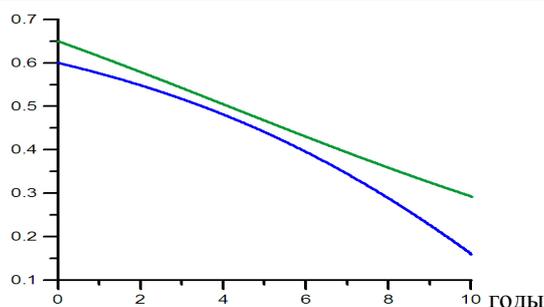


Рис. 1 Траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  при начальных состояниях  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$  и управлениях  $u_1 = 0$ ,  $u_2 = 0$ .

Примечание:  $x(t)$  - линия здоровья (верхняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (нижняя, синяя)

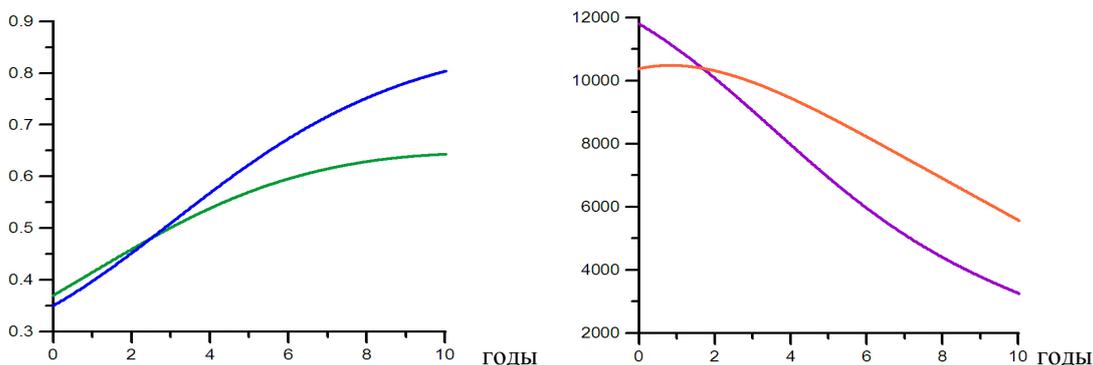


Рис. 2: Оптимальные траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  и управляющих воздействий  $u_1$  и  $u_2$  при высокой экспозиционной ртутной нагрузке:  $x_s = 0.37$ ,  $y_s = 0.35$

Примечание: график слева  $x(t)$  - линия здоровья (нижняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (верхняя, синяя), график справа  $u_1$  - затраты на медикаментозное лечение (верхняя, оранжевая),  $u_2$  - материальные затраты на применение БОС-технологии (нижняя, лиловая).

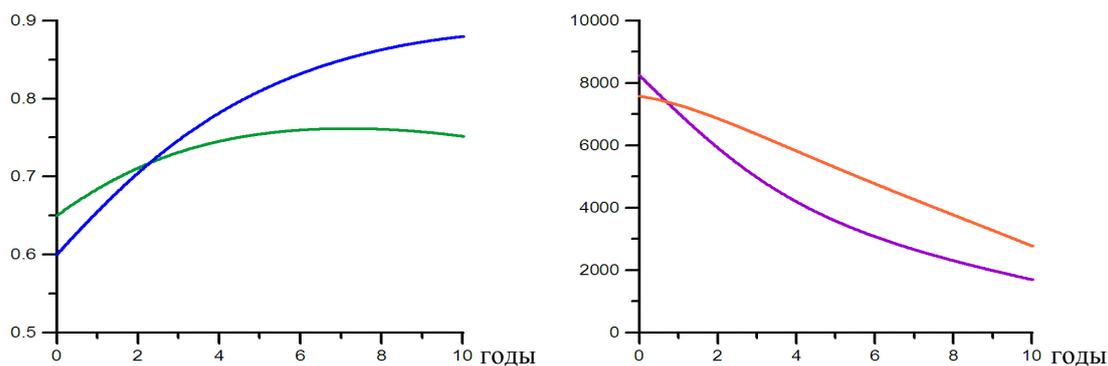


Рис. 3: Оптимальные траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  и управлений  $u_1$  и  $u_2$  при средней экспозиционной ртутной нагрузке:  $x_s = 0.65$ ,  $y_s = 0.6$

Примечание: график слева  $x(t)$  - линия здоровья (нижняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (верхняя, синяя), график справа  $u_1$  - затраты на медикаментозное лечение (верхняя, оранжевая),  $u_2$  - материальные затраты на применение БОС-технологии (нижняя, лиловая).

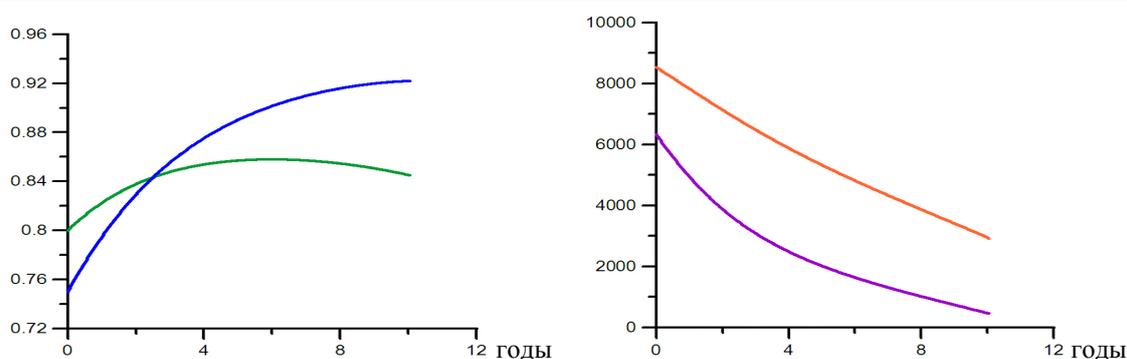


Рис. 4: Оптимальные траектории динамики состояний  $x(t)$  и  $y(t)$  и управлений  $u_1$  и  $u_2$  при низкой экспозиционной ртутной нагрузке:  $x_s = 0.8$ ,  $y_s = 0.75$

Примечание: график слева  $x(t)$  - линия здоровья (нижняя, зеленая) и  $y(t)$  - СЗКЖ (верхняя, синяя), график справа  $u_1$  - затраты на медикаментозное лечение (верхняя, оранжевая),  $u_2$  - материальные затраты на применение БОС-технологии (нижняя, лиловая).

Разработанная модель достаточно адекватна, реалистично отражает возможные сценарии развития, позволяет оценить затраты на медикаментозное лечение и реабилитационный БОС-тренинг в зависимости от ЭРН, обуславливающей тяжесть заболевания. Модель позволяет также выявить динамику объективного состояния здоровья пациентов при возможном изменении управляющих воздействий с учетом ограниченности денежных ресурсов. Результаты численных экспериментов с моделью показали, что применение технологии нейрореабилитации - биоуправления в течение года существенно помогает в улучшении состояния здоровья и даже удешевляет лечение. Эффект достигается тем больший и с меньшими затратами, чем меньше была ЭРН.

Изучая динамические свойства СЗКЖ и здоровья группы пациентов, мы абстрагируемся от сложностей взаимодействий свойств каждого конкретного лица. Кроме того, мы не можем учесть все влияющие факторы, также как и все характеристики индивидуумов этой группы. В реальных условиях группа неоднородна с точки зрения исследуемых здесь процессов лечения и реабилитации, что может быть связано с такими факторами, как возраст и/или тяжесть профессионального заболевания. Поэтому при моделировании динамических процессов в исследуемой предметной области необходимо учитывать процессы динамического запаздывания, связанные с индивидуальным состоянием пациентов. Формально это можно сделать, полагая, что исследуемая группа состоит из нескольких подгрупп, каждая из которых характеризуется своим состоянием здоровья и СЗКЖ, поэтому сценарии и рассматривались для пациентов с разной величиной ЭРН.

В завершении следует отметить, что усложнение динамической модели, связанное с увеличением числа параметров, размерности или разнородности переменных величин в некоторых случаях порождает большие трудности, как методологического, так и вычислительного характера. Например, при моделировании нескольких процессов с существенно различной скоростью протекания (например, развитие дегенеративных изменений в различных отделах нервной системы от хронического воздействия ртути), в уравнениях необходимо вводить малые параметры при производных и в результате переходить к моделям иной структуры в форме алгебро-дифференциальных уравнений. Поэтому динамическое моделирование имеет границы применимости, которые подлежат

определению, исходя из тех или иных критериев, связанных с построением и анализом моделей конкретных процессов. Указанные проблемы делают актуальным поиск других методов изучения динамики здоровья и СЗКЖ.

**Заключение.** В результате проведенного исследования была разработана математическая модель оптимального управления состоянием здоровья и СЗКЖ пациентов с ХРИ, которая достаточно адекватна, реалистично отражает возможные сценарии развития, позволяет оценить затраты на медикаментозное лечение и реабилитационный БОС-тренинг в зависимости от ЭРН, обуславливающей тяжесть заболевания, а также выявить динамику объективного физического состояния пациентов при возможном изменении управляющих воздействий с учетом ограниченности денежных ресурсов.

Результаты численных экспериментов с моделью показали, что применение реабилитационной технологии биоуправления в течение года существенно помогает в улучшении состояния здоровья и даже удешевляет лечение. Эффект достигается тем большим и с меньшими затратами, чем меньше была ЭРН, т.е. чем легче была степень ртутной интоксикации пациента, лучше было его психическое и физическое состояние. Таким образом, чем раньше будет выявлена хроническая ртутная интоксикация и начнется реабилитация (медикаментозное лечение и применение БОС-тренинга), тем оно будет успешнее и дешевле. Практическая значимость разработанной модели состоит в получении специалистами в области профессиональной патологии инструмента, на основе которого возможна поддержка принятия качественных и научно обоснованных врачебных решений.

**Благодарности.** Исследование выполнено при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований президиума РАН «Фундаментальные исследования для биомедицинских технологий».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодиенкова Г.М., Боклаженко Е.В. Иммунологические критерии диагностики нейроинтоксикации парами металлической ртути // XXI век. Техносферная безопасность. 2016. том 1. № 4. С. 23–29.
2. Болодурина И.П., Иванова Ю.П. Оптимальное управление процессом применения противовирусных препаратов при лечении ВИЧ-инфекции // Вестник ЮУрГУ. Сер. Вычислительная математика и информатика. 2013. Т. 2. № 4. С. 94–102.
3. Дьякович М.П., Казакова П.В. Комплексная оценка психологического статуса и качества жизни пациентов с хронической ртутной интоксикацией // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 3-2. С. 84–88.
4. Дьякович М.П., Катаманова Е.В., Казакова П.В. Количественная оценка динамики фактического здоровья лиц, подвергавшихся воздействию паров ртути на производстве: отдаленный период интоксикации // Вестник Российской академии медицинских наук. 2013. № 68 (2). С. 12–17.
5. Дьякович М.П., Мещакова Н.М., Казакова П.В., Соловьева И.Ю. Влияние стажевой ртутной нагрузки на динамику хронической ртутной интоксикации профессионального генеза // Acta Biomedica Scientifica. 2010. № 1. С. 36–40.

6. Дьякович М.П., Русанова Д.В., Кулешова М.В., Купцова Н.Г., Шевченко О.И., Катаманова Е.В., Донская О.Г., Джафарова О.А., Казакова П.В. Биоуправление в реабилитации пациентов с профессиональными заболеваниями // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 10. С. 10–15.
7. Катаманова Е.В., Константинова Т.Н., Лахман ОЛ., Брежнева И.А. Динамика изменений биоэлектрической активности головного мозга у больных с хронической ртутной интоксикацией // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 1 (1). С. 62–66.
8. Новик А.А., Ионова Т.И. Руководство по исследованию качества жизни в медицине. 2-е издание / под ред. акад. РАМН Ю.Л. Шевченко. М.: ЗАО «Олма Медиа Групп». 2007. 320 с.
9. Соловьева И.Ю., Дьякович М.П. Проблемы реабилитации пострадавших вследствие хронической ртутной интоксикации профессионального генеза // Медико-социальная экспертиза и реабилитация. 2012. № 4. С. 10–14.
10. Шаяхметов С.Ф., Лисецкая Л.Г., Мещакова Н.М. Оценка загрязнения воздуха рабочей зоны ртутью и содержания ее в биосредах у работников производства каустика и хлора // Acta Biomedica Scientifica. 2010. № 4. С. 59–63.
11. Якименко Л.М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов. М.: «Химия». 1974. 600 с.
12. Malek A, Aouad K, El Khoury R, Halabi-Tawil M, Choucair J. Chronic Mercury Intoxication Masquerading as Systemic Disease: A Case Report and Review of the Literature. Eur J Case Rep Intern Med. 2017 May 24. 4(6):000632. doi: 10.12890/2017\_000623.
13. Okosun KO, Rachid O, Marcus N. Optimal control strategies and cost-effectiveness analysis of a malaria model // Biosystems. 2013. 111(2):83-101. doi: 10.1016/j.biosystems.2012.09.008.
14. Steckling N, Plass D, Bose-O'Reilly S, Kobal AB, Krämer A, Hornberg C. Disease profile and health-related quality of life (HRQoL) using the EuroQol (EQ-5D+C) questionnaire for chronic metallic mercury vapor intoxication // Health Qual Life Outcomes. 2015. 13:196. doi: 10.1186/s12955-015-0388-0.
15. Su Y, Jia C, Chen Y. Optimal Control Model of Tumor Treatment with Oncolytic Virus and MEK Inhibitor // Biomed Res Int. 2016; 2016:5621313. doi: 10.1155/2016/5621313. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5210284/> (accessed 11.11.2019).

---

**UDK 519.86:613.6**

**MODELING THE HEALTH STATUS OF PERSONS WHO HAVE SUFFERED FROM  
CHRONIC MERCURY INTOXICATION IN THE WORKPLACE**

**Marina P. Dyakovich**

Doctor of Biological Science, professor, leading Researcher of Ecological and Hygienic Research Laboratory, Federal State Budgetary Scientific Institution «East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research», 12A microdistrict, 3, 665827, Angarsk, Russia

Head of the Department of Economics, Management and Psychology of Management, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Angarsk State Technical University", Tchaikovsky, 60, 665835, Angarsk, Russia, e-mail: [marinapinhas@yandex.ru](mailto:marinapinhas@yandex.ru)

**Abstract.** An approach to the development of a controlled model of the dynamics of health status and health-related quality of life of patients with chronic mercury intoxication using traditional drug treatment, supplemented by neurorehabilitation technology (BOS-training) is proposed. The optimal control problem is set and numerically solved in order to improve the health and quality of life of such patients. The results of numerical experiments, scenarios of changes and optimal modes for different initial States are presented. The results obtained allow us to estimate the costs of drug treatment and rehabilitation of biofeedback training depending on the exposure of mercury load, causing the severity of the disease, as well as to identify the dynamics of the health of patients with a possible change in the control effects, taking into account the limited financial resources. The vector of further research is substantiated.

**Keywords:** dynamic controlled model, occupational pathology, chronic mercury intoxication, exposure mercury load, numerical experiments.

**Acknowledgment.** The study was carried out with financial support of the program fundamental scientific research of the RAS Presidium «Fundamental research for biomedical technologies».

#### References

1. Bodienkova G.M., Boklazhenko E.V. Immunologicheskie kriterii diagnostiki nejroin-toksikacii parami metallicheskoj rtuti [Immunological criteria for the diagnosis of neurointoxication with metallic mercury vapor] // XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost' = Technosphere Safety. XXI Century. 2016. Tom 1. №. 4. Pp. 23–29. (in Russian)
2. Bolodurina I.P., Ivanova Yu.P. Optimal'noe upravlenie processom primeneniya an-tivirusnyh preparatov pri lechenii VICH-infekcii [Optimal management of the use of antiviral drugs in the treatment of HIV infection] // Vestnik YUUrGU. Ser. Vychisli-tel'naya matematika i informatika = Bulletin of the south Ural state university. Series: computational mathematics and software engineering. 2013. T. 2. № 4. Pp. 94–102. (in Russian)
3. D'yakovich M. P., Kazakova P.V. Kompleksnaya ocenka psihologicheskogo statusa i kachestva zhizni pacientov s hronicheskoy rtutnoj intoksikaciej [Comprehensive assessment of the psychological status and quality of life of patients with chronic mercury intoxication] // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 3-2. Pp. 84–88. (in Russian)
4. D'yakovich M.P., Katamanova E.V., Kazakova P.V. Kolichestvennaya ocenka dinamiki fakticheskogo zdorov'ya lic, podvergavshihsya vozdejstviyu parov rtuti na proizvodstve: otdalennyj period intoksikacii [Quantification of the dynamics of the actual health of persons exposed to mercury vapor in the workplace: a long period of intoxication] // Vestnik Rossijskoj akademii medicinskih nauk = Annals of the Russian academy of medical sciences. 2013. № 68 (2). Pp. 12–17. (in Russian)
5. D'yakovich M.P., Meshchakova N.M., Kazakova P.V., Solov'eva I.Yu. Vliyanie stazhevoj rtutnoj nagruzki na dinamiku hronicheskoy rtutnoj intoksikacii professional'nogo geneza [The effect of senior mercury load on the dynamics of chronic mercury intoxication of occupational origin] // Acta Biomedica Scientifica. 2010. № 1. Pp. 36–40. (in Russian)

6. D'yakovich M.P., Rusanova D.V., Kuleshova M.V., Kupcova N.G., Shevchenko O.I., Katamanova E.V., Donskaya O.G., Dzhafarova O.A., Kazakova P.V. Bioupravlenie v reabilitacii pacientov s professional'nymi zabolevaniyami [Biofeedback in the rehabilitation of patients with occupational diseases] // *Medicina truda i promyshlennaya ekologiya = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2017. № 10. Pp.10–15. (in Russian)
7. Katamanova E.V., Konstantinova T.N., Lahman O L., Brezhneva I. A. Dinamika izmene-nij bioelektricheskoy aktivnosti golovnogogo mozga u bol'nyh s hronicheskoy rtutnoj intoksikaciej [The dynamics of changes in the bioelectric activity of the brain in patients with chronic mercury intoxication] // *Acta Biomedica Scientifica*. 2011. № 1 (1). Pp. 62–66. (in Russian)
8. Novik A.A., Ionova T.I. Rukovodstvo po issledovaniyu kachestva zhizni v medicine [Guide to the study of the quality of life in medicine]. 2-e izdanie / pod red. akad. RAMN YU.L = 2nd edition / ed. Acad. RAMS Yu.L. Shevchenko. SHEvchenko. Moscow. ZAO «Olma Media Grupp» = CJSC Olma Media Groupю 2007. 320 p. (in Russian)
9. Solov'eva I. YU., D'yakovich M. P. Problemy reabilitacii postradavshih vsledstvie hronicheskoy rtutnoj intoksikacii professional'nogo geneza [Problems of rehabilitation of victims due to chronic mercury intoxication of occupational origin]// *Mediko-social'naya ekspertiza i reabilitaciya = Medico-Social Expert Evaluation and Rehabilitation*. 2012. №4. Pp.10–14. (in Russian)
10. Shayahmetov S.F., Liseckaya L.G., Meshchakova N.M. Ocenka zagryazneniya vozduha rabochej zony rtut'yu i sodержaniya ee v biosredah u rabotnikov proizvodstva kaustika i hlora [Assessment of air pollution of the working area with mercury and its content in biological media among caustic and chlorine production workers] // *Acta Biomedica Scientifica*. 2010. №4. Pp. 59–63. (in Russian)
11. Yakimenko L.M. Proizvodstvo hlora, kausticheskoy sody i neorganicheskikh hlorproduktov [Production of chlorine, caustic soda and inorganic chlorine products]. Moscow. Himiya = Chemistry. 1974.600 p. (in Russian)
12. Malek A, Aouad K, El Khoury R, Halabi-Tawil M, Choucair J. Chronic Mercury Intoxication Masquerading as Systemic Disease: A Case Report and Review of the Literature. *Eur J Case Rep Intern Med*. 2017 May 24. 4(6):000632. doi: 10.12890/2017\_000623.
13. Okosun KO, Rachid O, Marcus N. Optimal control strategies and cost-effectiveness analysis of a malaria model // *Biosystems*. 2013. 111(2):83-101. doi: 10.1016/j.biosystems.2012.09.008.
14. Steckling N, Plass D, Bose-O'Reilly S, Kobal AB, Krämer A, Hornberg C. Disease profile and health-related quality of life (HRQoL) using the EuroQol (EQ-5D+C) questionnaire for chronic metallic mercury vapor intoxication // *Health Qual Life Outcomes*. 2015. 13:196. doi: 10.1186/s12955-015-0388-0.
15. Su Y, Jia C, Chen Y. Optimal Control Model of Tumor Treatment with Oncolytic Virus and MEK Inhibitor // *Biomed Res Int*. 2016; 2016:5621313. doi: 10.1155/2016/5621313. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5210284/> (accessed 11.11.2019).

## ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ СКВОЗНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НА ЭТАПЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА

Козырев Денис Борисович

Заместитель начальника научно-исследовательского отдела,

Федеральное государственное унитарное предприятие

«Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова»,

127055 г. Москва, ул. Сущевская 22, e-mail: Kozirev@vniia.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос использования конструкторской информации при разработке управляющих программ для станков с числовым программным управлением. Представлены схемы стандартного использования конструкторской 3D-модели и чертежа в системе сквозного проектирования, изложены требования к электронной конструкторской документации. Рассмотрены особенности практического создания и использования 3D-моделей.

**Ключевые слова:** система сквозного проектирования, электронный документ, 3D-модель, технологическая модель, числовое программное управление.

**Цитирование:** Козырев Д.Б. Особенности практического использования информации в системе сквозного проектирования на этапе технологической подготовки производства // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 122–130. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-10

**Введение.** Создание и развитие систем сквозного проектирования (ССП) на машиностроительных и приборостроительных предприятиях позволит сократить сроки выпуска новой продукции. ССП позволяют объединить этапы конструкторской и технологической подготовки производства в едином информационном пространстве и избавиться от лишних преобразований информации при переходе от одного этапа к следующему. В ССП гармоничным образом создается цифровой двойник изделия, который размывает границы перехода от конструирования изделия к разработке технологии его изготовления. На последующих этапах жизненного цикла изделия цифровой двойник может наполняться дополнительной информацией и выполнять расширенные функции.

**1. Информация и электронные документы.** В настоящее время разработка изделий ведется в электронной форме в среде системы управления базой данных об изделии. Использование современных средств автоматизации имеет целый ряд методологических проблем: «вопрос внедрения информационных систем управления инженерными данными и выработки принципов и методов управления процессом разработки конструкторских документов является таким же фундаментальным, каким в свое время стал вопрос разработки ЕСКД для бумажных документов» [1]. Информация создается в виде, пригодном для автоматизированного использования – в виде трехмерных геометрических моделей (3D-моделей) деталей и сборочных единиц. Также в соответствии с требованиями единой системы конструкторской документации (ЕСКД) создаются плоские чертежи. Так как система учета и обращения информации строится на основе опыта использования бумажных

документов, то «используется один из самых востребованных у пользователей способов хранения данных – каждый файл является документом PDM-системы» [10]. Поэтому 3D-модели и соответствующие им чертежи являются полноценными электронными документами. Более подробно вопросы создания электронной конструкторской документации при комплексном использовании системы автоматизированного проектирования (САПР), системы управления данными об изделии (PDM-система) и системы управления жизненным циклом изделий (PLM-система) рассмотрены в работах [2, 9].

Для сокращения сроков разработки изделий в ССП необходимо реализовать принцип однократного ввода информации – информация создается в системе один раз. Применительно к стадии перехода от этапа конструкторского проектирования к технологическому проектированию это значит, что информация, созданная конструктором, должна использоваться технологом, а не создаваться им заново. Рассмотрим данный тезис более подробно на примере использования конструкторской 3D-модели детали при создании управляющих программ (УП) для изготовления деталей на станках с числовым программным управлением (ЧПУ).

**2. Использование конструкторской информации при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.** Рассмотрим сначала «классическую» схему использования конструкторской информации, как правило, функционирующую на большинстве отечественных предприятий оружейно-промышленного комплекса. Схема представлена на рисунке 1.

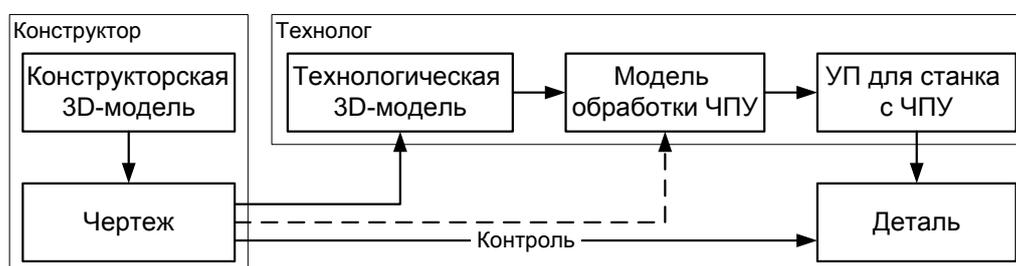


Рис. 1. «Классическая» схема информационных потоков

Конструктор создает конструкторскую 3D-модель детали в процессе проектирования изделия. Затем конструктор на основе геометрии и, возможно, элементов оформления и аннотирования 3D-модели создает чертеж детали. Чертеж проходит этап согласования и утверждения и сдается в архив предприятия. Как правило, подлинники документов выполняют в бумажной форме, но уже существуют предприятия, создающие подлинники в электронной форме.

Технолог или программист станков с ЧПУ, получив чертеж в бумажной форме или, что бывает реже, в электронной форме, строит собственную технологическую 3D-модель. Создание технологической 3D-модели является обязательным шагом при разработке УП. По сравнению с конструкторской 3D-моделью технологическая имеет ряд отличий. Геометрия 3D-модели построена по средним полям допусков размеров, а не по номинальным значениям размеров. Это позволит технологу разработать УП без использования корректоров, учитывающих допуски на размеры. В технологической 3D-модели могут отсутствовать некоторые геометрические элементы, не обрабатываемые на данной операции, и могут быть

построены дополнительные геометрические элементы для закрепления детали на станке для выполнения данной операции.

На основе технологической 3D-модели в системе автоматизированного проектирования обработки (САМ) проектируется модель обработки ЧПУ – «технологическая документация, которую можно непосредственно использовать для управления оборудованием с ЧПУ» [5]. В ней создается модель заготовки, выбирается режущий инструмент, задаются траектория движения инструмента, режимы резания и другие параметры обработки. При проектировании модели обработки ЧПУ дополнительно используется чертеж (штриховая линия на рисунке 1), как носитель информации, которая может отсутствовать в технологической 3D-модели: предельные отклонения размеров, чистота поверхности, отклонения формы и расположения поверхностей, технические требования. Данная информация учитывается технологом, но непосредственно в САМ не обрабатывается. Далее в САМ с помощью постпроцессора формируется УП для выбранного станка с ЧПУ. После изготовления деталь проверяется в отделе технического контроля на соответствие требованиям чертежа: «чертеж в бумажной форме по-прежнему является главным производственным документом» [8].

В ССП схема использования конструкторской информации значительно отличается от рассмотренной «классической» схемы. Схема информационных потоков в ССП представлена на рисунке 2.

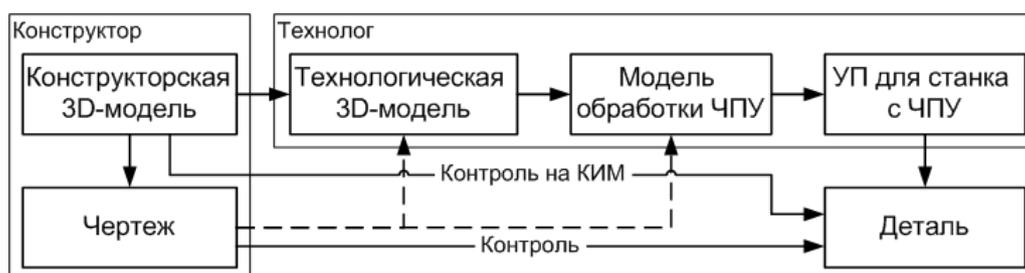


Рис. 2. Схема информационных потоков в ССП

Конструктор создает конструкторскую 3D-модель детали в процессе проектирования изделия. Затем конструктор на основе геометрии и элементов оформления и аннотирования 3D-модели создает ассоциативный чертеж детали. Ассоциативность чертежа означает, что при любом изменении в 3D-модели производится аналогичное изменение в чертеже. В ССП чертеж является иллюстрацией информации, содержащейся в 3D-модели, но только в виде привычного отображения на плоскости. Конструкторская 3D-модель и чертеж проходят этап согласования и утверждения и сдаются в архив предприятия. В данном случае желательно подлинники документов выполнять в электронной форме. «ДЭ [электронные документы] выполняют на стадии разработки изделия и применяют на всех последующих стадиях жизненного цикла изделия» [6].

Технолог или программист станков с ЧПУ получает доступ к конструкторской 3D-модели и чертежу детали. Как и в «классической» схеме, технолог должен построить технологическую 3D-модель, имеющую свои особенности. В ССП технологическая 3D-модель строится непосредственно на основе конструкторской 3D-модели. Для этого во многих САПР предусмотрена команда создания зависимой копии 3D-модели с односторонней ассоциативной связью. Таким образом, создается технологическая 3D-

модель, которая содержит всю информацию, имеющуюся в конструкторской модели, и в то же время отличается от конструкторской модели перестроением геометрии по средним полям допусков и доработкой геометрии в части добавления или удаления геометрических элементов. Представленный вариант создания технологической 3D-модели подтверждает следующий тезис: «борьба с ручным вводом информации в ЭВМ является одной из главных отличительных черт комплексной автоматизации вообще и САПР в особенности» [5]. При создании технологической 3D-модели чертеж может использоваться как источник представления информации в привычном плоском виде.

Далее технолог создает модель обработки ЧПУ и УП для станка с ЧПУ аналогично ранее рассмотренной схеме. После изготовления деталь проверяется в отделе технического контроля на соответствие требованиям конструкторской документации. В случае ручной проверки детали используется информация из чертежа. При наличии координатно-измерительной машины (КИМ) и соответствующего программного обеспечения возможна автоматизированная проверка детали. Информация для автоматизированной проверки загружается из конструкторской 3D-модели. В случае отсутствия возможности загрузки информации из конструкторской 3D-модели в КИМ используется чертеж детали для ручного переноса информации в КИМ.

### **3. Конструкторская 3D-модель в системе сквозного проектирования.**

Конструкторская 3D-модель в ССП является главным источником информации при переходе к этапу технологической подготовки производства. «В промышленном производстве важно понять, как перейти от проектирования к подготовке производства и слить эти процессы воедино, чтобы они учитывали потребности друг друга» [4]. Важно создать электронную модель изделия так, чтобы она правильно и всесторонне отражала замысел автора и содержала максимальное количество необходимой информации. Эта информация будет использоваться при создании ассоциативных чертежей, которые будут являться всего лишь иллюстрацией модели на плоскости. Такие чертежи нужны только человеку для привычного восприятия информации, в то время как для работы с современным оборудованием с ЧПУ и программным обеспечением необходима именно 3D-модель.

Непосредственно использовать конструкторскую 3D-модель в качестве технологической 3D-модели невозможно. Это ограничение накладывается как техническими причинами, так и организационными. С технической стороны технологю потребуются внести изменения в конструкторскую 3D-модель. С организационной стороны – конструкторская 3D-модель является электронным конструкторским документом и может быть изменена только конструктором в соответствии с определенными процедурами. Поэтому создается технологическая 3D-модель на основе исходной конструкторской 3D-модели, в которую вносят необходимые изменения. Следовательно, конструкторская 3D-модель должна отвечать определенным требованиям, чтобы ее можно было использовать в качестве исходной модели при создании технологической модели. В [4] говорится, что требования к моделям зависят от технологии. Рассмотрим требования, с учетом технологии изготовления детали на станке с ЧПУ, к совокупности электронных документов на деталь – к 3D-модели и чертежу, так как они используются совместно.

***Одинаковые размерные схемы в 3D-модели и на чертеже.*** Это требование необходимо для того, чтобы геометрия модели, перестроенная по средним полям допусков размеров, не выходила за допуски размеров, указанных на чертеже. Требование выполняется

за счет грамотного планирования топологии 3D-модели и выбора баз при построении геометрических элементов 3D-модели. В чертеж размеры должны переноситься из 3D-модели, проставлять размеры вручную не рекомендуется.

***Одинаковые значения размеров и предельных отклонений в 3D-модели и чертеже.***

Это требование очевидно, но его выполнение требует задания предельных отклонений размеров в 3D-модели. Для обеспечения соответствия значений в 3D-модели и чертеже размеры должны переноситься из 3D-модели в чертеж, не рекомендуется проставлять размеры вручную, а тем более использовать специальные команды, позволяющие изменить значение размера без соответствующего перестроения геометрии.

***3D-модель должна перестраиваться без ошибок по средним полям допусков размеров.*** Ошибки могут быть двух видов: 1) САПР не может перестроить 3D-модель и выдает ошибку, например, вырождается какой-либо геометрический элемент или невозможно построить контур; 2) появляется логическая ошибка, например, скругление перестает быть касательным к грани. Появление этих ошибок предотвращается использованием максимального числа геометрических ограничений и минимально допустимого количества размеров при построении 3D-модели.

***Выделить на модели размеры с высокой точностью.*** Это позволит технологу сразу обратить внимание на такие размеры и соответствующим образом построить технологический процесс изготовления детали. Требование выполняется созданием аннотаций для таких размеров в 3D-модели.

***Наличие реквизитов в 3D-модели и чертеже: обозначение, номер изменения.*** Необходимо для идентификации актуальности документов, для связи модели обработки ЧПУ с 3D-моделью. Решается использованием PDM-системы для управления электронными документами.

**4. Особенности практического использования.** Для непосредственного использования конструкторской информации, представленной в виде 3D-модели, при разработке УП для станков с ЧПУ она должна отвечать перечисленным выше требованиям. На практике до технолога не всегда доходит 3D-модель, соответствующая требованиям.

Во-первых, конструкторы не всегда могут спланировать и построить сразу правильную 3D-модель. Это связано со сложностью конструкции разрабатываемых изделий и деталей. Повторное перестроение 3D-модели или переопределение геометрических элементов, баз, размерных цепей требует значительного дополнительного времени на оформление электронной конструкторской документации. В [4] говорится, что создавать цифровой двойник имеет смысл, если понятно, как его использовать, и если он будет генерировать ценности, а не просто увеличит затраты. В то же время конструкторы не стремятся создавать 3D-модели, которые будут использовать технологи, т.к. «при работе в единой информационной среде уровень ответственности исполнителей меняется, они понимают, что введенная ими информация будет использоваться без изменений и преобразований во всех подразделениях» [3]. В настоящее время задачей конструкторов является выпуск конструкторской документации, в которой 3D-модель еще не заняла главного места.

Во-вторых, при использовании методов нисходящего проектирования, а это основной метод построения 3D-моделей деталей и сборочных единиц при проектировании новых изделий, в 3D-моделях деталей отсутствует часть размеров с предельными отклонениями,

так как размеры находятся в отдельной 3D-модели с управляющей геометрией. Этот недостаток метода построения можно нивелировать созданием в 3D-модели детали размеров с предельными отклонениями, и связав их уравнениями с управляющей геометрией, что требует от конструкторов дополнительного времени.

Технолог может использовать конструкторскую 3D-модель, не полностью соответствующую требованиям. Для этого ему придется доработать предоставленную 3D-модель. В современных САПР существуют инструменты прямого моделирования, позволяющие создавать размеры на необходимых геометрических элементах от требуемых баз без изменения топологии 3D-модели. Такой подход требует от технолога дополнительного времени на поиск несоответствий в 3D-модели и чертеже и на доработку модели. В таком случае бывает быстрее создать 3D-модель заново по чертежу, чем исправлять имеющуюся.

**Заключение.** В [7] отмечается, что «эффективность технологической подготовки машиностроительного производства, основанного на широком использовании станков с ЧПУ и другого цифрового оборудования, в значительной мере связана с возможностью организовать слаженную совместную работу технологических и производственных подразделений». В то же время, как было показано, не менее важной является совместная работа конструкторских и технологических подразделений в части подготовки и использования информации. Для практического воплощения существует техническое решение в виде системы сквозного проектирования, подготовлено нормативное обеспечение, существуют средства контроля за качеством 3D-моделей, обеспечивающие соответствием 3D-моделей и чертежей. Осталось самое главное – должно измениться отношение к 3D-модели, она должна стать из вспомогательного документа основным.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абакумов Е.М., Кожевников Н.О., Ульянин О.В., Кондратьев С.Е., Козачок В.К. Методология создания интегрированной информационной системы управления инженерными данными в условиях совместного использования конструкторской документации в бумажной и электронной формах // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2015. №3. С. 47–55.
2. Абакумов Е.М., Ульянин О.В., Козырев Д.Б., Козачок В.К. Создание интегрированной системы разработки сложных наукоёмких изделий предприятия приборостроительного профиля // Информационные технологии в проектировании и производстве. 2014. №4. С. 10–17.
3. Бабушкин Б. Информация как основа цифрового производства // Умное производство. 2018. №42. Режим доступа: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=899&group\\_id\\_4=117&m\\_id\\_4=44](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=899&group_id_4=117&m_id_4=44) (дата обращения 23.04.2019).
4. Бакарджиева С. Карл Ости: «Цифровой двойник – это часть экосистемы предприятий» // Умное производство. Электрон. журн. 2018. №43. Режим доступа: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=925&group\\_id\\_4=24&m\\_id\\_4=45](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=925&group_id_4=24&m_id_4=45) (дата обращения 23.04.2019).
5. Глушков В.М. Основы безбумажной информатики. Изд. 2-е, испр. М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит. 1987. 552 с.

6. ГОСТ 2.051-2013 Единая система конструкторской документации. Электронные документы. Общие положения. – Взамен ГОСТ 2.051-2006; введ. 2014-06-01. М.: Стандартинформ. 2014. 10 с.
  7. Зарубин С. Система управления технологической информацией как интеграционная среда работы технолога-программиста оборудования с ЧПУ // САПР и Графика. 2019. №5. С. 30–31.
  8. Информационные технологии поддержки жизненного цикла изделий машиностроения: проблемы и решения / Л. В. Губич и др. 2-е изд., испр. и доп. Минск: Издательский дом «Белорусская наука». 2010. 286 с.
  9. Козырев Д.Б., Абакумов Е.М. Вопросы создания электронной конструкторской документации при комплексном использовании САПР Creo Parametric и PDM-системы Windchill // Информационные технологии и системы: тр. Третьей междунар. науч. конф., Банное, Россия, 26 февр. – 2 марта 2014 г. (ИТиС – 2014): науч. электр. изд. (1 файл 9,9 Мб) / отв. ред. Ю. С. Попков, А. В. Мельников. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та, 2014. 1 опт. диск. С. 100–102.
  10. Синельников А.В., Бачурин А.В. Особенности интеграции PDM-системы с CAD-системами // Труды XVII международной научно-практической конференции “ Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM - 2017)”. Под ред. А.В. Толока. М.: Институт проблем упр. им. В.А. Трапезникова РАН. 2017. С. 398–401.
- 

UDK 004.622

## FEATURES OF PRACTICAL USE OF INFORMATION IN THE SYSTEM THROUGH THE DESIGN AT THE STAGE OF TECHNOLOGICAL PREPARATION OF PRODUCTION

Denis B. Kozyrev

Deputy chief of department,

Dukhov Research Institute of Automatics (VNIIA),

22, Sushevskaya Str., 127055, Moscow, Russia, e-mail: Kozirev@vniia.ru

**Abstract.** The paper presents the use of design information in the development of control programs for machines with numerical control. The presented scheme is a standard use of engineering 3D models and drawing in the system through the design, requirements on electronic design documentation. The features of practical creation and use of 3D-models are considered.

**Keywords:** the system through the design, electronic design documentation, 3D model, technological model, numerical control.

### References

1. Abakumov E.M., Kozhevnikov N.O., Ulianin O.V., Kondratiev S.E., Kozachok V.K. Metodologiya sozdaniya integrirovannoy informacionnoy sistemy upravleniya inzhenernymi dannymi v usloviyah sovmestnogo ispolzovaniya konstruktorskoj dokumentacii v bumazhnoy i

- elektronnoy formah [Methodology of creation of integrated information system of engineering data management in the conditions of joint use of design documentation in paper and electronic forms] // *Informacionnye tehnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technology of CAD/CAM/CAE*. 2015. №3. Pp. 47–55. (in Russian)
2. Abakumov E.M., Ulianin O.V., Kozyrev D.B., Kozachok V.K. Sozdanie integrirovannoy sistemy razrabotki slozhnyh naukoemkih izdeliy predpriyatiya priborostroitel'nogo profilya [Creation of the integrated system of development of difficult knowledge-intensive products of the enterprise of an instrument-making profile] // *Informacionnye tehnologii v proektirovanii i proizvodstve = Information technology of CAD/CAM/CAE*. 2014. №4. Pp. 10–17. (in Russian)
  3. Babushkin B. Informatsiya kak osnova cifrovogo proizvodstva [Information as basis of digital production] // *Umnoe proizvodstvo = Intelligent manufacturing Journal*. 2018. №42. Available at: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=899&group\\_id\\_4=117&m\\_id\\_4=44](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=899&group_id_4=117&m_id_4=44) (accessed 23.04.2019). (in Russian)
  4. Bakardzhieva S. Karl Osti “Cifrovoy dvoynik – ehto chast ehkosistemy predpriyatiy” [Karl Osti “The digital double is a part of an ecosystem of the enterprises”] // *Umnoe proizvodstvo = Intelligent manufacturing Journal*. 2018. №43. Available at: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=925&group\\_id\\_4=24&m\\_id\\_4=45](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=925&group_id_4=24&m_id_4=45) (accessed 23.04.2019) (in Russian)
  5. Glushkov V.M. Osnovy bezbumazhnoy informatiki [Foundation of paperless informatics]. Moscow. Nauka = Science. 1987. 552 p. (in Russian)
  6. GOST 2.051-2013 Yedinaya sistema konstruktorskoy dokumentatsii. Ehlektronnye dokumenty. Obschie polozheniya. – Vzamen GOST 2.051-2006; vved. 2014-06-01. [GOST 2.051-2013 Unified system for design documentation. Digital documents. General principles - Instead of GOST 2.051-2006; enter 2014-06-01]. Moscow. Standartinform. 2014. 10 p. (in Russian)
  7. Zarubin S. Sistema upravleniya tehnologicheskoy informatsiey kak integratsionnaya sreda raboty tehnologa-programmista oborudovaniya s CHPU [Control system of technological information as integration environment of work of the technologist-programmer of the CNC equipment] // *SAPR i Grafika = CAD and Graphics*. 2019. №5. Pp. 30–31. (in Russian)
  8. Informacionnye tehnologii podderzhki zhiznennogo tsikla izdeliy mashinostroeniya: problemy i resheniya [Information technologies to support the life cycle of engineering products: problems and solutions] / L.V. Gubich and others. Minsk. Izdatel'skiy dom «Belorusskaya nauka» = Publishing House «Belarusian Science». 2010. 286 p. (in Russian)
  9. Kozyrev D.B., Abakumov E.M. Voprosy sozdaniya ehlektronnoy konstruktorskoy dokumentatsii pri kompleksnom ispolzovanii SAPR Creo Parametric i PDM-sistemy Windchill [Questions of creation of electronic design documentation at complex use of CAD Creo Parametric and PDM Windchill] // *Informacionne tehnologii i sistemy: tr. Tret'ey mezhdunar. nauch. konf., Bannoe, Rossiya, 26 fevr. – 2 marta 2014 g. (ITiS – 2014) = Proceedings of the 3th International Scientific Conference "Information Technologies and Systems" (ITiS – 2014)*. Chelyabinsk. Izd-vo Chelyab. gos. Un-ta = Chelyabinsk State University. Pp. 100–102. (in Russian)
  10. Sinelnikov A.V., Bachurin A.V. Osobennosti integratsii PDM-sistemy s CAD-sistemami [Features of PDM integration with CAD] // *Trudy XVII mezhdunarodnoy nauchno-*

prakticheskoy konferentsii “Sistemy proyektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta“ (CAD/CAM/PDM - 2017). Pod red. A.V. Toloka = Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference “Systems for the Design, Technological Preparation of Production and Management of the Life Cycle Steps of an Industrial Product” (CAD / CAM / PDM - 2017). Ed. A.V. Toloka. Moscow. Institut problem upr. im. V.A. Trapeznikova RAN = V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. Pp. 398–401. (in Russian)

## АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ - ПОДДЕРЖКА АБИТУРИЕНТОВ В ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

Деканова Нина Петровна

Д.т.н., профессор, e-mail: dekhan@yandex.ru

Махнев Сергей Александрович

Аспирант, e-mail: still-1994@mail.ru

Иркутский государственный университет путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15

**Аннотация.** В настоящее время качество высшего образования характеризуется возможностью трудоустройства по результатам его получения. Обучающимся требуется помощь на всех этапах обучения, начиная с поступления абитуриентов в высшие учебные заведения (ВУЗы) и заканчивая успешным трудоустройством. Предлагается использование нейронной сети для поддержки принятия решения по успешному прохождению обучения, а в последующем и трудоустройству выпускников ВУЗа.

**Ключевые слова:** трудоустройство, поддержка принятия решений, нейронные сети, ВУЗ, абитуриент, Восточная Сибирь.

**Цитирование:** Деканова Н.П., Махнев С.А. Анализ социальных сетей - поддержка абитуриентов в профессиональной ориентации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2019. № 4 (16). С. 131–141. DOI: 10.25729/2413-0133-2019-4-11

**Введение.** Модернизация системы образования является необходимым условием для формирования инновационной экономики России. Принципы реализации Государственной политики и правовое регулирование в сфере образования и системе образовательных услуг в современной России достаточно широко обсуждаются в отечественной литературе [13]. В последнее время находят широкое развитие и распространение компьютерные системы в рамках профильного и дистанционного обучения, анализа знаний обучающихся и т. п. [6, 9]. В то же время вопросы выбора университета для обучения остаются недостаточно изученными специалистами в данной области, хотя процесс принятия решения о выборе направления дальнейшего обучения является очень важным и трудным для многих подростков и их родителей. Известные исследования, как правило, относятся к выбору университета в целом. Для абитуриентов одним из факторов, принимаемым во внимание при выборе университета, является престижность университета. На международном уровне рейтинг университета определяется с помощью интегрального показателя одного из мировых университетских рейтингов [10]. Другим немаловажным фактором является возможность достойного трудоустройства по полученной специальности [7]. В настоящее время перспективы развития в области моделирования процесса выбора абитуриентами вуза для дальнейшего обучения связывают с новыми вычислительными подходами, включающими генетические алгоритмы, нейронные сети, нечеткое и агентное моделирование [14].

В данной работе исследованы вопросы анализа и прогнозирования численности абитуриентов, изучены проблемы трудоустройства и предложен вычислительный метод, использующий обучаемую нейронную сеть с целью поиска аналогий социальных интересов (спорт, музыка, группы в сети интернет) конкретного абитуриента и сведений, хранящихся в базе прецедентов о студентах различных выпускающих кафедр, успешно завершивших обучение в ВУЗе. Обнаружение таких аналогий с данными о студентах определенных направлений обучения позволяет дать рекомендации по профессиональной ориентации в рамках университета конкретному абитуриенту.

**1. Анализ и прогнозирование численности поступающих в ИрГУПС.** Рейтинг университета регионального значения можно оценить по тенденции изменения численности поступающих в ВУЗ. На основе данных о количестве поступающих в ВУЗы, с глубиной более пяти лет, можно спрогнозировать возможное число абитуриентов от одного года и более для конкретного ВУЗа. Например, число поступивших в Иркутский государственный университет путей сообщения (ИрГУПС) в период с 2004 по 2018 годы представлено на рисунке 1. Получена линейная регрессионная функция вида:

$$y \approx 350x + 526. \quad (1)$$

Математическое ожидание выборки, равно

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i = 3321, \quad (2)$$

где  $n = 15$  - количество годовых интервалов наблюдения;  $y_i$  - количество поступивших студентов в  $i$ -й период времени. Средняя квадратическая ошибка уравнения регрессии  $\sigma = 567$ , получена по следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_i^r)^2}{n-p}}, \quad (3)$$

где  $n = 15$  - количество годовых интервалов наблюдения;  $p = 2$  - число параметров линейной регрессионной функции (1);  $y_i^r$  - расчетное значение поступивших по регрессионной модели в  $i$ -й период времени.

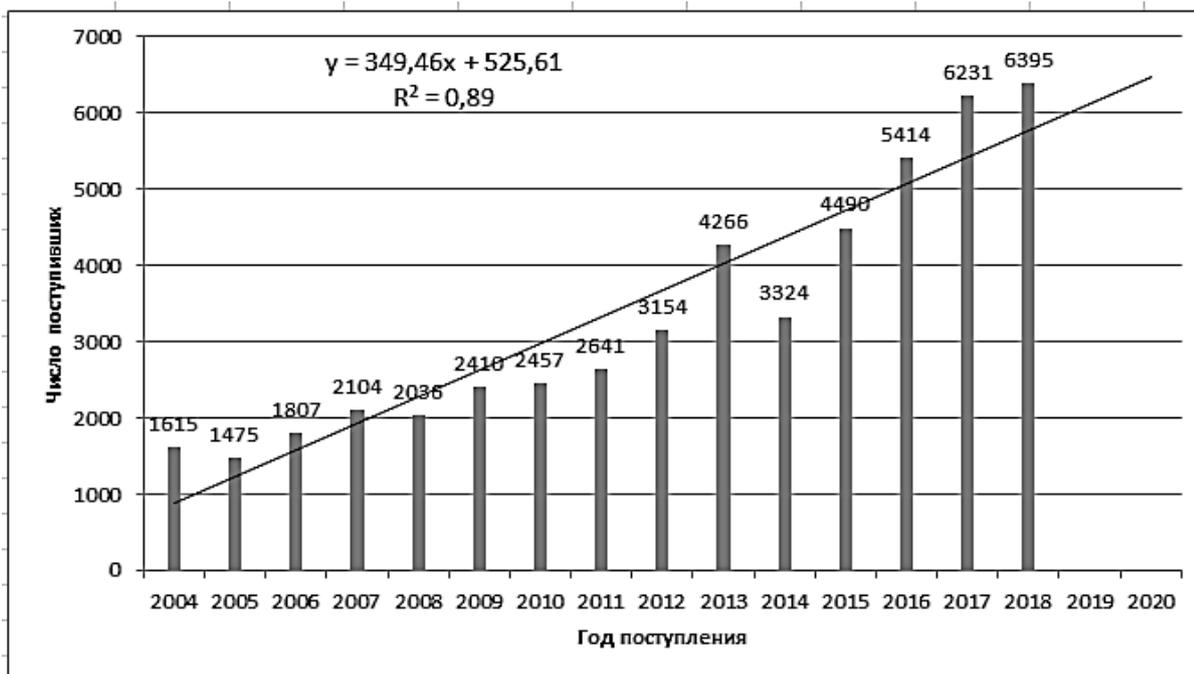


Рис. 1. Число поступивших в ИрГУПС с 2004 по 2020 гг.

Коэффициент достоверности аппроксимации равен  $R^2 = 0,89$ , вычисляется по следующей формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n y_i - y_i^r}{\sum_{i=1}^n y_i - \mu^2} \quad (4)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации показывает, что выбранная регрессионная функция достаточно точно описывает имеющиеся эмпирические данные. Согласно регрессионной модели (1) в 2019 ожидается поступление 6117 студентов, а в 2020 году – 6466. Причем ошибки прогноза составляют 308 и 338 человек, соответственно. Ошибка прогноза вычисляется по формуле:

$$m = \sigma \cdot \frac{1}{n} + \frac{t_k^2}{(n-1)/2 \cdot t_j^2} = \sigma \cdot \frac{1}{n} + \frac{12 \cdot t_k^2}{n^3 - n} \quad (5)$$

Здесь  $t_j$  - номер интервала, считая от середины интервала наблюдения ( $j = 1, \dots, 7$ );  $t_k$  - номер интервала прогноза, считая от середины интервала наблюдения ( $t_k = 8, 9$ ).

Очевидно, что при увеличении интервала прогнозирования ошибка прогноза также увеличивается. Поэтому трендовое прогнозирование используется, в основном, для краткосрочного прогнозирования, например, для прогнозирования числа поступающих на один-два года.

Для получения достаточно надежных границ прогноза, например, с вероятностью  $\alpha = 0,9$  того, что ошибка не будет больше указанной, среднюю ошибку следует умножить на величину t-критерия Стьюдента при выборе вероятности, равной 0,1 и при числе степеней свободы равном  $n-p=13$ .

Ошибка прогноза  $\Delta y$  учитывает ошибку аппроксимации:

$$\Delta y = \sqrt{\sigma^2 + t \cdot m^2}, \quad (6)$$

где  $t$  - критерий Стьюдента, при выбранной вероятности  $\alpha = 0,9$  равной 2. Результаты ошибок прогноза представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты ошибок прогноза

Параметр	Значение	
Среднее квадратическое отклонение	590	
Год прогноза	2019	2020
Средняя ошибка прогноза	313	353
Ошибка прогноза	812	862

Расчеты показывают, что с вероятностью 0,9 в 2019 году количество поступающих в ИрГУПС студентов ожидается в диапазоне с 5305 до 6929, а в 2020 с 6929 до 7095.

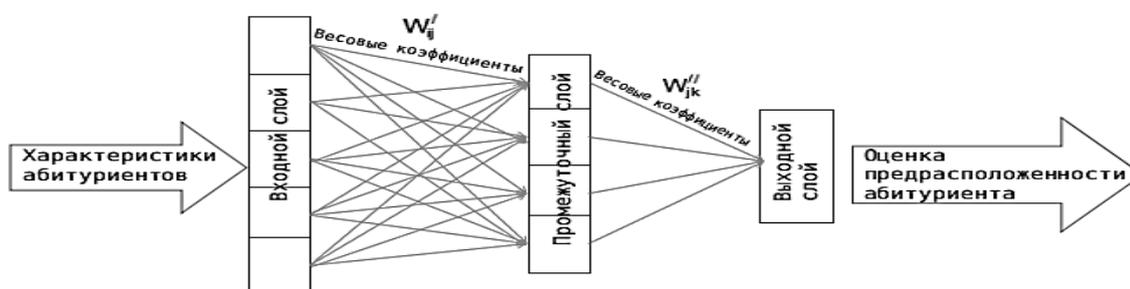
**2. Вычислительный метод поиска аналогий интересов конкретного абитуриента с интересами студентов, сгруппированных по направлению обучения.** Рассмотрим статистику отчислившихся по ступени бакалавриат за четыре года, начиная с 2014 года, в Иркутском государственном университете путей сообщений. В статистику попадают только те обучающиеся, которые отчислялись на первом году обучения. На основе полученных данных вычислим процент отчисленных к числу поступивших (табл. 2).

**Таблица 2.** Статистика отчислившихся по степени бакалавриат

Показатель	Год			
	2014	2015	2016	2017
Число поступивших	2808	2757	4662	4480
Число отчисленных	311	302	437	469
Процент отчисленных к числу поступивших	11%	11%	9%	10%

Таким образом, каждый год на 100% поступивших в среднем 10% не доучиваются и года. Во многих случаях обучающиеся приходят к выводу, что выбранное направление им не подходит. Представляется, что вероятность ошибочного выбора при поступлении можно снизить, если воспользоваться данными социальных сетей и провести анализ близости предпочтений конкретного абитуриента и предпочтений групп студентов определенных направлений обучения. В настоящее время анализ структуры социальных графов и текстовых данных, получаемых из социальных сетей, является одним из наиболее эффективных методов исследования взаимодействий между участниками сети. В ряде работ приводятся методы сбора и анализа данных социальных сетей, задачи и различные области приложения [2, 1].

Для анализа предпочтений абитуриентов и оказания им помощи в процессе выбора специальности было решено использовать нейронную сеть, структура которой представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Структура нейронной сети

Процесс работы с нейронной сетью включает следующие этапы:

1. Первоначальное обучение сети на основе сбора данных, хранящихся в социальных сетях, и анализ интернет-предпочтений студентов, сгруппированных по направлениям обучения.
2. Формирование правил поиска аналогий предпочтений конкретного абитуриента и основных предпочтений студентов в соответствии с направлением обучения.
3. Обученная таким образом нейронная сеть используется в приемной комиссии – абитуриент вводит свой идентификационный номер в социальной сети и получает рекомендацию по выбору направления обучения.
4. Один раз в год проводится переобучение нейронной сети. В социальных сетях осуществляется сбор данных о студентах, успешно освоивших программу обучения,

и в базу прецедентов, в соответствии с направлением обучения, добавляются новые данные. Итерационный процесс переходит на второй этап.

Апробация нейронной сети была выполнена на основе данных о небольшой группе обучающихся по направлениям обучения “Информационные системы и технологии” и “Управление качеством в производственно-технологических системах”: был выполнен поиск зависимостей направлений обучения и интернет-интересов обучающихся. Кроме того, были проанализированы интересы небольшой группы отчисленных студентов для поиска обратной зависимости.

В результате анализа было выявлено, что у 60% студентов направления “Информационные системы и технологии” обнаружены схожие интересы по 5 интернет-группам. У 30% из них интересы сходятся по 10 пунктам и у 10% из них схожесть интересов достигла 17 пунктов. Оставшиеся 40% от общего числа имеют множество точек соприкосновения с выбранной группой, но конкретной систематики выделить не удалось.

Среди студентов, обучающихся по направлению “Управление качеством в производственно-технологических системах”, лишь у 30% была обнаружена схожесть интересов по пяти пунктам, но эти интересы носят сугубо развлекательный характер.

На основе анализа интересов отчисленных студентов выяснилось, что схожесть интересов с группой завершивших обучение по направлению “Информационные системы и технологии” только у 10%, у остальных точки соприкосновения поверхностны. Для направления “Управление качеством в производственно-технологических системах” процент схожести нулевой, разброс интересов, даже с учетом развлекательного кластера, слишком большой [12].

На основе полученных данных можно сделать вывод, что социальная направленность интересов студента – один из факторов, учет которого позволит повысить обоснованность выбора абитуриентом профессионального направления обучения. Можно ожидать снижения числа отчислившихся студентов, за счет исключения проблемного фактора - выбора направленности обучения без достаточной мотивации и информированности абитуриентов.

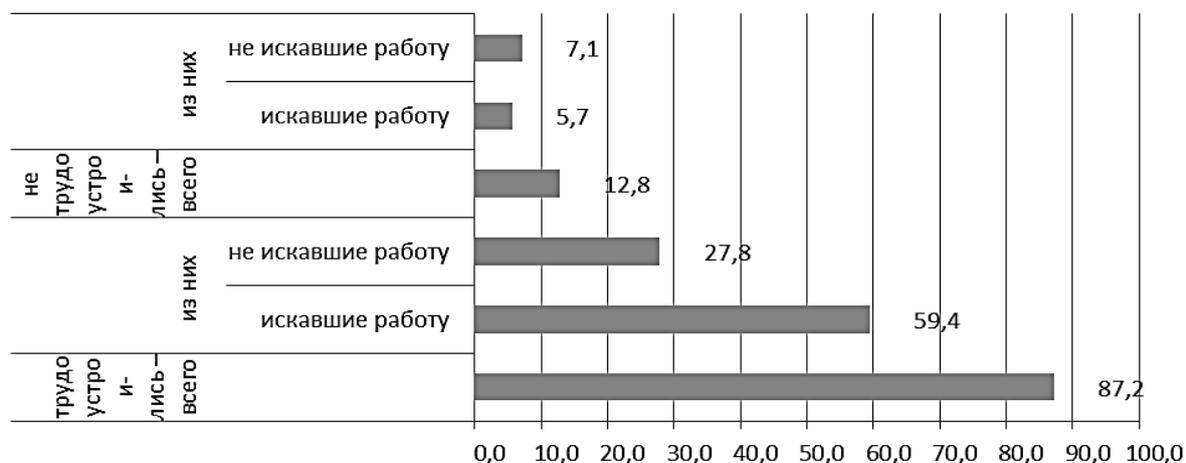
Метод поиска аналогий в социальных сетях может быть достаточно эффективным не только в рамках выбора абитуриентом направления обучения, но и в дальнейшем пути - выборе места работы (предприятия) по окончании ВУЗа.

**3. Трудоустройство выпускников.** Основной задачей высшего образования является улучшение качества образования и формирование профессионалов, способных эффективно работать в условиях современной экономики и полностью отвечать запросам современного общества. Реформирование процесса обучения неизбежно сопряжено с кризисом системы высшего образования. К настоящему времени отмечается, с одной стороны, частичная утрата конкурентоспособности высшего образования в плане получения студентами научных знаний на мировом уровне, с другой стороны, медленно и не всегда эффективно осуществляется взаимодействие ВУЗов с отраслями производства, экономики и социальной сферы.

Исследование «субъективного» рейтинга привлекательности ВУЗов для абитуриентов показало, что, если в 2011 году четко обозначался «Западный вектор», поскольку абитуриенты из Восточной Сибири устремились на Запад, то уже в 2012 году наблюдалось приостановление динамики миграции абитуриентов в западном направлении. С 2014 года наметилась тенденция предпочтения абитуриентами региональных ВУЗов. Специалисты

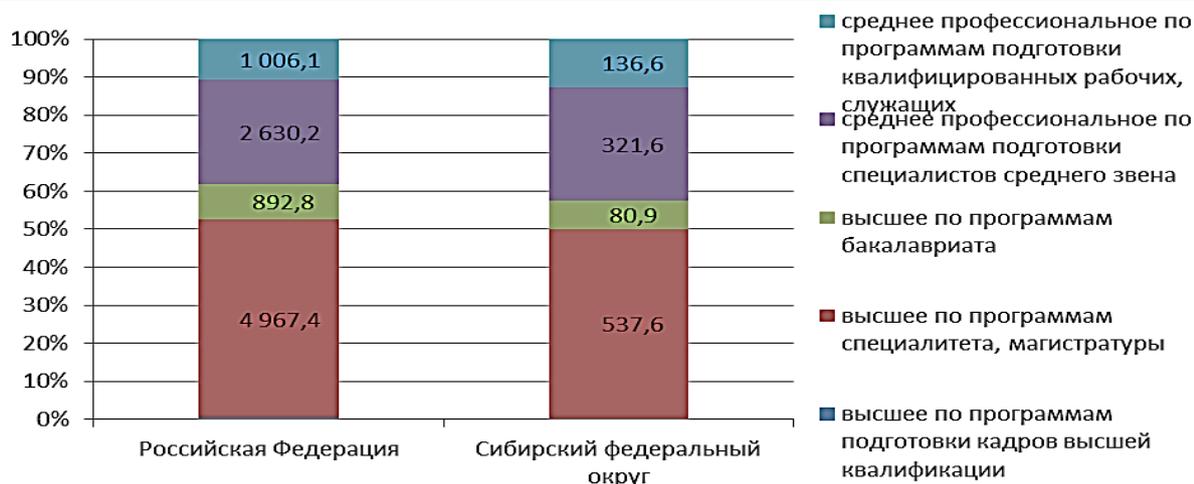
отмечают, что нередко абитуриенты при выборе ВУЗа руководствуются «красивой картинкой» или мнением родителей. Следовательно, выбор абитуриента определяется во многом качеством сервиса при приеме заявлений и качеством агитации. Для родителей важность представляют репутация ВУЗа, преподавательский состав, возможность ознакомиться с учебными планами и перспективы дальнейшего трудоустройства [3].

Сложность трудоустройства выпускников ВУЗов возникает в связи с дефицитом рабочих мест на рынке труда, а также несоответствием между профессиональными качествами выпускников и требованиями, которые предъявляет работникам современный рынок труда [4]. Проблема усугубляется несбалансированностью объемов и профилей подготовки с потребностями рынка труда. Помимо этого, современные выпускники несерьезно подходят к вопросам выбора профессии и поиска работы [5]. Это подтверждается данными выборочного наблюдения трудоустройства выпускников вузов Сибирского Федерального округа по данным исследования в 2015 году (рис. 3). В 2016 году Федеральной службой государственной статистики впервые было проведено комплексное исследование трудоустройства выпускников, которые получили среднее профессиональное и высшее образование. В результате сформирована сводная статистическая информация, которая наглядно отражает трудоустройство и степень закрепляемости выпускников по полученной профессии. Выявлено, что около 30-40% выпускников вузов не осуществляли поиск работы вовсе, а примерно 50-60% стали искать работу по профилю полученной специальности после окончания обучения.



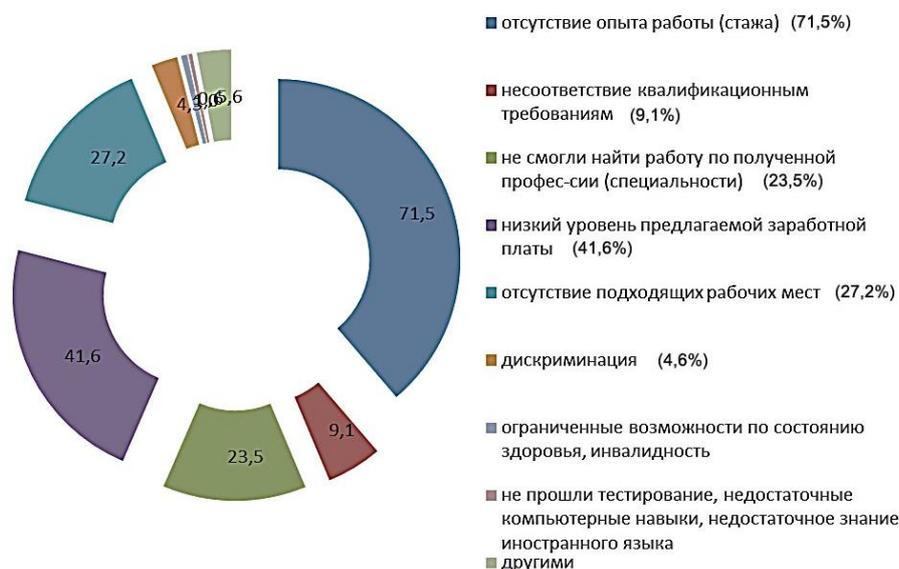
**Рис. 3.** Показатели трудоустройства выпускников вузов Сибирского Федерального округа, %

Соответственно, в ВУЗах недостаточно эффективно организована первичная работа с выпускниками по вопросам их трудоустройства, что отрицательно сказывается на качестве высшего образования. Наиболее высокий удельный вес по трудоустройству имеют выпускники, получившие образование по программам специалитета и магистратуры – более 50% (рис. 4). В Сибири можно наблюдать ту же тенденцию, однако процент трудоустройства специалистов среднего звена выше, чем по стране [7].



**Рис. 4.** Показатели трудоустройства выпускников образовательных учреждений по Российской Федерации и Сибири, %

Отсутствие практических знаний и навыков - одна из причин невозможности выпускника устроиться на работу. Другой причиной является отсутствие подходящих рабочих мест. При этом выпускники не имеют достаточного уровня квалификации, чтобы справиться с поставленными перед ними на работе задачами [8]. На рис. 5. представлена структура причин, вызывающих трудности при попытках оформить на работу для выпускников с высшим образованием Сибирского Федерального округа.



**Рис. 5.** Соотношение причин, вызывающих трудности при попытках оформить на работу для выпускников с высшим образованием Сибирского Федерального округа, %

Изучение ВУЗом факторов, оказывающих влияние на трудоустройство выпускника по специальности, необходимо в целях корректировки плана приема абитуриентов и всего учебного процесса [11]. Студентам должна быть доступна информация о трудоустройстве выпускников своего факультета, а также возможность оценить соответствие приобретенных умений и навыков тем требованиям, которые выдвигают потенциальные работодатели. Для этого необходимо масштабировать имеющуюся нейронную сеть: добавить к хранящимся в

базе данным прецеденты трудоустройства; дополнить правила поиска аналогий и увеличить размерность нейронной сети.

**Заключение.** В целях обеспечения качества высшего образования в работе представлен новый подход к применению информационных технологий, основанный на поиске аналогий предпочтений в социальной сети конкретного лица и группы студентов, обучающихся в некотором профессиональном направлении, позволяющий на базе нейронной сети сформулировать рекомендации по профессиональной ориентации конкретного абитуриента. Апробация нейронной сети была выполнена в ИрГУПС. Исходя из предпочтений абитуриентов, извлеченных из социальных сетей, с помощью нейросети были сформированы рекомендации по их профессиональной ориентации в рамках ВУЗа. В дальнейшем ее предлагается масштабировать, например, в предложении выпускникам подходящих рабочих мест согласно схожести их интересов с интересами выпускников прошлых лет, работающих на соответствующих предприятиях. Такая модификация позволит эффективно использовать данную нейронную сеть, как абитуриентам, так и выпускникам различных ВУЗов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антон Коршунов, Иван Белобородов, Назар Бузун, и др. Анализ социальных сетей: методы и приложения // Труды Института системного программирования РАН. 2014. С. 439–456.
2. Батура Т. В., Копылова Н. С., Мурзин Ф. А., Проскуряков А. В. Методы анализа данных из социальных сетей // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Информационные технологии. 2013. Т. 11. вып. 3. С. 5–21
3. Болодурина И.П., Ханжина Н.В. Влияние эффективного трудоустройства выпускника ВУЗа на развитие человеческого капитала // Материалы Девятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» MLSD'2016: в 2-х томах. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. 2016. С. 340–342.
4. Выборочное наблюдение трудоустройства выпускников 2016. Электронный ресурс. Режим доступа: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/population/trud/itog\\_trudoustr/index.html](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/trud/itog_trudoustr/index.html) (дата обращения 28.06.2019)
5. Головецкий Н.Я., Мирошниченко Л.Н., Колесникова С.В. Государственная политика России в сфере образования: понятие и принципы // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Том 7. №5
6. Доклад Правительства Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации о реализации государственной политики в сфере образования. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/i6yH0TiCpoJ6dcd0zebKpxcts8ttFE42.pdf> (дата обращения 28.06.2019)
7. Егоров П.Н. Вопросы адаптации выпускников ВУЗа на рынке труда // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Экономика. Социология. Культурология. 2016. № 3 (3). С. 36–42.
8. Имидж — все. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://expert.ru/siberia/2015/36/imidzh--vse/> (дата обращения 28.06.2019)

9. Киселева И.А., Чванова М.С. и др. Использование экспертных систем в образовании // Вестник Тамбовского университета. Серия: Гуманитарные науки. 2013. С. 47–54.
10. Московкин В.М. Имитационная экспертная система выбора университетов для обучения // Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы. 2009. № 10. С. 19–21. Режим доступа: <http://dspace.bsu.edu.ru/handle/123456789/306> (дата обращения 28.06.2019)
11. Наумова В.Д. Трудоустройство выпускников как показатель качества образования // Материалы LX студенческой международной научно-практической конференции «Научное сообщество студентов XXI столетия. Экономические науки». Новосибирск: Изд. АНС «СибАК». 2017. № 12 (60). Часть 3. С. 13–15. Режим доступа: [http://www.sibac.info/archive/economy/12\(60\).pdf](http://www.sibac.info/archive/economy/12(60).pdf) (дата обращения 28.06.2019)
12. Образование-наука-производство // Материалы Всероссийской научно-практической конференции, 7 декабря 2018 г. Чита: ЗаБИЖТ ИрГУПС. 2018. 304 с. Режим доступа: [https://mir.ismu.baikal.ru/src/downloads/0ce15db2\\_tom\\_2\\_chita\\_irgups.pdf](https://mir.ismu.baikal.ru/src/downloads/0ce15db2_tom_2_chita_irgups.pdf) (дата обращения 28.06.2019).
13. Роль институтов в жизни общества и каждого отдельного человека // Единый Центр Высшего Дистанционного Образования. Режим доступа: <http://www.ecvdo.ru/states/rol-institutov-v-zhizni-obshhestva-i-kazhdogo-otdelnogo-cheloveka> (дата обращения: 13.04.2019).
14. Самойло И.В., Жуков Д.О. Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования // Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования: сборник научных статей. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов НИТУ "МИСиС". 2010. Кн. 2. С. 89–95.

---

## UDK 378

### ANALYSIS OF SOCIAL NETWORKS - SUPPORT FOR APPLICANTS IN PROFESSIONAL ORIENTATION

**Nina P. Dekanova**

Dr., Professor, e-mail: [dekhan@yandex.ru](mailto:dekhan@yandex.ru)

**Sergey A. Makhnev**

Graduate student, e-mail: [still-1994@mail.ru](mailto:still-1994@mail.ru)

Irkutsk State University of Railways, 664074, Irkutsk, Chernyshevsky str., 15

**Abstract.** Currently, the quality of higher education is characterized by employment opportunities based on the results of its receipt. Starting with the enrollment of applicants in universities, ending with successful employment, students need help. The decision support system acts in this study as a means to achieve successful completion of training, and, subsequently, employment.

**Keywords:** employment, decision support system, artificial intelligence neural networks, university, entrant, Eastern Siberia.

## References

1. Anton Korshunov, Ivan Beloborodov, Nazar Buzun et al. Analiz social'nyh setej: metody i prilozheniya [Analysis of social networks: methods and applications] // Trudy Instituta sistemnogo programmirovaniya RAN = Proceedings of ISP RAS Transactions of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences. 2014. Pp. 439–456. (in Russian)
2. Batura T.V., Kopylova N.S., Murzin F.A., Proskuryakov A.V. Metody analiza dannyh iz social'nyh setej [Methods of analysis of data from social networks] // Vestn. Novosib. gos. un-ta. Seriya: Informacionnye tekhnologii = Vestnik NSU. Series: Information Technologies. 2013. Vol. 11. no 3. Pp. 5–21. (in Russian)
3. Bolodurina I.P., Khanzhina N.V. Vliyanie effektivnogo trudoustrojstva vypusknika VUZa na razvitie chelovecheskogo kapitala [The impact of effective employment of a university graduate on the development of human capital] // Materialy Devyatoy mezhdunarodnoy konferentsii «Upravleniye razvitiyem krupnomasshtabnykh sistem» MLSD'2016 = Materials of the Ninth international conference “Management of the development of large-scale systems” MLSD'2016. 2016. Pp. 340–342. (in Russian)
4. Vyborochnoe nablyudenie trudoustrojstva vypusknikov 2016 [Selective monitoring of graduate employment 2016]. Available at: [http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/population/trud/itog\\_trudoustr/index.html](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/population/trud/itog_trudoustr/index.html) (accessed 28.06.2019). (in Russian)
5. Golovetsky N.Ya., Miroshnichenko L.N., Kolesnikova S.V. Gosudarstvennaya politika Rossii v sfere obrazovaniya: ponyatie i principy [State policy of Russia in the field of education: concept and principles] // Internet-zhurnal «Naukovedenie» = Internet journal "Science of Science". 2015. Volume 7. No. 5. (in Russian)
6. Doklad Pravitel'stva Rossijskoj Federacii Federal'nomu Sobraniyu Rossijskoj Federacii o realizacii gosudarstvennoj politiki v sfere obrazovaniya [Report of the Government of the Russian Federation to the Federal Assembly of the Russian Federation on the implementation of state policy in the field of education]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/i6yH0TiCpoJ6dcd0zebKpxcts8ttFE42.pdf> (accessed 28.06.2019). (in Russian)
7. Egorov P.N. Voprosy adaptacii vypusknikov VUZa na rynke truda [Adaptation issues for university graduates in the labor market] // Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Ekonomika. Sociologiya. Kul'turologiya = Vestnik of North-Eastern Federal University “Economics. Sociology. Culturology” Series. 2016. No. 3 (3). Pp. 36–42. (in Russian)
8. Imidzh — vse [Image is everything]. Available at: <http://expert.ru/siberia/2015/36/image--vse/> (accessed 28.06.2019). (in Russian)
9. Kiseleva I.A., Chvanova M.S. et al. Ispol'zovanie ekspertnyh sistem v obrazovanii [The use of expert systems in education] // Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye nauki = Tambov University Review. Series Humanities. 2013. Pp. 47–54. (in Russian)
10. Moskovkin V.M. Imitacionnaya ekspertnaya sistema vybora universitetov dlya obucheniya [Simulation Expert System for the Selection of Universities for Education] // Nauchno-tekhnicheskaya informatsiya. Seriya 2. Informatsionnyye protsessy i sistemy = Scientific and technical information. Series 2. Information processes and systems. 2009. No. 10. Pp. 19–21.

Available at: <http://dspace.bsu.edu.ru/handle/123456789/306> (accessed 28.06.2019). (in Russian)

11. Naumova V.D. Trudoustrojstvo vypusnikov kak pokazatel' kachestva obrazovaniya [Employment of graduates as an indicator of the quality of education] // Materialy LX studencheskoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Nauchnoye soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Ekonomicheskiye nauki» = Materials LX student international scientific-practical conference "Scientific community of students of the XXI century. Economic sciences. Novosibirsk. Izd. ANS «SibAK» = Publishing House ANS "SibAK". No. 12 (60). Part 3. Pp. 13–15. (in Russian)
12. Obrazovanie-nauka-proizvodstvo [Education-science-production] // Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 7 dekabrya 2018 g = Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, December 7, 2018. Chita: ZabIZHT IrGUPS = ZabIZhT IrGUPS. 2018. 304 p. Available at: [https://mir.ismu.baikal.ru/src/downloads/0ce15db2\\_tom\\_2\\_chita\\_irgups.pdf](https://mir.ismu.baikal.ru/src/downloads/0ce15db2_tom_2_chita_irgups.pdf) (accessed June 28, 2019). (in Russian)
13. Rol' institutov v zhizni obshchestva i kazhdogo otdel'nogo cheloveka [The role of institutions in the life of society and each individual person] // Edinyj Centr Vysshego Distancionnogo Obrazovaniya = Unified Center for Higher Distance Education. Available at: <http://www.ecvdo.ru/states/rol-institutov-v-zhizni-obshchestva-i-kazhdogo-otdelnogo-cheloveka> (accessed 13.04.2019). (in Russian).
14. Samoilo I.V., Zhukov D.O. Informacionnye tekhnologii v obespechenii novogo kachestva vysshego obrazovaniya [Information technology in providing a new quality of higher education] // Informacionnye tekhnologii v obespechenii novogo kachestva vysshego obrazovaniya: sbornik nauchnyh statej = Information technology in providing a new quality of higher education: a collection of scientific articles. Moscow. Issledovatel'skij centr problem kachestva podgotovki specialistov NITU "MISiS" = Research Center for the Problems of Quality of Training of Specialists of NUST "MISiS". 2010. Book. 2. Pp. 89–95. (in Russian)