

ISSN 2413 - 0133
Scientific journal

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

№1(33)/2024

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ И УПРАВЛЕНИИ

Научный журнал
№ 1 (33)



EDITORIAL BOARD

Ablameyko S.V.
 Arshinskiy L.V.
 Berestneva O.G.
 Boukhanovsky A.V.
 Bychkov I.V.
 Woern H.
 Voevodin V.V.
 Wolfengagen V.E.
 Gornov A.Y.
 Gribova V.V.
 Groumpos P.
 Zorina T.G.
 Kazakov A.L.
 Kalimoldaev M.N.
 Karpenko A.P.
 Komendantova N.P.
 Kureichik V.V.
 Lis R.
 Marchenko M.A.
 Massel L.V.
 Moskvichev V.V.
 Ovtcharova J.
 Popov G.T.
 Sidorov D.N.
 Smirnov S.V.
 Stennikov V.A.
 Stylios C.
 Taratukhin V.V.
 Khamisov O.V.
 Hodashinsky I.A.
 Chubarov L.B.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

Абламейко С.В., академик НАН Беларуси, Минск, БГУ
 Аршинский Л.В., д.т.н., Иркутск, ИрГУПС
 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
 Вёрн Х., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Воеводин В.В., чл.-корр. РАН, Москва, НИВЦ МГУ
 Вольфенгаген В.Э., д.т.н., Москва, МИФИ
 Горнов А.Ю., д.т.н., Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Грибова В.В., чл.-корр. РАН, д.т.н., Владивосток, ИАПУ ДВО РАН
 Грумпос П., Греция, University of Patras
 Зорина Т.Г., д.т.н., Республика Беларусь, Институт энергетики НАН Беларуси
 Казаков А.Л., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИДСТУ СО РАН
 Калимолдаев М.Н., академик НАН РК, Республика Казахстан, ИИВТ
 Карпенко А.П., д.ф.-м.н., Москва, МГТУ им. Баумана
 Комендантова Н.П., PhD, Австрия, Лаксенбург, ПАСА
 Курейчик В.В., д.т.н., профессор, Таганрог, ЮФУ
 Лис Р., Польша, Wroclaw University of Science and Technology
 Марченко М.А. д.ф.-м.н., профессор РАН, Новосибирск, ИВМиМГ СО РАН
 Массель Л.В., д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Москвичев В.В., д.т.н., Красноярск, ФИЦ ИВТ
 Овчарова Ж., Германия, Karlsruhe Institute of Technology (KIT)
 Попов Г.Т., Болгария, г. София, Технический университет
 Сидоров Д.Н., д.ф.-м.н., профессор РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Смирнов С.В., д.т.н., Самара, ИПУСС РАН
 Стенников В.А., академик РАН, Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Стилос Х., Греция, Technological Educational Institute of Epirus
 Таратухин В.В., Германия, ERCIS, University of Muenster
 Хамисов О.В., д.ф.-м.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Ходашинский И.А., д.т.н., Томск, ТУСУР
 Чубаров Л.Б., д.ф.-м.н., Новосибирск, ФИЦ ИВТ

EXECUTIVE EDITORIAL

Chief Editor Massel L.V.
 Executive Editor
 Bakhvalova Z.A.
 Editor Gaskova D.A.
 Editor Massel A.G.
 Tech. Editor Popova M.D.
 Designer Pesterev D.V.

ИСПОЛНИТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ ЖУРНАЛА

Главный редактор Массель Л.В. д.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Выпускающий редактор
 Бахвалова З.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Редактор Гаськова Д.А. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Редактор Массель А.Г. к.т.н., Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Техн. редактор Попова М.Д. Иркутск, ИСЭМ СО РАН
 Дизайнер Пестерев Д.В. Иркутск, ИСЭМ СО РАН

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
 Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук
 (ИСЭМ СО РАН)

Адрес учредителя, издателя и редакции
 664033 г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130
 Тел: (3952) 42-47-00 Факс: (3952) 42-67-96

Сайт журнала - <https://www.imt-journal.ru/>

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Номер контракта 202-04/2016.
 Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук (по состоянию на 29.03.2022) по научным специальностям 1.2.2; 2.3.1; 2.3.3; 2.3.5; 2.4.5.
 Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре. Регистрационный номер ПИ № ФС 77 – 73539 от 31.08.2018.

Отпечатано в типографии «Дубль Принт»
 Адрес типографии: 664046, г. Иркутск, ул. Волжская, 14
 *Подписка на журнал доступна со второго полугодия 2021 г.
 Дата выхода 28.03.2024 г. Тираж 50 экз.

© Издательство ИСЭМ СО РАН
 Цена свободная (12+)

Методы и приложения искусственного интеллекта

- Дорогов А.Ю.** Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 2. Методы обучения быстрых нейронных сетей 5
- Шайхисламов Д.И., Воеводин В.В.** Применение методов интеллектуального анализа данных для изучения свойств суперкомпьютерных приложений 20
- Ворожцова Т.Н., Пестерев Д.В.** Система онтологий научного портала знаний для системных исследований энергетики 31
- Асламова В.С., Плеханова О.С.** Онтологическое моделирование предметной области «Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха» 40

Математическое моделирование

- Клер А.М., Забуга Ф.В., Алексеюк В.Э.** Подход к оценке эффективности комплексной модернизации технологических схем действующих теплоэнергетических установок на основе методов математического моделирования и оптимизации 50
- Донской И.Г., Гросс Е.И.** Численный анализ статистических закономерностей теплового зажигания в стохастической среде 66
- Поливанов Д.Е., Семенов А.А., Яркова О.Н.** Математическое моделирование интенсивности водопотребления различными типами водоразборных устройств 78
- Туктарова П.А., Мансурова Ю.Т., Хамидуллина Д.И.** Модель стратегически ориентированного проектирования элемента инновационной инфраструктуры на примере предприятия ООО НПП «Авиатрон» 93

Интеллектуальные и математические технологии в энергетике

- Ворожцова Т.Н., Гальперова Е.В., Гальперов В.И.** Семантический анализ взаимосвязей системы моделей для оценки межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию 103
- Еделев А.В., Карамов Д.Н., Башарина О.Ю.** Анализ уязвимости автономных микросетей 112
- Ежова З.В., Семенов О.И., Миронова Е.Ю., Портоне С.С.** Реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента в области управляемого термоядерного синтеза 122
- Боровинский Д.И.** Анализ развития трубопроводного и морского транспорта природного газа из Арктического региона 133

Информационные и интеллектуальные технологии

- Ерёменко В.С., Наумова В.В., Загумённых А.А.** Разработка виртуальных пространств с интеллектуальным адаптивным интерфейсом для цифровых геологических систем 146
- Авдюшина А.Е., Королёва Ю.А., Маркина Т.А., Бессмертный И.А.** Применение методов географического информационного поиска для анализа новостных данных 154
- Пушкарев А.А., Кузнецова А.С., Кадочников А.А., Ерунова М.Г., Якубайлик О.Э.** Разработка модулей каталогизации и визуализации данных в системе аграрного мониторинга 166

Artificial intelligence methods and applications

- Dorogov A.Yu.** Fast transformations and self-similar deep learning neural networks. Part 2. Methods of training fast neural networks 5
- Shaikhislamov D.I., Voevodin V.V.** Application of data mining methods to study the properties of supercomputing applications 20
- Vorozhtsova T.N., Pesterev D.V.** Ontologies system of a scientific knowledge portal for systemic energy research 31
- Aslamova V.S., Plekhanova O.S.** Ontological modeling of the subject area “Anthropogenic air pollution” 40

Math modeling

- Kler A.M., Zabuga F.V., Alekseiuk V.E.** An approach to assessing the effectiveness of complex modernization of technological schemes of existing thermal power plants based on mathematical modeling and optimization methods 50
- Donskoy I.G., Gross E.I.** Numerical analysis of thermal ignition statistics in a stochastic reacting medium 66
- Polivanov D.E., Semenov A.A., Yarkova O.N.** Mathematical modeling of the intensity of water consumption by various types of water collecting devices 78
- Tuktarova P.A., Mansurova Yu.T., Khamidullina D.I.** Model of strategically oriented design of an element of innovative infrastructure using the example of the enterprise Aviatron 93

Intellectual and mathematical technologies in the energy sector

- Vorozhtsova T.N., Galperova E.V., Galperov V.I.** Semantic analysis of interrelationships within a system of models for evaluating the price elasticity of demand for electricity 103
- Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu.** Vulnerability analysis of autonomous microgrids 112
- Ezhova Z.V., Semenov O.I., Mironova E.Yu., Portone S.S.** Business process reengineering in conducting a fusion experiment 122
- Borovinskii D.I.** Analysis of the development of pipeline and sea transport of natural gas from the Arctic region 133

Information and intellectual technologies

- Eremenko V.S., Naumova V.V., Zagumennov A.A.** Development of virtual spaces with intelligent adaptive interface for digital geological systems 146
- Avdiushina A.E., Koroleva Yu.A., Markina T.A., Bessmertny I.A.** Application of geographic information retrieval methods to analyze new's data 154
- Pushkarev A.A., Kuznetsova A.S., Kadochnikov A.A., Erunova M.G., Yakubailik O.E.** Development of cataloging and data visualization modules for the agrarian monitoring system 166

Методы и приложения искусственного интеллекта

УДК 004.032.26

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001

Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 2. Методы обучения быстрых нейронных сетей

Дорогов Александр Юрьевич

ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии» («Интелтех»),
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет,
Россия, Санкт-Петербург, vaksa2006@yandex.ru

Аннотация. В работе отмечено, что быстрые нейронные сети (БНС) автомодельны алгоритму быстрого преобразования Фурье (БПФ). Представлен метод построения матричной формы алгоритма быстрого преобразования. Доказана факторизуемость элементов матрицы БНС по элементам нейронных ядер. Предложен метод мультипликативной факторизации произвольных одномерных образов. Показано, что благодаря своей структуре быстрые нейронные сети обладают особыми алгоритмами обучения, которые принципиально отличаются от классического ErrorBackPropagation отсутствием механизма обратного распространения ошибки. Рассмотренные алгоритмы обучения БНС основаны на предложенных в работе методах мультипликативной факторизации образов и быстрых преобразований. Показаны примеры настройки сети к ортогональному базису Адамара, базису Фурье, а также БНС-реализации квазифракталов Кантора и Серпинского. Описан метод настройки быстрых преобразований на эталонную функцию, основанный на методе фрактальной фильтрации сигналов. Предложен метод настройки ортогональных приспособленных преобразований. Приведены примеры. Данная работа является второй частью обобщающей статьи «Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения». В первой части рассмотрены стратифицированные модели самоподобных нейронных сетей.

Ключевые слова: быстрые преобразования, быстрые нейронные сети, топологические матрицы, ортогональность, приспособленные преобразования

Цитирование: Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 2. Методы обучения быстрых нейронных сетей / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 5-19. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001.

Введение. Традиционно для обработки сигналов и изображений используются ортогональные преобразования, обладающие быстрыми алгоритмами выполнения (Фурье, Уолша-Адамара, Хаара и др. [1,2]). Как было отмечено в Части 1 настоящей статьи [3], быстрые алгоритмы относятся к классу регулярных самоподобных сетей и могут быть представлены четырёхуровневой стратифицированной моделью. Цель обработки обычно заключается в фильтрации или сжатии образов. В обоих случаях необходимы некоторые априорные знания, которые касаются либо вида образа, либо помехи. В зависимости от этой информации выбирается тип используемого преобразования. Для задач классификации априорная информация задаётся в виде матриц рассеивания точек классов, в этом случае оптимальным является ортогональное преобразование Карунена-Лоэва [4], образованное собственными векторами матриц рассеивания. К сожалению, это преобразование не имеет быстрого алгоритма, и поэтому не используется при больших размерностях данных.

Принцип оптимальности можно распространить и на быстрые перестраиваемые преобразования, поставив перед собой цель – настроить значения коэффициентов базовых операций таким образом, чтобы учесть априорную информацию и сохранить при этом условие ортогональности. Быстрые преобразования имеют меньшее число степеней свободы, чем оптимальное преобразование Карунена-Лоэва, поэтому возможности обучения будут ограничены. Тем

не менее, их достаточно для того, чтобы настроиться, по крайней мере, на одну главную компоненту преобразования Карунена-Лоэва, и уже это позволяет решать целый класс задач, связанных с эффективным сжатием, адаптивной фильтрацией и распознаванием образов. Условие ортогональности не является определяющим, во многих случаях задача классификации образов решается обученными нейронными сетями. БНС покрывают оба случая: с одной стороны, они позволяют реализовывать алгоритмы быстрых спектральных преобразований, а с другой, нейронные сети, обученные к эталонным образам.

В Части 1 статьи была представлена стратифицированная модель модульных самоподобных нейронных сетей, где модулями являются нейронные ядра. На параметрическом уровне нейронные ядра можно задать линейными матрицами небольшой размерности. Переход от одного преобразования к другому происходит за счёт изменения параметров нейронных ядер. В этом случае модульная самоподобная нейронная сеть является представлением линейного перестраиваемого преобразования, обладающего быстрым алгоритмом. Исторически процедура обучения перестраиваемого преобразования называется настройкой на заданную систему функций. В статье будет показано, что предложенный метод настройки покрывает известные виды алгоритмов быстрых спектральных преобразований и может быть также использован для порождения фрактальных последовательностей. Метод основан на теореме о мультипликативной факторизации элементов матрицы быстрых преобразований, и матричной факторизации с которой мы и начнём.

1. Матричная форма быстрого алгоритма. В графе быстрого алгоритма модулями являются базовые операции (нейронные ядра), представимые в виде матриц небольшой размерности. Для алгоритма быстрого преобразования в базовой операции z^m слоя m выполняется линейная обработка компонентов входного вектора слоя:

$$y_{z^m}^m(v_m) = \sum_{u_m} x_{z^m}^m(u_m) w_{z^m}^m(u_m, v_m), \quad (1)$$

где $x_{z^m}^m$ и $y_{z^m}^m$ – входной и выходной векторы базовой операции; $w_{z^m}^m$ – матрица весов базовой операции. Для построения алгоритма преобразования необходимо перейти от локальных переменных ядра к глобальным переменным слоя. Этот переход реализуется на основе топологической модели. Параметрическое описание базовых операций вместе с топологической моделью образует параметрическую модель быстрого преобразования. Выберем для определённости топологию Кули-Тьюки «с прореживанием по времени». Топологическая модель этого типа имеет вид (см. Часть 1):

$$\begin{aligned} U^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} u_m v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle, \\ V^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} v_m v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle, \\ z^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

Для конкретной сети топологическая модель может быть представлена в виде графа, где к вертикальным контактным площадкам подсоединены нейронные ядра. На рис. 1 показан пример графа топологической реализации для сети с характеристиками $P = [p_0 p_1 p_2] = [3, 2, 2]$ и $G = [g_0 g_1 g_2] = [2, 2, 2]$, здесь числа p_m определяют размерность рецепторных полей нейронного ядра в слое с номером m , а числа g_m – размерности аксоновых полей.

В описаниях алгоритмов быстрых спектральных преобразований вместо графа алгоритма часто используется матричная форма, когда алгоритм представляется в виде произведения слабозаполненных матриц, где каждая матрица соответствует одному слою преобразования:

$$H = H_0 H_1 \cdots H_{n-1}.$$

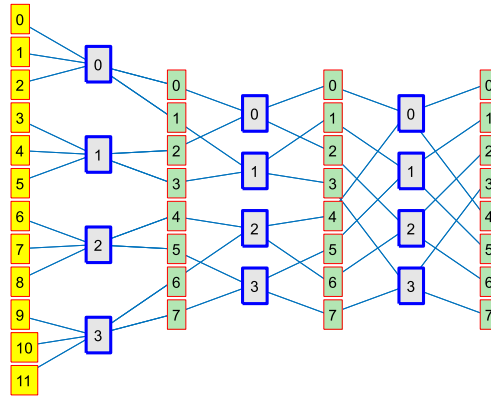


Рис. 1. Граф топологической модели с выделенными базовыми операциями

Такую форму называют *факторизованным представлением* быстрого алгоритма. Структура и параметры слабозаполненных матриц при этом определяются соответствующей теоремой факторизации спектрального преобразования. Таких теорем придумано великое множество, БПФ с топологиями Кули-Тьюки являются типичным примером. Для каждого нового алгоритма быстрого преобразования до недавнего времени доказывали собственную теорему факторизации [1, 2, 5] (другие ссылки приведены в Части 1 статьи). Покажем, что структура слабозаполненных матриц непосредственно следует из топологической модели, и поэтому многообразие топологических моделей покрывает все возможные реализации быстрых алгоритмов, что исключает необходимость какого-либо доказательства новых теорем факторизации.

Для матричного представления алгоритма введём топологические матрицы T_m , состоящие из нулей и единиц, обозначив их элементы $T_m(U^m, V^m)$, где U^m – номер строки матрицы, а V^m – номер столбца. Топологическая матрица по структуре подобна слабо заполненной матрице H_m и отличается от неё только тем, что в позициях ненулевых элементов размещаются единицы. Для каждой топологической матрицы можно задать свои правила нумерации строк и столбцов, для регулярных преобразований удобно использовать поразрядные представления вида:

$$U^m = \langle U_{n-1}^m U_{n-2}^m \dots U_0^m \rangle, \quad V^m = \langle V_{n-1}^m V_{n-2}^m \dots V_0^m \rangle,$$

которые назовём *внешними* в отличие от *внутренних*, заданных топологической моделью (2).

Соответствие между внешними разрядными переменными и внутренними можно задать таблицей, например, для рассматриваемой топологической модели таблица будет иметь следующий вид:

Таблица 1. Соответствия между внешними и внутренними разрядными переменными

$U^m =$	u_{n-1}	u_{n-2}	...	u_{m+1}	u_m	v_{m-1}	v_{m-2}	...	v_1	v_0
$U^m =$	U_{n-1}^m	U_{n-2}^m	...	U_{m+1}^m	U_m^m	U_{m-1}^m	U_{m-2}^m	...	U_1^m	U_0^m
$V^m =$	u_{n-1}	u_{n-2}	...	u_{m+1}	v_m	v_{m-1}	v_{m-2}	...	v_1	v_0
$V^m =$	V_{n-1}^m	V_{n-2}^m	...	V_{m+1}^m	V_m^m	V_{m-1}^m	V_{m-2}^m	...	V_1^m	V_0^m

Единицам топологической матрицы T_m слоя m в слабозаполненной матрице соответствуют элементы ядер (базовых операций) с номерами:

$$z^m = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle.$$

Это означает, что для каждого единичного элемента топологической матрицы $T_m(U^m, V^m)$ пара разрядных переменных U_l^m, V_l^m из внешних представлений должна соответствовать одной из разрядных переменных внутреннего представления ядра z^m . Следуя данному правилу и используя таблицу соответствий, можно записать аналитическое представление структуры топологической матрицы в виде:

$$T_m(U^m, V^m) = \delta(U_{n-1}^m, V_{n-1}^m) \delta(U_{n-2}^m, V_{n-2}^m) \cdots \delta(U_{m+1}^m, V_{m+1}^m) \delta(U_{m-1}^m, V_{m-1}^m) \cdots \delta(U_0^m, V_0^m),$$

где $\delta(\bullet)$ – дельта функция Кронекера, равная единице, если значения аргументов совпадают, и нулю в противном случае. Добавив к последнему выражению элементы ядер слоя, получим полное аналитическое представление слабозаполненной матрицы:

$$H_m(U^m, V^m) = w_z^m(U^m, V^m) \delta(U_{n-1}^m, V_{n-1}^m) \delta(U_{n-2}^m, V_{n-2}^m) \cdots \delta(U_{m+1}^m, V_{m+1}^m) \delta(U_{m-1}^m, V_{m-1}^m) \cdots \delta(U_0^m, V_0^m).$$

Номер ядра также может быть выражен в разрядных переменных внешнего представления:

$$z^m = \langle U_{n-1}^m U_{n-2}^m \cdots U_{m+1}^m V_{m-1}^m V_{m-2}^m \cdots V_1^m V_0^m \rangle.$$

Для графа, показанного на рис. 1, топологические матрицы и номера ядер будут определяться следующим выражениями:

$$\begin{aligned} T_0(U^0, V^0) &= \delta(U_2^0, V_2^0) \delta(U_1^0, V_1^0), & z^0 &= \langle U_2^0 U_1^0 \rangle, \\ T_1(U^1, V^1) &= \delta(U_2^1, V_2^1) \delta(U_0^1, V_0^1), & z^1 &= \langle U_2^1 V_0^1 \rangle, \\ T_2(U^2, V^2) &= \delta(U_1^2, V_1^2) \delta(U_0^2, V_0^2) & z^2 &= \langle V_1^2 V_0^2 \rangle. \end{aligned}$$

На рис. 2 показано матричное представление топологии для данной сети. В последней матрице вместо единичных элементов для наглядности показаны номера ядер.

V_2^0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	V_2^1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	V_2^2	0	0	0	0	1	1	1	1	1
V_1^0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	V_1^1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	V_1^2	0	0	1	1	0	0	1	1	1
V_0^0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	V_0^1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	V_0^2	0	1	0	1	0	1	0	1	1
$U_2^0 U_1^0 U_0^0$										$U_2^1 U_1^1 U_0^1$										$U_2^2 U_1^2 U_0^2$									
000	1	1								000	1		1							000	0				0				
001	1	1								001		1		1						001		1						0	
002	1	1								010	1		1							010			2					2	
010			1	1						011	1		1							011				3					3
011			1	1						100				1		1				100	0				0				
012			1	1						101					1		1			101		1				1			
100					1	1				110						1		1		110			2					2	
101					1	1				111							1		1	111				3					3
110						1	1																						
111							1	1																					
112								1	1																				

Рис. 2. Матричное представление топологии самоподобной сети

2. Факторизация элементов матриц быстрых преобразований. Обозначим через $H = H_0 H_1 \cdots H_{n-1}$ матрицу быстрого преобразования, полученную, как результат произведения слабозаполненных матриц нейронных слоёв. Обозначим через $h(U, V)$ элементы этой матрицы, где $U = U^0$ и $V = V^{n-1}$ – номера рецепторов и аксонов терминальных слоёв. Преобразование H переводит входной вектор $x = x^0$ в выходной вектор $y = y^{n-1}$. Для линейного преобразования элементы матрицы H можно выразить как частные производные:

$$h(U, V) = \frac{\partial y^{n-1}(V^{n-1})}{\partial x^0(U^0)}. \quad (3)$$

Дифференцируя (3) по правилу дифференцирования сложной функции получим:

$$h(U, V) = \frac{\partial y^{n-1}(V^{n-1})}{\partial x^0(U^0)} = \frac{\partial y^{n-1}(V^{n-1})}{\partial x^{n-1}(U^{n-1})} \frac{\partial x^{n-1}(U^{n-1})}{\partial y^{n-2}(V^{n-2})} \cdots \frac{\partial x^1(U^1)}{\partial y^0(V^0)} \frac{\partial y^0(V^0)}{\partial x^0(U^0)}. \quad (4)$$

Поскольку для межслойного перехода выполнено $x^{m+1}(U^{m+1}) = y^m(V^m)$, то для всех m

$$\frac{\partial x^{m+1}(U^{m+1})}{\partial y^m(V^m)} = 1,$$

а из выражения (1) следует:

$$\frac{\partial y^m(V^m)}{\partial x^m(U^m)} = w_{z^m}^m(u_m, v_m).$$

Подставляя значения частных производных в (4), получим:

$$h(U, V) = w_{z^{n-1}}^{n-1}(u_{n-1}, v_{n-1}) w_{z^{n-2}}^{n-2}(u_{n-2}, v_{n-2}) \cdots w_{z^0}^0(u_0, v_0). \quad (5)$$

Таким образом, элементы матрицы быстрого преобразования представимы в виде произведения элементов ядер. Следует отметить, что ещё в 1958 г. в работе Гуда [5] впервые было показано, что элементы матрицы быстрого преобразования Фурье можно представить в виде произведения элементов матриц базовых операций, которые также являются преобразованиями Фурье, но малых размерностей.

3. Настройка на базис Адамара. Функции базиса Адамара задаются на интервале длиной $N = 2^n$ следующим выражением:

$$\text{had}(U, V) = \prod_{m=0}^{n-1} (-1)^{u_m v_m},$$

где $U = \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_0 \rangle$ и $V = \langle v_{n-1} v_{n-2} \cdots v_0 \rangle$. Все разрядные числа принимают значения $\{0, 1\}$. Сравнивая (5) с определением функций Адамара, непосредственно получим правило настройки ядер:

$$w_{z^m}^m(u_m, v_m) = (-1)^{u_m v_m}.$$

Этому выражению соответствует матрица ядра $W = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$, очевидно, что все ядра преобразования одинаковы. Выберем для определённости топологию Кули-Тьюки «с прореживанием по времени»:

$$\begin{aligned} U^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} u_m v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle, \\ V^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} v_m v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle, \\ z^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \cdots u_{m+1} v_{m-1} v_{m-2} \cdots v_1 v_0 \rangle. \end{aligned}$$

На рис. 3 показано матричное представление быстрого алгоритма преобразования Адамара для размерности $N = 2^3$.

	V_2^m	0	0	0	0	1	1	1	1		0	0	0	0	1	1	1	1		0	0	0	0	1	1	1	1											
	V_1^m	0	0	1	1	0	0	1	1		0	0	1	1	0	0	1	1		0	0	1	1	0	0	1	1											
	V_0^m	0	1	0	1	0	1	0	1		0	1	0	1	0	1	0	1		0	1	0	1	0	1	0	1											
U_2^m	U_1^m	U_0^m																																				
0	0	0	1	1								1	1								1																	
0	0	1	1	-1								1	1	1								1																
0	1	0			1	1								1	-1								1															
0	1	1			1	-1								1	-1								1	1	1													
1	0	0					1	1										1	1								1											
1	0	1					1	-1										1	1								1											
1	1	0							1	1										1	-1								1	1	1							
1	1	1							1	-1										1	-1								1	1	1							

Рис. 3. Матричное представление быстрого преобразования Адамара

Перемножив матрицы факторизованного представления, получим следующую матрицу базисных функций:

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{pmatrix}$$

4. **Аппроксимация фракталов.** Рассмотрим быстрое преобразование размерности $N = 3^2$ и выберем все ядра преобразования в виде:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Факторизованное представление алгоритма в той же топологии будет иметь вид (рис. 4):

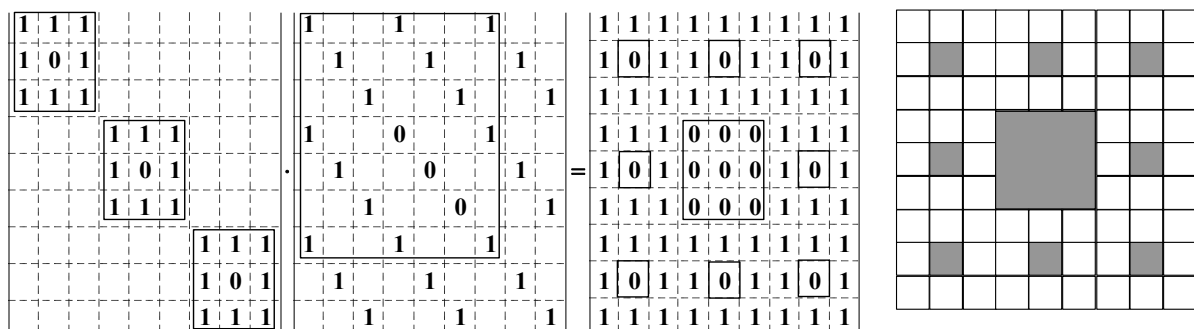


Рис. 4. Аппроксимация фрактала Кантора

Нетрудно видеть, что результирующая матрица представляет собой итерацию фрактала Кантора (см. рис. 4). Рассмотрим быстрое преобразование размерности $N = 2^3$ и выберем все ядра преобразования в виде матрицы:

$$W = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Факторизованное представление быстрого алгоритма показано на рис. 5. В этом варианте параметрической настройки результирующая матрица представляет собой итерацию фрактала Серпинского.

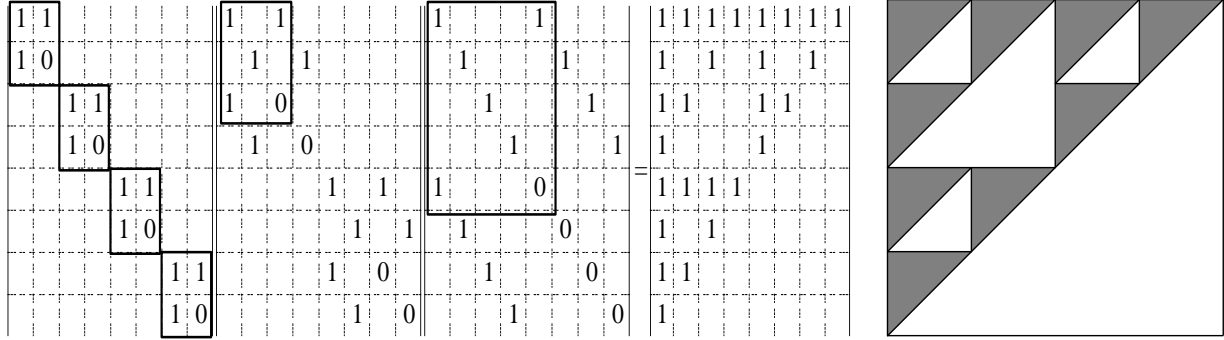


Рис. 5 Аппроксимация фрактала Серпинского

Нарращивание размерности преобразования позволяет получить другие итерации фракталов. Эти примеры подтверждают фрактальные свойства быстрых алгоритмов.

5. Настройка на базис Фурье. По определению, функции базиса Фурье задаются выражением:

$$F_N(U, V) = \frac{1}{\sqrt{N}} \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} UV\right), \quad (6)$$

где U – временной отсчёт; V – частота (или номер) базисной функции; $j = \sqrt{-1}$; $N = p_0 p_1 \dots p_{n-1}$ – размерность преобразования (для быстрых преобразований размерность всегда является составным числом). Выполним настройку быстрого алгоритма для базиса Фурье с естественным упорядочением функций по частотам следования. Для построения алгоритма воспользуемся топологической схемой:

$$\begin{aligned} U^m &= \langle u_m u_{m+1} \dots u_{n-2} u_{n-1} v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle, \\ V^m &= \langle u_{m+1} u_{m+2} \dots u_{n-1} v_m v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle, \\ z^m &= \langle u_{m+1} \dots u_{n-2} u_{n-1} v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle. \end{aligned}$$

Откуда для входного слоя следует:

$$U = U^0 = \langle u_0 u_1 \dots u_{n-2} u_{n-1} \rangle = \sum_{m=0}^{n-1} u_m p_{m+1} p_{m+2} \dots p_{n-1}.$$

Подставив последнее выражение в (6), получим:

$$F(U, V) = \prod_{m=0}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{p_m}} \exp\left(-j \frac{2\pi V}{p_{n-1} p_{n-2} \dots p_m} u_m\right). \quad (7)$$

Для выходного слоя из топологической схемы следует:

$$V = V^{n-1} = \langle v_{n-1} v_{n-2} v_{n-3} \dots v_1 v_0 \rangle.$$

Для любого m последнее выражение можно записать в виде:

$$V = \langle v_{n-1} v_{n-2} v_{n-3} \dots v_1 v_0 \rangle = \langle v_{n-1} v_{n-2} \dots v_{m+1} \rangle p_m p_{m-1} \dots p_0 + v_m p_{m-1} p_{m-2} \dots p_0 + \langle v_{m-1} v_{m-2} \dots v_0 \rangle.$$

Подставляя в (7) и учитывая периодичность комплексной экспоненты по периоду 2π после преобразований, получим:

$$F(U, V) = \prod_{m=0}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{p_m}} \exp\left(-j 2\pi \left[\frac{u_m v_m}{p_m} + u_m \frac{\langle v_{m-1} v_{m-2} \dots v_0 \rangle}{p_0 p_1 \dots p_m} \right]\right).$$

Каждый сомножитель в этом произведении соответствует элементу базовой операции. Таким образом, базовые операции алгоритма БПФ определяются выражением:

$$w_{z^m}^m(u_m, v_m) = \frac{1}{\sqrt{p_m}} \exp\left(-j \frac{2\pi}{p_m} u_m v_m\right) \exp\left(-j 2\pi u_m \frac{\langle v_{m-1} v_{m-2} \dots v_0 \rangle}{p_0 p_1 \dots p_m}\right).$$

Кроме разрядных переменных $v_{m-1} v_{m-2} \dots v_0$, выражение для номера ядра z^m содержит переменные $u_{m+1} \dots u_{n-2} u_{n-1}$, это означает, что базовые операции в пределах слоя будут повторяться.

На рис. 6 показано факторизованное представление алгоритма БПФ для размерности $N = 8$.

v_0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
v_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
v_2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
u_0	u_1	u_2																						
0	0	0	1	1					1		1						1			1				
0	0	1			1	1				1		1						1			1			
0	1	0				1	1					1		1					1			1		
0	1	1					1	1					1		1					1			1	
1	0	0	1	-1					1		-1						1			-1				
1	0	1			1	-1				ω^2		$-\omega^2$						ω			$-\omega$			
1	1	0				1	-1						1		-1				ω^2			$-\omega^2$		
1	1	1					1	-1						ω^2	$-\omega^2$					ω^3			$-\omega^3$	

Рис. 6 Факторизованное представление алгоритма БПФ

На рисунке множители $1/\sqrt{2}$ с целью упрощения не показаны, использовано также обозначение $\omega = \exp\left(-j \frac{2\pi}{N}\right)$. На рис. 7 приведены вещественные и мнимые компоненты функций базиса Фурье, полученные перемножением матриц факторизованного представления.

Следует подчеркнуть, что для данной топологической схемы, в отличие от классической схемы Кули-Тьюки, выходные спектральные коэффициенты упорядочены по возрастанию частот.

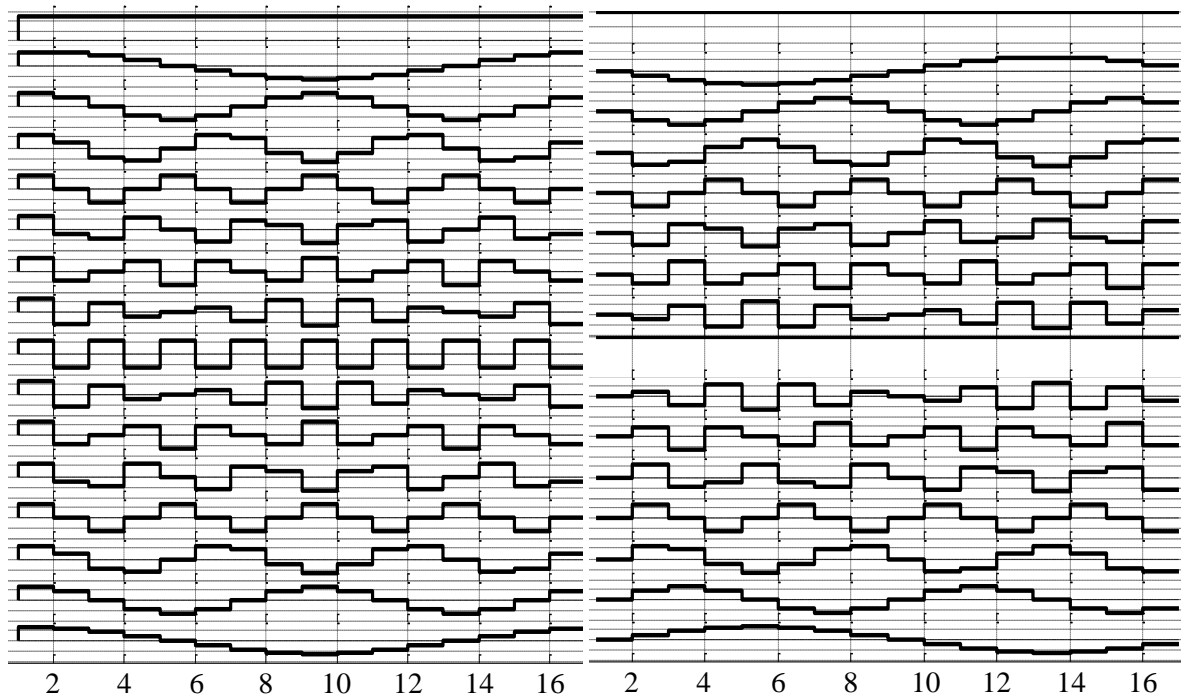


Рис. 7. Функции базиса Фурье с естественным упорядочением по частотам следования

6. Мультипликативное представление сигнальных функций. Будем полагать, что сигнал задан функцией $f(u)$ на дискретном интервале длиной $N = p_0 p_1 \dots p_{n-1}$, где p_m – произвольные целые числа. Представим аргумент функции в позиционной многоосновной системе счисления с основаниями p_0, p_1, \dots, p_{n-1} . Формула перехода, как известно, имеет вид:

$$u = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_0 \rangle = u_{n-1} p_{n-2} p_{n-3} \dots p_0 + u_{n-2} p_{n-3} p_{n-4} \dots p_0 + \dots + u_1 p_0 + u_0,$$

где $u_i \in [0, 1, \dots, p_i - 1]$ – разрядные переменные. В результате данного преобразования сигнал представляется, как многомерная функция $f \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_0 \rangle$. Каждый аргумент функции определяет некоторый масштабный срез сигнала. Зафиксируем все аргументы функции, кроме u_m . Варьируя свободный аргумент u_m , получим выборку S_m (с числом элементов p_m). Фрактальным фильтром [6] частотной локализации m называется произвольный функционал $F(S_m)$, определённый на выборке S_m .

Операцию фрактальной фильтрации можно записать в виде:

$$f_{out} \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} u_{m-1} \dots u_0 \rangle = F_{u_m} (f_{inp} \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_0 \rangle).$$

В простейшем варианте фрактальный фильтр может, например, выполнять суммирование значений функции по аргументу u_m . Если $m = 0$, то такой фильтр генерализует сигнал, сглаживая мелкие детали. Фрактальная фильтрация по аргументу u_m приводит к сокращению интервала определения сигнала в p_m раз. Рассмотрим цепочку фрактальных фильтров, показанную на рис. 8.

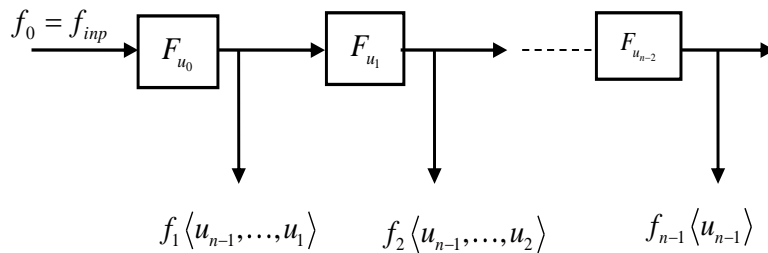


Рис. 8. Цепочка фрактальных фильтров

Выходные сигналы для фильтров цепочки определяются рекуррентным соотношением:

$$f_m \langle u_{n-1} \dots u_m \rangle = F_{u_{m-1}} (f_{m-1} \langle u_{n-1} \dots u_m u_{m-1} \rangle).$$

Введём функции-сомножители:

$$\phi_{i^m} (u_m) = \frac{f_m \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_m \rangle}{f_{m+1} \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} \rangle}, \quad m = 0, 1, \dots, n-2, \quad (8)$$

где $i^m = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} \rangle$. Используя данное определение функций, можно записать

$$f_m \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_m \rangle = \phi_{i^m} (u_m) f_{m+1} \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} \rangle, \quad m = 0, 1, \dots, n-2.$$

Из рекуррентных соотношений (8) непосредственно следует:

$$f(u) = f_0 \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_0 \rangle = \phi_{i^0} (u_0) \phi_{i^1} (u_1) \dots \phi_{i^{n-2}} (u_{n-2}) \phi_{i^{n-1}} (u_{n-1}). \quad (9)$$

Полученное выражение позволяет утверждать, что любая функция, заданная на дискретном интервале, может быть представлена в мультипликативной форме в виде конечного произведения функций-сомножителей, равного числу множителей в разложении целочисленной длины интервала в произведение целых чисел.

Замечание 1. Как будет показано в Части 3 настоящей статьи, для элементов памяти декомпозицию функций необходимо выполнить по разрядным переменным v_i , начиная со старшего разряда v_{n-1} . В этом случае получим разложение:

$$f(v) = f_0 \langle v_{n-1} v_{n-2} \dots v_0 \rangle = \varphi_{i^{n-1}}(v_{n-1}) \varphi_{i^{n-2}}(v_{n-2}) \dots \varphi_{i^1}(v_1) \varphi_{i^0}(v_0),$$

где $i^m = \langle v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle$, $\varphi_{i^{n-m}}(v_{n-m}) = \frac{f_m \langle v_{n-m} v_{n-m-1} \dots v_0 \rangle}{f_{m+1} \langle v_{n-m-1} v_{n-m-2} \dots v_0 \rangle}$, $m = 1, 2, \dots, n$,

Замечание 2. При вычислении функций-сомножителей $\varphi(\)$ в выражении (8), возможно появление нулевого значения в знаменателе, проблема решается за счёт возможности неоднозначного представления произведения сомножителей. Детали процедуры цензурирования нулей рассмотрены в работе [7].

7. Алгоритм обучения быстрых приспособленных преобразований. Перестраиваемые спектральные преобразования, настраиваемые к одиночной функции, получили названия приспособленных [2]. Это название мы будем в дальнейшем использовать к любым перестраиваемым преобразованиям, не обязательно спектральным. Выберем для определённости нейронную сеть, заданную топологией Кули-Тьюки «с прореживанием по времени». Топологическая схема данного типа описывается следующей моделью:

$$\begin{aligned} U^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} u_m v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle, \\ V^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} v_m v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle, \\ z^m &= \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} v_{m-1} v_{m-2} \dots v_1 v_0 \rangle. \end{aligned} \tag{10}$$

Обучающим множеством являются одна или несколько функций, представленных в мультипликативной форме, которые назовём опорными функциями. Цель обучения состоит в том, чтобы настроить нейронные ядра таким образом, чтобы результирующая матрица преобразования содержала опорные функции в виде столбцов. Номер столбца, содержащего опорную функцию, назовём точкой приспособления. Точки приспособления относятся к координатному пространству V^{n-1} . Сравнивая выражение (5) с (9), непосредственно получим правило обучения нейронных ядер:

$$w_{z^m}^m(u_m, v_m) = \varphi_{i^m}^k(u_m).$$

Здесь k – номер опорной функции. Зададим точку приспособления числом, представленным в поразрядной форме:

$$x = \langle x_{n-1} x_{n-2} \dots x_0 \rangle,$$

Тогда, в соответствии с (10), номер настраиваемых ядер по слоям будет определяться выражением:

$$z^m = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_{m+1} x_{m-1} x_{m-2} \dots x_1 x_0 \rangle.$$

Для $m = 0$ имеем $z^0 = \langle u_{n-1} u_{n-2} \dots u_1 \rangle$ – это означает, что независимо от выбора точки приспособления, все ядра слоя будут настраиваться, причём номер ядра определяется из условия: $z^0 = i^0$. Настройка элементов ядер этого слоя выполняется по правилу:

$$w_{z^0}^0(u_0, v_0) = \varphi_{i^0}^k(u_0), \tag{11}$$

Очевидно, должно быть задано взаимно-однозначное соответствие $k \leftrightarrow v_0$ между номером опорной функции и разрядной переменной v_0 . Эта разрядная переменная принимает значения $0, 1, \dots, g_0 - 1$. Отсюда следует вывод, что число точек приспособления не может быть больше, чем g_0 , и для данной топологии точки приспособления размещаются в соседних столбцах, т.е. принимают значения:

$$x = \langle x_{n-1}x_{n-2} \cdots x_1 0 \rangle, \langle x_{n-1}x_{n-2} \cdots x_1 1 \rangle, \dots, \langle x_{n-1}x_{n-2} \cdots x_1 g_0 - 1 \rangle.$$

Далее, для $m = n - 1$ имеем $z^{n-1} = \langle x_{n-2}x_{m-3} \cdots x_1 v_0 \rangle$, $i^{n-1} = \langle \rangle$, т.е. в последнем слое настраиваться будут g_0 ядер, да и то, только по одному столбцу. Для внутренних слоёв настраиваемые ядра также будут заполнены частично. На рис. 9 показано факторизованное представление быстрого преобразования в топологии Кули–Тьюки, приспособленного к двум функциям, размещённым в двух первых столбцах матрицы преобразования.

	v_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
	v_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
	v_0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
u_2	u_1	u_0																							
0	0	0	1	1						1	*						1			*					
0	0	1	1	1							1	*						1			*				
0	1	0			1	1				1	*							*					*		
0	1	1			1	1					1	*							*				*		
1	0	0				1	1						1	*			1			*					
1	0	1				1	1							1	*			1			*				
1	1	0					1	1						1	*			*				*			
1	1	1					1	1							1	*			*				*		

Рис. 9. Свободные параметры быстрого преобразования, приспособленного к двум функциям. Символом «*» выделены элементы ядер, которые выбираются произвольно

Свободных параметров недостаточно, чтобы приспособиться ещё к одной функции, их можно доопределить различными способами [6]. Кардинальным решением является изменение структурных параметров сети так, чтобы оставить только значимые настраиваемые элементы, в этом случае мы приходим к пирамидальным нейронным сетям глубокого обучения. Пирамидальные нейронные сети будут рассмотрены в третьей части статьи.

8. Алгоритм обучения спектральных приспособленных преобразований. Для спектральных преобразований удобно использовать определение условия приспособленности через ортогональность, которое можно сформулировать следующим образом. Ортогональное преобразование, заданное матрицей $h(u, v)$, приспособлено к функции $f(u)$ по столбцу x , если выполнены условия:

$$\begin{cases} \sum_u h(u, v) f(u) = 1 & \text{при } v = x, \\ \sum_u h(u, v) f(u) = 0 & \text{при } v \neq x. \end{cases} \quad (12)$$

Предполагается, что опорная функция нормирована условием: $\sum_u f^2(u) = 1$. Подставив в левую часть (12) выражение (5), после преобразований получим:

$$\sum_u h(u, v) f(u) = \sum_{u_0} w_{z_0}(u_0, v_0) \varphi_{i_0}(u_0) \sum_{u_1} w_{z_1}(u_1, v_1) \varphi_{i_1}(u_1) \times \dots \times \sum_{u_{n-1}} w_{z_{n-1}}(u_{n-1}, v_{n-1}) \varphi_{i_{n-1}}(u_{n-1}).$$

Из данной формулы очевидно, что приспособленность спектрального преобразования обеспечивается, когда настраиваемые ядра любого слоя m приспособлены к соответствующим компонентам мультипликативного разложения опорной функции:

$$\begin{cases} \sum_{u_m} w_{z^m}(u_m, v_m) \varphi_{i^m}(u_m) = 1 & \text{при } v_m = x_m, \\ \sum_{u_m} w_{z^m}(u_m, v_m) \varphi_{i^m}(u_m) = 0 & \text{при } v_m \neq x_m. \end{cases}$$

Соответствие между индексами z^m и i^m определяется выбором точки приспособления. Таким образом, задача настройки быстрого приспособленного спектрального преобразования сводится к построению приспособленных ортогональных ядер. Для ортогональных ядер одна из функций определяется по правилу (11), а остальные находятся через процедуру ортогонализации Грамма-Шмидта [7].

Мультипликативное разложение опорной функции для спектрального преобразования отличается тем, что фрактальные множители должны быть нормированы к единице. Ортогональное приспособленное преобразование не полностью использует степени свободы, которыми оно располагает. Если функция приспособления совпадает с нулевым столбцом результирующей матрицы, то будут настроены только ядра с номерами $z^m = \langle u_{n-1}u_{n-2} \dots u_{m+1}0_{m-1}0_{m-2} \dots 0_0 \rangle$ (для топологии Кули-Тьюки с прореживанием по времени). На рис. 10 приведено факторизованное представление ортогонального преобразования, приспособленного к одной функции, размещённой в нулевом столбце. Символом «*» отмечены элементы незаполненных ядер. Если точка приспособления задана кортежем:

$$x = \langle x_{n-1}x_{n-2} \dots x_0 \rangle,$$

тогда номер настраиваемых ядер по слоям будет определяться выражением:

$$z^m = \langle u_{n-1}u_{n-2} \dots u_{m+1}x_{m-1}x_{m-2} \dots x_1x_0 \rangle.$$

В каждом ортогональном ядре только один столбец совпадает с фрактальным множителем опорной функции, остальные столбцы выбираются ортогональными к нему, следуя процедуре Грамма-Шмидта, поэтому они не могут быть произвольными. Это означает, что ортогональное приспособленное преобразование может быть настроено только на одну опорную функцию (не считая постоянной составляющей).

v_2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1
v_1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
v_0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
u_2	u_1	u_0																						
0	0	0	1	1					1	1							1				1			
0	0	1	1	1					*	*							*			*				
0	1	0		1	1				1	1								*				*		
0	1	1		1	1				*	*									*				*	
1	0	0			1	1						1	1			1				1				
1	0	1			1	1						*	*			*			*			*		
1	1	0				1	1					1	1				*			*		*		
1	1	1				1	1					*	*					*		*		*	*	

Рис. 10. Свободные параметры быстрого ортогонального преобразования, приспособленного к одной функции

Для того, чтобы преобразование в целом было ортогональным, достаточно заполнить свободные ядра элементами любых ортогональных матриц соответствующих размеров. В практических алгоритмах можно либо заполнить свободные ядра единичными матрицами

вида: $W = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, либо повторить ядра, уже найденные для текущего слоя. В первом случае будут получены вейвлет-подобные ортогональные преобразования с явно выраженными свойствами пространственной локализации, во втором – все столбцы преобразования будут содержать примерно равное число ненулевых элементов.

На рис. 11 приведены базисные функции быстрых ортогональных преобразований, приспособленных к линейно изменяющейся опорной функции.

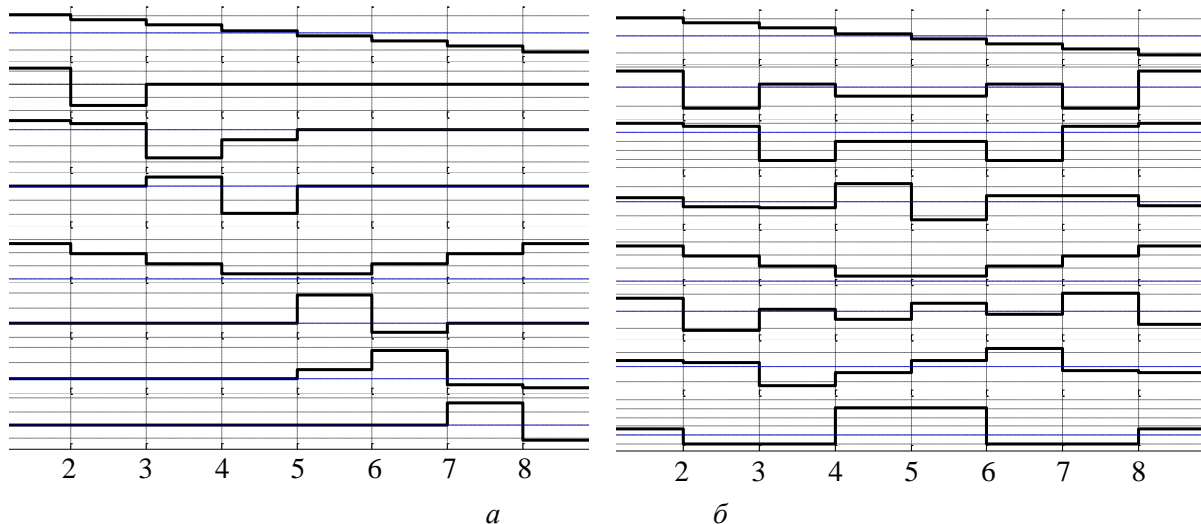


Рис. 11. Базисные функции приспособленных ортогональных преобразований:

а) – с доопределением ядер единичными матрицами;

б) – с приспособлением к фильтрованным образам опорных функций

Заключение. Отличительной особенностью рассмотренного метода обучения БНС является абсолютная устойчивость, поскольку, в отличие от градиентных методов, отсутствует контур параметрической обратной связи по ошибке. Кроме того, алгоритм обучения всегда имеет конечное число шагов, которое кратно числу слоёв быстрого преобразования. Точность обучения не ограничена используемым методом и определяется только разрядной сеткой процессора. Рассмотренный метод обучения не полностью реализует степени свободы перестраиваемого БНС, оставшаяся часть может быть использована для придания преобразованию дополнительных свойств, например, пространственной чувствительности, характерной для вейвлет-преобразований. Алгоритмы обучения не ограничиваются одномерным случаем, в работах [8-11] рассмотрены варианты алгоритмов обучения для двумерных БНС, и подобным образом алгоритмы могут быть построены для многомерных сетей.

Обучаемые быстрые ортогональные преобразования могут быть эффективно использованы для сжатия информации, например, при передаче по каналам связи изображений высокой размерности, с малыми отличиями от эталонного образа. Вместо передачи всего изображения в этом случае достаточно передать всего несколько спектральных коэффициентов приспособленного спектра, несущих отличия от эталонного образа, и восстановить отличия на приёмной стороне, используя быстрый алгоритм.

Список источников

1. Трахтман А.М. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А.М. Трахтман, В.А. Трахтман. – М.: Сов. Радио, 1976. – 208 с.
2. Солодовников А.И. Основы теории и методы спектральной обработки информации / А.И. Солодовников, А.М. Спиваковский. – Л., 1986. – 272 с.
3. Дорогов А.Ю. Быстрые преобразования и самоподобные нейронные сети глубокого обучения. Часть 1. Стратифицированные модели самоподобных нейронных сетей и быстрых преобразований / А.Ю. Дорогов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – №4 (32). – С. 5-20.

4. Айвазян С.А. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
5. Good I.J. The interaction algorithm and practical fourier analysis. Journal of Royal statistical society. Ser.B, 1958, vol. 20, no.2, pp. 361-372.
6. Дорогов А.Ю. Теория и проектирование быстрых перестраиваемых преобразований и слабосвязанных нейронных сетей. / А.Ю. Дорогов. – СПб.: «Политехника», 2014. – 328с.
7. Белман Р. Введение в теорию матриц / Р. Белман. – М.: Наука, 1976. – 352 с.
8. Дорогов А.Ю. Программный комплекс фрактальной фильтрации и адаптивной настройки двумерных быстрых преобразований. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2013614431 / А.Ю. Дорогов // Заявка №2013610130 дата поступления 15 января 2013. Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 07 мая 2013.
9. Дорогов А.Ю. Фрактальный метод настройки быстрых перестраиваемых спектральных преобразований на эталонное изображение / А.Ю. Дорогов // Международная научно-техническая конференция, приуроченная к 50-летию МРТИ–БГУИР (Минск, 18–19 марта 2014 года): материалы конф. В 2 ч. – Ч. 1. – Минск : БГУИР, 2014. – С.284-285. – ISBN 978-985-543-037-8 (ч. 1).
10. Дорогов А.Ю. Фрактальное обучение двумерных ортогональных нейронных сетей. / А.Ю. Дорогов // Материалы международной научно-практической конференции «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании «ИНФОТЕХ-2015» Севастополь 07-11 сентября 2015 г., СевГУ. – С. 59-60.
11. Dorogov A.Yu. Two-Dimensional fast orthogonal neural networks. Advances in neural networks – ISSN 2016, 13th International symposium on neural networks, ISSN 2016, St. Petersburg, Russia, July 6-8, 2016, Proceedings, Lecture notes in computer science. Springer international publishing Switzerland 2016, pp. 204-210.

Дорогов Александр Юрьевич. Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматики и процессов управления» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) «ЛЭТИ», главный научный сотрудник ПАО «Информационные телекоммуникационные технологии». Основные направления исследований автора связаны с интеллектуальным анализом данных, цифровой обработкой сигналов, проектированием быстрых преобразований и нейронных сетей быстрого обучения, разработкой аналитических платформ, моделированием радио-телекоммуникационных систем. AuthorID: 17611, SPIN 8645-5873, ORCID 0000-0002-7596-6761, vaks2006@yandex.ru, г. Санкт-Петербург, ул. Попова, 5.

UDC 004.032.26

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.001

Fast transformations and self-similar deep learning neural networks.

Part 2. Methods of training fast neural networks

Alexander Yu. Dorogov

PJSC “Information Telecommunication Technologies” (“Inteltech”),

St. Petersburg State Electrotechnical University,

Russia, St. Petersburg, vaks2006@yandex.ru

Abstract. It is noted in the paper that fast neural networks (FNN) are self-similar to the fast Fourier transform (FFT) algorithm. A method for constructing a matrix form of a fast transformation algorithm is presented. The factorizability of the elements of the FNN matrix by the elements of neural cores is proved. A method of multiplicative factorization of arbitrary one-dimensional images is proposed. It is shown that due to their structure, fast neural networks have special learning algorithms that are fundamentally different from the classic ErrorBackPropagation by the absence of a mechanism for error back propagation. The considered algorithms for teaching FNN are based on the methods of multiplicative factorization of images and fast transformations proposed in the work. Examples of network tuning to the orthogonal Hadamard basis, Fourier basis, as well as the FNN implementation of the Cantor and Sierpinski quasifractals are shown. A method of tuning fast transformations to a reference function based on the method of fractal filtering of signals is described. A method for tuning orthogonal adapted transformations is proposed. Examples are given. This work is the second part of the generalizing article "Fast transformations and self-similar neural networks of deep learning". In the first part, stratified models of self-similar neural networks are considered.

Keywords: fast transformations, fast neural networks, topological matrices, orthogonality, adapted transformations.

References

1. Trahtman A.M., Trahtman V.A. Osnovy teorii diskretnykh signalov na konechnykh intervalakh [Fundamentals of the theory of discrete signals at finite intervals]. M., "Sov. Radio", 1976, 208 p.
2. Solodovnikov A.I., Spivakovskij A.M. Osnovy teorii i metody spektral'noj obrabotki informacii [Fundamentals of the theory and methods of spectral information processing]. Leningrad, 1986. 272 p.
3. Dorogov A.Yu. Bystrye preobrazovaniya i samopodobnye nejronnye seti glubokogo obuchenija. Chast' 1. Stratifirovannye modeli samopodobnykh nejronnykh setej i bystrykh preobrazovanij [Fast transformations and self-similar deep learning neural networks. Part 1. Stratified models of self-similar neural networks and fast transformations]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4 (32), pp. 5-20.
4. Ajvazjan S. A., Buhshtaber V. M., Enjukov I. S., Meshalkin L. D. Prikladnaja statistika. Klassifikacija i snizhenie razmernosti [Applied statistics. Classification and dimensionality reduction]. M., Finansy i statistika [Finance and Statistics], 1989, 607 p.
5. Good I.J. The interaction algorithm and practical fourier analysis. Journal of Royal statistical society. Ser.B, 1958, vol. 20, no.2, pp. 361-372.
6. Dorogov A.Yu. Teorija i proektirovanie bystrykh perestraivaemykh preobrazovanij i slabosvjazannykh nejronnykh setej [Theory and design of fast tunable transformations and loosely coupled neural networks]. Spb. Publ "Politehnika" [Polytechnic], 2014, 328p.
7. Bellman R. Introduction to matrix analysis. Moscow, Nauka [Science], 1976. – 352 c.
8. Dorogov A.Yu. Programmnyj kompleks fraktal'noj fil'tracii i adaptivnoj nastrojki dvumernykh bystrykh preobrazovanij [A software package for fractal filtering and adaptive adjustment of two-dimensional fast transformations]. Certificate of state registration of computer programs No №2013614431, 07 May 3013.
9. Dorogov A.Yu. Fraktal'nyy metod nastrojki bystrykh perestraivayemykh spektral'nykh preobrazovanij na etalonnoye izobrazheniye [Fractal method for setting fast tunable spectral transformations on a reference image]. Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya, priurochennaya k 50-letiyu MRTI-BGUIR (Minsk, 18–19 marta 2014 goda): materialy konf. V 2 ch. Ch. 1. [International scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of MRTI-BSUIR (Minsk, March 18–19, 2014): materials of the conference. In 2 parts. Part 1], Minsk, BSUIR, 2014, pp. 284-285, ISBN 978-985-543-037-8 (part 1).
10. Dorogov A.Yu. Fraktal'noe obuchenie dvumernykh ortogonal'nykh nejronnykh setej [Fractal training of two-dimensional orthogonal neural networks]. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Informacionnye tehnologii i informacionnaja bezopasnost' v nauke, tehnike i obrazovanii "INFOTEH-2015" [Information technologies and Information security in science, technology and education "INFOTECH-2015"], Sevastopol 07-11, September 2015, SevSU, pp. 59-60.
11. Dorogov A.Yu. Two-Dimensional fast orthogonal neural networks. Advances in neural networks – ISSN 2016, 13th International symposium on neural networks, ISSN 2016, St. Petersburg, Russia, July 6-8, 2016, Proceedings, Lecture notes in computer science. Springer international publishing Switzerland 2016, pp. 204-210.

Dorogov Alexander Yurievich. Doctor of technical sciences, associate professor, professor of the department of automation and control Processes of St. Petersburg state electrotechnical university (SPbETU) "LETI", Chief researcher of PJSC "Information telecommunication technologies". The main directions of the author's research are related to data mining, digital signal processing, the design of fast transformations and neural networks of fast learning, the development of analytical platforms, modeling of radio and telecommunications systems. AuthorID: 17611, SPIN 8645-5873, ORCID 0000-0002-7596-6761, vaksa2006@yandex.ru, St. Petersburg, st. Popova, 5.

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 13.03.2024; принята к публикации 13.03.2024.

The article was submitted 06/13/2023; approved after reviewing 03/13/2024; accepted for publication 03/13/2024.

УДК 519.68

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.002

Применение методов интеллектуального анализа данных для изучения свойств суперкомпьютерных приложений

Шайхисламов Денис Ильгизович, Воеводин Вадим Владимирович

Научно-исследовательский вычислительный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, Москва, *sdenis1995@gmail.com*

Аннотация. Для эффективного использования ресурсов суперкомпьютера необходимо постоянно анализировать различные аспекты качества работы современных высокопроизводительных систем. Одним из наиболее важных аспектов является эффективность выполнения параллельных приложений, работающих на суперкомпьютере. А для того, чтобы изучать данный аспект, зачастую полезно иметь информацию о том, насколько различные приложения схожи между собой. Ранее нами были предложены два подхода к сравнению суперкомпьютерных приложений: на основе статической информации об исполняемых файлах, а также динамики их работы во время исполнения. В данной работе будут показаны два полезных на практике метода применения этих подходов: кластеризация заданий и предсказание метрик оценок качества использования суперкомпьютерных ресурсов. С помощью кластеризации будет показано, как можно выявлять аномальные группы запусков заданий, например, в рамках всего потока суперкомпьютерных приложений либо в рамках запусков одного пользователя. С помощью предсказания метрик оценок качества использования суперкомпьютерных ресурсов будет показано, как, минимизируя влияние на запускаемые приложения, собирать статистику по эффективности выполнения пользовательских приложений. Данные методы были успешно апробированы на суперкомпьютере петафлопсного уровня производительности Ломоносов-2.

Ключевые слова: высокопроизводительные вычисления, эффективность приложений, суперкомпьютерный центр, аномальные запуски, интеллектуальный анализ данных

Цитирование: Шайхисламов Д.И. Применение методов интеллектуального анализа данных для изучения свойств суперкомпьютерных приложений / Д.И. Шайхисламов, В.В. Воеводин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 20-30. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.002.

Введение. Современные суперкомпьютеры требуют постоянного мониторинга и контроля качества их работы, без которого практически невозможно достичь эффективного использования суперкомпьютерных ресурсов. При этом необходимо анализировать самые разные аспекты качества работы таких систем: эффективность работы менеджера ресурсов, корректность конфигурации системного и прикладного программного обеспечения, оптимальность установленных квот и ограничений на использование ресурсов, адекватность выбранных разделов и правил их использования, а также многое другое.

Одним из самых главных таких аспектов является эффективность пользовательских приложений, выполняющихся на суперкомпьютере. При этом вопрос изучения потока выполняющихся приложений можно решать самыми разными способами. Например, в работах [1, 2] авторы используют данные системы мониторинга для выделения как аномалий в работе суперкомпьютера, так и трендов использования ресурсов приложениями с помощью методов интеллектуального анализа данных. В работе [3] авторы с помощью классификатора Random Forest размечают задания как интенсивные с точки зрения потребления энергии, так и по интенсивности использования каналов ввода-вывода. Если интенсивные задания по энергопотреблению или каналу ввода-вывода будут исполняться физически рядом на суперкомпьютере, то будет большая нагрузка на блоки питания или каналы ввода-вывода, из-за чего наблюдается нестабильная работа системы, и решение на основе методов классификация дает им возможность заранее оптимальнее распределить задания по вычислительной системе. Авторы в [4] предлагают использовать методы регрессии для предсказания времени исполнения приложений. Они использовали информацию, доступную при запуске заданий, и обучили регрессор

Decision Tree на заданиях за 8 лет работы суперкомпьютера “Beocat”. Результаты авторы использовали для более оптимального планирования постановки заданий на исполнения в менеджере ресурсов Slurm, что позволило им уменьшить среднее время ожидания заданий в очереди.

Еще одним из способов анализа потока приложений заключается в поиске и анализе схожих приложений. Обнаружение схожих приложений в общем потоке помогает, например, более быстро и полно анализировать свойства различных приложений, а также предсказывать поведение еще выполняющихся заданий. Например, в [5] авторы используют методы кластеризации для нахождения близких к исследуемому заданию групп, которые в дальнейшем используются для предсказания времени исполнения приложения. Но для выделения схожих авторы используют методы сравнения команд запуска заданий, что в нашем случае не является достаточно точной метрикой схожести. В работе [6] авторы анализируют данные системы мониторинга и применяют методы выделения схожих заданий с целью определения интенсивности использования каналов ввода-вывода. Перед сравнением временные ряды из системы мониторинга проходят стадию квантования, и в дальнейшем сравниваются с помощью Евклидова расстояния. Данный подход для нас также не подходит, так как несмотря на то, что процесс квантования позволяет очень быстро сравнивать временные ряды, при этом теряется очень много информации о поведении задания.

Ранее нами были предложены два метода поиска схожих суперкомпьютерных приложений, основанные на технологиях интеллектуального анализа данных [7]. Первый метод предполагает анализ так называемых «статических» данных – тех данных, которые не изменяются во время исполнения программы, как, например, исходный код программы, входные данные, исполняемые и объектные файлы и т.д. В нашем случае мы анализируем исполняемые и объектные файлы. С помощью Linux утилиты nm мы можем извлечь используемые в программе имена функций и переменных, которые в дальнейшем с помощью нейронной сети Doc2Vec [8] преобразуются в вектор фиксированной длины. Полученные вектора сравниваются с помощью косинусного сходства (cosine similarity), и результатом является оценка расстояния между двумя заданиями. Данный метод показал высокое качество работы и применяется на постоянной основе на суперкомпьютере Ломоносов-2 для выявления использования различных программных пакетов в заданиях [9, 10].

Второй метод основан на анализе «динамических» данных – данных, которые меняются во время исполнения задания. В нашем случае производится анализ данных системы мониторинга, которая предоставляет информацию о различных аппаратных датчиках во время исполнения приложения. Примерами датчиков являются загрузка CPU/GPU, интенсивность использования сети Infiniband, количество промахов в кэш-память первого и третьего уровней и т.д. Данные агрегируются каждую минуту, и каждый датчик формирует временной ряд. Сравнение полученных временных рядов дает возможность получить оценку схожести поведения у различных заданий. Стоит отметить, что часто применяемое в подобных случаях Евклидово расстояние не подходит из-за частых временных сдвигов фаз исполнения приложения. Пример схожих заданий по поведению с временными сдвигами показан на рис. 1. Поэтому в нашем случае для получения оценки расстояния мы используем метод Dynamic Time Warping [11], который позволяет учесть эту особенность и получить оптимальное соответствие между точками двух временных рядов. При оценке качества работы динамического метода была получена высокая точность (0.9 на метрике Rand Index) на задаче выявления использования программных пакетов [9].

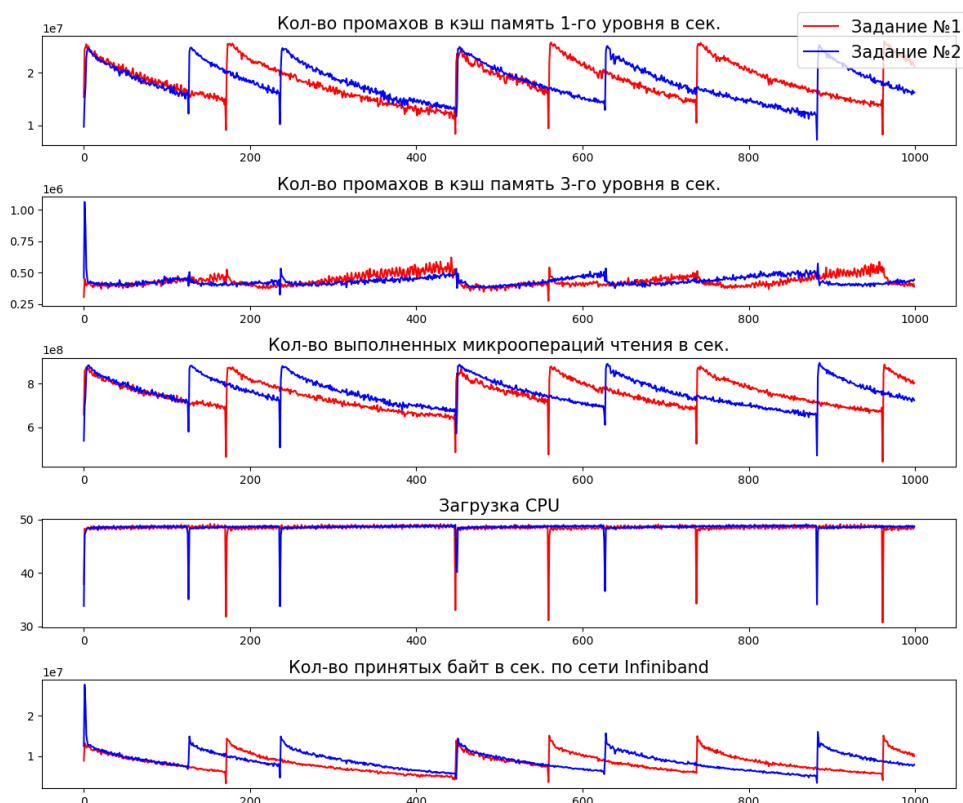


Рис. 1. Показатели динамических характеристик для 2-х схожих заданий во время их исполнения

В данной работе показаны две практически важные задачи, для решения которых предложены подходы с применением указанных методов поиска схожих приложений. Первая задача заключается в кластеризации пользовательских приложений с целью выявления аномальных запусков. Вторая задача направлена на предсказание оценок качества использования суперкомпьютерных ресурсов. Предложенные подходы были апробированы на суперкомпьютере петафлопсного уровня производительности Ломоносов-2, и проведенная апробация показала применимость этих подходов на практике и высокую точность их работы.

Далее статья устроена следующим образом. Раздел 1 описывает предложенный в данной работе метод выявления аномальных запусков на основе кластеризации заданий. В Разделе 2 показано, каким образом методы поиска схожих приложений могут быть применены для предсказания оценок качества использования суперкомпьютерных ресурсов. В Заключение кратко сформулированы основные результаты, представленные в данной работе.

1. Кластеризация суперкомпьютерных заданий.

1.1. Описание подхода к кластеризации заданий. Кластеризация является популярным методом анализа, поскольку ее результаты легко интерпретируются, и она предоставляет информацию о естественной группировке в данных. В нашем случае представляет интерес кластеризация пользовательских заданий, что позволяет лучше понимать общую структуру потока заданий, выполняющихся на суперкомпьютере. Также результаты кластеризации можно использовать в качестве дополнительной информации для других видов анализа, например, для обнаружения аномалий. Ранее нами был предложен алгоритм кластеризации заданий с использованием упомянутых во введении статического и динамического методов выделения схожих приложений [12]. Алгоритм кластеризации устроен следующим образом (схема показана на рис. 2): сначала выполняется кластеризация заданий по исполняемым файлам с помощью иерархической кластеризации, которая использует статический метод оценки расстояния между заданиями. Используется предположение, что задания будут схожи по поведению

только если у них схожи исполняемые файлы. Конечно, есть исключения из такого правила, но на практике они встречаются очень редко. Затем выполняется кластеризация заданий по поведению в рамках каждого полученного кластера по исполняемым файлам с помощью иерархической кластеризации, которая использует динамический метод оценки расстояния между заданиями.

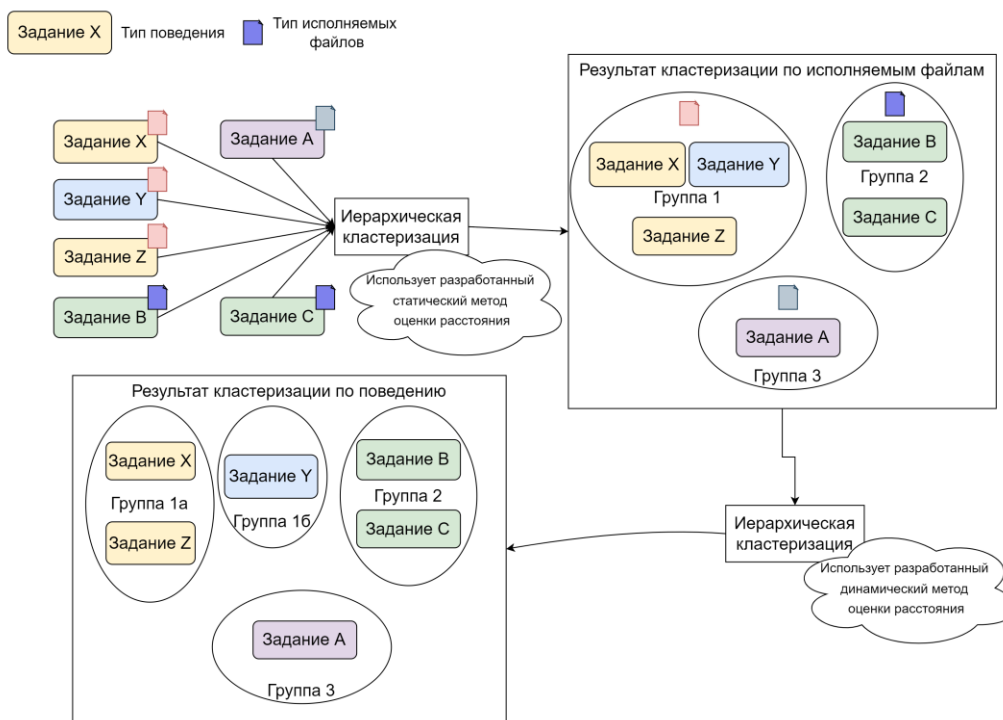


Рис. 2. Предлагаемый алгоритм кластеризации заданий

Предложенный метод уже использовался для выделения групп заданий, которые занимают существенную долю от общего числа использованных CPU-часов суперкомпьютерного центра, а также выделения новых версий используемых программных пакетов [5]. В данной работе предлагается использовать результат кластеризации для другой цели – выделения аномалий в сериях запусков.

1.2. Выделение аномалий в сериях запусков. Аномалиями в сериях запусков будем называть такие задания, которые в последовательности запусков заданий пользователя длиной N сильно отличаются по поведению от всех других заданий в данной последовательности. Число N может варьироваться в зависимости от строгости выделения таких аномалий: если оно большое, то аномалии практически не будут выделяться, при очень маленьком его значении будут выделяться очень много лишних, не аномальных заданий. Для нашей системы эмпирически было выявлено, что при $N=9$ получаются лучшие результаты.

Такие аномалии предоставляют интерес для пользователей с точки зрения ожидаемой производительности работы их приложения, а для администраторов – с точки зрения эффективного использования ресурсов. Причин таких аномалий может быть много – изменение параметров запуска и/или входных данных, что приводит к другому поведению приложения, аппаратный/программный сбой и т.д. Простые случаи, как, например, аппаратный сбой графической карты или проблемы с сетевой файловой системой Lustre, можно легко отловить с помощью пороговых значений для датчиков из системы мониторинга, но очень тяжело отловить случаи, когда некорректность поведения задания видна только при рассмотрении серии запусков, т.е. ее сложно или даже невозможно обнаружить при анализе одного приложения вне контекста остальных запусков.

Для выделения аномалий в сериях запусков предлагается использовать результат работы вышеописанного метода кластеризации заданий. Идея метода заключается в том, что если в сериях запусков большинство заданий принадлежит одному кластеру, но среди них встречается задание из другого кластера, то его можно считать аномальным. Мы понимаем, что могут быть случаи, когда пользователь запустил то же самое приложение с сильно отличающимися входными параметрами или же совсем другое приложение, что привело к возникновению аномалии, но на практике такое возникает не часто. И такие запуски все равно есть смысл отслеживать, поскольку эта информация может быть также полезна для пользователя в некоторых случаях. Для демонстрации приведем следующий пример запусков заданий (рис. 3), где задания раскрашены по тому, к какому кластеру они принадлежат. Видно, что большая часть последовательности запусков заданий принадлежит зеленому кластеру, но среди них появляется задание из красного кластера – значит считаем задание Job7 аномальным. Если же задания из других кластеров (синий и желтый) находятся на границе последовательности запусков кластера, то их не стоит считать аномальными (поскольку нет достаточной информации о соседних с ними запусках).

Job1, Job2, Job3, Job4, Job5, Job6, Job7, Job8, Job9, Job10, Job11, Job12

Рис. 3. Пример последовательности запусков заданий пользователя

1.3. Апробация предложенного подхода. Для проверки работоспособности метода были проанализированы все задания суперкомпьютера Ломоносов-2 за январь-май 2023 года, и с помощью данного метода были выделены 248 аномальных случаев. Это составляет 1.7% от общего числа заданий. Но для подтверждения того, что данные задания действительно аномальные, все выявленные случаи были вручную проверены. В результате проверки было выявлено, что:

- выделенные задания действительно выбиваются по поведению в сериях запусков заданий пользователя;
- команды запуска аномальных заданий и заданий в его окрестности отличаются незначительно – значит запускались однотипные приложения с небольшими изменениями во входных параметрах;
- поведение в большинстве случаев нетривиальное, то есть без учета контекста запусков данное задание не выделяется как подозрительное.

Это показывает, что предложенный метод действительно можно использовать для выявления аномалий в сериях запусков. Но стоит отметить, что далеко не всегда такие выявленные аномальные задания работают неэффективно, ведь даже небольшое изменение параметров запуска может сильно влиять на поведение задания, и это может быть абсолютно нормальным свойством данного типа приложений. Поэтому было принято решение, что, когда данный вид анализа будет запущен для обработки потока суперкомпьютерных заданий в реальном времени, мы не будем оповещать всех пользователей о найденных аномальных случаях. Если пользователю данный вид анализа будет интересен, будет предоставлена возможность включить обнаружение таких аномалий среди их запусков и настроить оповещение. Подобный функционал планируется реализовать в рамках системы Октошелл [13], в котором, среди прочего, пользователям уже доступна детальная информация о производительности их приложений.

2. Предсказание качества использования ресурсов суперкомпьютера. Администраторами Суперкомпьютерного центра МГУ в данный момент разрабатывается система оценок для запускаемых приложений, которая предназначена для быстрого и точного анализа каче-

ства использования ресурсов суперкомпьютера. Эти оценки нужны для первоначального анализа, позволяющего понять в целом, какие задания имеют низкую эффективность и поэтому требуют внимания. Предполагается, что последующий детальный анализ выбранного приложения, необходимый для определения первопричин снижения производительности и способов их устранения, должен выполняться с использованием других существующих средств анализа, таких как профилировщики, отладчики и т.д.

Оценки были разработаны для 6 типов ресурсов: CPU (`score_cpu`), памяти (`score_mem`), сети MPI (`score_mpi`), ввода-вывода (`score_io`), GPU (`score_gpu`) и памяти GPU (`score_gpu_mem`). Каждая из характеристик принимает значение от 0 (в задании нет проблем с данным видом ресурса) до 100 (работа с данным видом ресурса постоянно мешала полезным вычислениям во время работы анализируемого задания). В данной работе мы остановимся на двух оценках – для CPU и памяти. Для вычисления данных оценок требуется собирать достаточно много информации с процессорных датчиков, что требует применения режима мультиплексирования при работе системы мониторинга. Данный режим добавляет дополнительные накладные расходы, что в среднем увеличивает время исполнения на ~2.78% [14]. Такие накладные расходы, хотя и не являются критичными, все же ощутимы, поэтому на данный момент принято решение запускать сбор данных по дополнительным датчикам только для каждого третьего задания, что позволяет в среднем уменьшить накладные расходы до <1%. Но возникает вопрос – как получить данные оценки для остальных 2/3 заданий?

2.1. Описание подхода к предсказанию оценок. Для решения данной задачи было принято решение использовать методы выделения схожих суперкомпьютерных заданий, описанные во введении. Был предложен следующий алгоритм:

1. для 1/3 заданий есть оценки качества использования ресурсов, таким образом, мы их можем использовать как исторические данные в базе знаний;
2. при появлении задания, у которого нет оценок:
 - a. производится поиск всех заданий из базы знаний, которые схожи согласно статическому методу;
 - b. если находятся задания, схожие по статическим данным, то среди них ведется поиск заданий, схожих по динамическим данным, с менее строгим порогом (при этом выделяется больше схожих заданий);
 - c. если заданий, схожих по статическим данным, не находится, то ведется поиск схожих по динамическим данным заданий из базы знаний с более строгим порогом (при этом выделяется меньше схожих заданий);
 - d. проводится агрегация оценок найденных схожих по динамическим данным заданий.

Агрегацию оценок можно проводить различными способами. Мы испробовали три различных варианта агрегации: среднее значение, медиана и средневзвешенное значение softmax. В ходе экспериментов было выявлено, что при использовании различных функций агрегации результаты работы метода варьировались несущественно, из-за чего в дальнейшем всегда использовалась медиана.

2.2. Апробация метода предсказания оценок. Апробация проводилась с помощью заданий, у которых есть оценка, поскольку это дает возможность предсказать значение оценки по историческим данным, а потом сравнить результат с реальным значением.

Для оценки качества работы метода использовались метрики Mean Absolute Error, MAE (1) и Mean Squared Error, MSE (2), где j – номер задания, n – количество заданий, y_j – предсказанное значение, \hat{y}_j – истинное значение оценки. Стоит отметить, что отклонение от реальной оценки ± 10 в нашем случае является допустимым, так как оценки нужны для первичного качественного анализа производительности, и высокая точность здесь не требуется. Более того,

сами оценки тоже могут меняться в данном промежутке даже при идентичных запусках в силу особенностей их поведения.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j| \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2 \quad (2)$$

Для апробации были рассмотрены все задания за 6 месяцев работы суперкомпьютера Ломоносов-2. Мы рассматривали только задания, длительность которых была больше полу- часа, так как при меньшей длительности собирается недостаточно данных мониторинга для оценки поведения. Общее количество заданий с оценками составило ~4600.

При апробации необходимо было рассмотреть 2 варианта использования метода. Первый вариант – для получения наилучших результатов, и в этом случае использовались все доступные данные. Второй вариант – это симуляция онлайн работы алгоритма, то есть при предсказании оценок сразу после завершения задания, из-за чего доступны данные только о предшествующих заданиях. Начнем с первого варианта, так как с его помощью можно получить наиболее точную картину о том, насколько хорошо работает метод. В таблице 1 приведены результаты работы метода при доступности всех данных, где АЕ – абсолютное значение ошибки. Как можно заметить, в среднем работа метода показывает удовлетворяющую требованиям качество работы: средняя ошибка составляет 2.62. Но не для всех заданий можно предсказать оценки – для ~13% случаев методы выделения схожих заданий не смогли найти близкие задания для предсказаний. Это означает, что данные задания сильно отличаются по поведению от всех заданий, доступных на данный момент. График распределения разности между предсказанными и истинными значениями оценок показан на рис. 4, по которому видно, что у преимущественного числа заданий (>95%) ошибка составляет <10, что полностью удовлетворяет нашим потребностям.

Таблица 1. Результат апробации для случая с использованием всех заданий

	% заданий, для которых удалось предсказать значение	MAE	MSE	% заданий с АЕ>10
Score_mem	86.94	2.62	34.54	4.71
Score_cpu	86.93	2.19	23.21	3.27

Первый вариант – это идеальный случай, когда время обработки задания не учитывается. Второй вариант является более приближенным к реальности, так как зачастую есть потребность в получении данных о задании сразу после его завершения.

При обработке потока суперкомпьютерных заданий в режиме реального времени искать схожие задания среди всех предыдущих заданий не является возможным, поскольку это может потребовать слишком много времени. В связи с чем возникает вопрос: сколько предыдущих заданий необходимо учитывать? Это количество заданий для сравнения в дальнейшем будем называть окном.

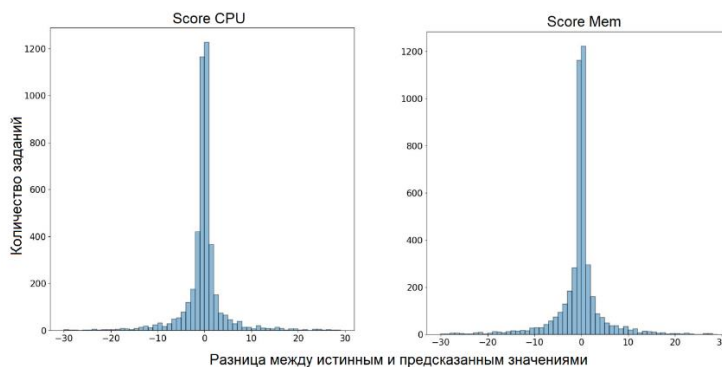


Рис. 4. Гистограмма распределения числа заданий с полученной разницей между истинным и предсказанным значениями для оценок score_cpu и score_mem

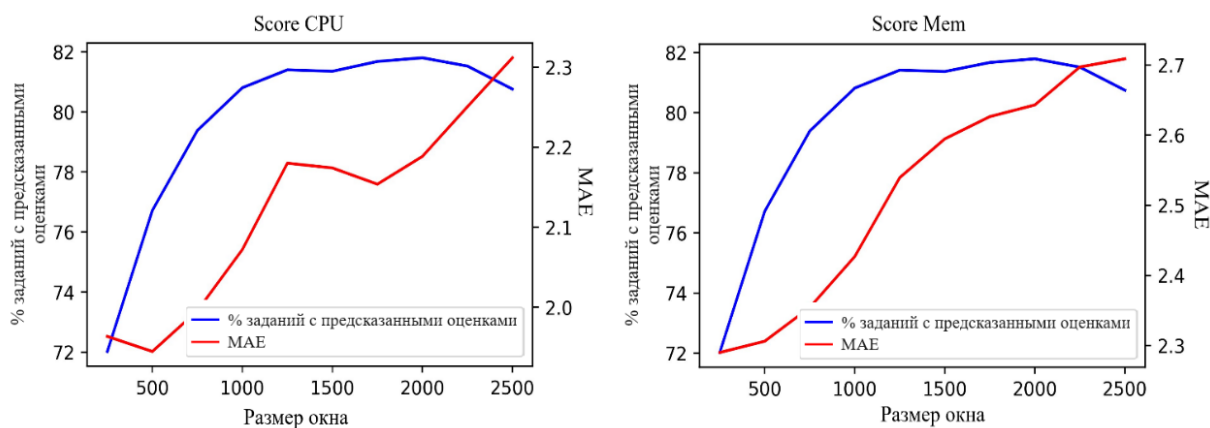


Рис. 5. Графики изменения MAE и процента заданий, для которых удалось предсказать значение оценки, в зависимости от размера окна

Для решения задачи подбора размера окна был проведен эксперимент, в котором оценивалось качество работы метода в зависимости от размера окна. На рис. 5 показаны графики изменения MAE и процента заданий, для которых удалось предсказать значение оценки, в зависимости от размера окна. Как можно заметить, размер окна от 1250 до 1500 кажется лучшим выбором для комбинации метрик, так как последующие размеры практически не дают никакого прироста к качеству работы: количество заданий с предсказаниями не растет, но при этом MAE также немного, но все же увеличивается.

В таблице 2 приведены результаты работы метода при размере окна, равным 1250.

Если сравнивать два варианта апробации, то можно заметить, что учет не только предшествующих, но и будущих заданий не дает никакого прироста к качеству предсказаний, но дает возможность предсказать оценки для еще 5% заданий, из-за чего планируется использовать следующий подход при анализе реального потока суперкомпьютерных заданий:

- сразу после завершения задания выполняется предсказание оценки с использованием второго варианта апробации;
- если предсказать оценку не удалось, через N дней проводится перепроверка с учетом новых завершившихся заданий. Число N может варьироваться.

Таблица 2. Результат апробации для случая с использованием только предшествующих заданий, размер окна=1250

	% заданий, для которых удалось предсказать значение	MAE	MSE	% заданий с AE>10
Score_mem	81.41	2.53	32.59	4.51
Score_cpu	81.39	2.18	24.83	3.68

Заключение. В данной работе показаны две важные практические задачи, для решения которых могут применяться разработанные ранее методы выделения схожих приложений – выявление аномалий в сериях запусков и предсказание оценок качества использования ресурсов суперкомпьютера.

В задаче выявления аномалий применялся подход с использованием методов кластеризации заданий по динамическим данным. Если в некоторой последовательности запусков все задания принадлежат одному кластеру, но среди них присутствует задание из другого кластера, то это задание считается аномальным. С помощью такого подхода были проанализированы задания за 5 месяцев работы суперкомпьютера Ломоносов-2, и среди них обнаружено 1.7% потенциально аномальных заданий. Ручная проверка показала, что действительно эти задания заметно отличаются по поведению от серии запусков заданий пользователей и таким образом могут представлять интерес для обнаружения.

Оценки качества использования ресурсов суперкомпьютера на данный момент собираются только для трети заданий, из-за чего для остальных необходимо проводить предсказание. Предлагаемый метод предсказания оценок основан на поиске схожих заданий, для которых известна оценка. После получения списка близких заданий, их оценки агрегируются, что используется как результат предсказания. Апробация показала, что с помощью данного метода можно предсказать оценки для 87% заданий, и качество предсказаний достаточно высокое. Так, средняя ошибка составляет всего 2.63, а процент заданий, у которых отклонение предсказанной оценки от реальной существенно, не более 5%.

На данный момент программные средства для решения этих задач прошли апробацию и в будущем будут использоваться на суперкомпьютере Ломоносов-2 на постоянной основе.

Благодарности. Результаты, описанные в данной статье, были получены в МГУ имени М.В. Ломоносова при финансовой поддержке Российского научного фонда, договор № 21-71-30003. Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

Список источников

1. Joseph 'Joshi' Fullop IV, Brett L. Layman Deriving workload expectations - monitoring and analysis using HPC job profiles. CUG2020 Proceedings, 2020, available at: https://cug.org/proceedings/cug2020_proceedings/includes/files/spec110s1.pdf (accessed: 20/08/2023).
2. Patel T., Liu Z., Kettimuthu R., Rich P., Allcock W, Tiwari D. Job characteristics on large-scale systems: long-term analysis, quantification, and implications. SC20, International conference for high performance computing, networking, storage and analysis, 2020, pp. 1-17.
3. Tsujita Y., Uno A., Sekizawa R., Yamamoto K. Classifying jobs towards power-aware HPC system operation through long-term log analysis, array 15, 2022, pp. 100179, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005622000376> (accessed: 20/08/2023).
4. Tanash M., Dunn B., Andresen D., Hsu W., Yang H., Okanlawon A., Improving HPC system performance by predicting job resources via supervised machine learning. PEARC19, 2019, available at: <https://doi.org/10.1145/3332186.3333041> (accessed: 20/08/2023).
5. Wang H., Dai YQ., Yu J. [et al.] Predicting running time of aerodynamic jobs in HPC system by combining supervised and unsupervised learning method. Advances in Aerodynamics, 3, 22, 2021, available at: <https://doi.org/10.1186/s42774-021-00077-8> (accessed: 20/08/2023).
6. Kunkel J., Betke E. Toward a workflow for identifying jobs with similar i/o behavior utilizing time series analysis, high performance computing. ISC high performance 2021, lecture notes in Computer Science, vol 12761.
7. Shaikhislamov D., Voevodin V. Solving the problem of detecting similar supercomputer applications using machine learning methods. Parallel computational technologies 2020, vol. 1263 of communications in computer and information science, New York, Springer International Publishing, 2020, pp. 46–57.
8. Quoc V. Le, Mikolov T. Distributed representations of sentences and documents. ArXiv.org. 2014, available at: DOI:10.48550/arXiv.1405.4053 (accessed: 20/08/2023).
9. Shaikhislamov D., Voevodin V. Development and practical application of methods for detecting similar supercomputer jobs. Parallel computational technologies, PCT 2021, vol. 1437 of communications in computer and information science, Cham, Switzerland, Springer International Publishing AG, 2021, pp. 18-30.
10. Shaikhislamov D., Voevodin V. Analysis of software package usage based on methods for identifying similar HPC applications. Russian supercomputing days, RuSCDays 2021, ed. Voevodin V., Sobolev S., vol. 1510 of communications in computer and information science, Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 310-321.
11. Berndt D.J., Clifford J. Using dynamic time warping to find patterns in time series. Proceedings of the 3rd international conference on knowledge discovery and data mining, AAAIWS'94, AAAI Press, pp. 359-370.
12. Shaikhislamov D., Voevodin V. Smart clustering of hpc applications using similar job detection methods. Parallel processing and applied mathematics, vol. 13826 of lecture notes in computer science, New York, Springer International Publishing, 2023, pp. 209-221.
13. Nikitenko D.A., Voevodin V.V., Zhumatiy S.A. Driving a Petascale HPC center with octoshell management system. Lobachevskii J Math 40, 2019, pp. 1817-1830.
14. Voevodin V., Stefanov K., Zhumatiy S. Overhead analysis for performance monitoring counters multiplexing. 8th Russian supercomputing days, RuSCDays 2022, Moscow, Russia, vol. 13708 of lecture notes in computer science, Cham, Switzerland, Springer International Publishing AG, 2022, pp. 461-474.

Шайхисламов Денис Ильгизович. *Техник научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В.Ломоносова, ведущий инженер в компании Хуавэй. Основные направления научной деятельности: анализ производительности приложений, большие данные, вычислительные системы, системы обработки данных. SPIN: 9153-5619, ORCID: 0000-0002-9279-6397, Scopus AuthorID: 57193691627, sdenis1995@gmail.com.*

Воеводин Вадим Владимирович. *К.ф.м.н., заведующий лабораторией научно-исследовательского вычислительного центра МГУ им. М.В.Ломоносова. Основные направления научной деятельности: параллельные вычисления, суперкомпьютеры, технологии параллельного программирования, системное программное обеспечение, анализ производительности, поиск аномалий, анализ потока заданий, мониторинг, эффективность. ResearcherID: F-1783-2017, SPIN: 3588-3465, ORCID: 0000-0003-1897-1828, Scopus AuthorID: 57188745295.*

UDC 519.68

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.002

Application of data mining methods to study the properties of supercomputing applications

Denis I. Shaikhislamov, Vadim V. Voevodin

Research computing center of Lomonosov Moscow State University,
Russia, Moscow, *sdenis1995@gmail.com*

Abstract. For efficient use of supercomputer resources, it is necessary to constantly analyze various aspects of the quality of modern high-performance systems. One of the most important aspects is the efficiency of execution of parallel applications running on a supercomputer. And in to study this aspect, it is often useful to have information about how different applications are similar to each other. Previously, we proposed two approaches to comparing applications: based on static information about executable files, as well as the behavior during execution. In this paper, we will show two practical methods for applying these approaches: clustering and predicting metrics for assessing the quality of the use of supercomputer resources. Using clustering, we will show how abnormal groups of job launches can be detected, for example, within the entire flow of supercomputing applications or within the launches of a single user. Using the prediction of metrics for assessing the quality of use of supercomputer resources, it will be shown how, while minimizing the impact on running applications, to collect statistics on the efficiency of user applications. These methods were successfully tested on a petaflop supercomputer Lomonosov-2.

Keywords: high performance computing, application efficiency, supercomputing center, abnormal launches, data mining

Acknowledgements: The results described in this article were obtained at Lomonosov Moscow State University with the financial support of the Russian Science Foundation, agreement No. 21-71-30003. The research is carried out using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources at Lomonosov Moscow State University.

References

1. Joseph 'Joshi' Fullop IV, Brett L. Layman Deriving workload expectations - monitoring and analysis using HPC job profiles. CUG2020 Proceedings, 2020, available at: https://cug.org/proceedings/cug2020_proceedings/includes/files/spec110s1.pdf (accessed: 20/08/2023).
2. Patel T., Liu Z., Kettimuthu R., Rich P., Allcock W, Tiwari D. Job characteristics on large-scale systems: long-term analysis, quantification, and implications. SC20, International conference for high performance computing, networking, storage and analysis, 2020, pp. 1-17.
3. Tsujita Y., Uno A., Sekizawa R., Yamamoto K. Classifying jobs towards power-aware HPC system operation through long-term log analysis, array 15, 2022, pp. 100179, available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590005622000376> (accessed: 20/08/2023).

4. Tanash M., Dunn B., Andresen D., Hsu W., Yang H., Okanlawon A., Improving HPC system performance by predicting job resources via supervised machine learning. PEARC19, 2019, available at: <https://doi.org/10.1145/3332186.3333041> (accessed: 20/08/2023).
5. Wang H., Dai YQ., Yu J. [et al.] Predicting running time of aerodynamic jobs in HPC system by combining supervised and unsupervised learning method. Advances in Aerodynamics, 3, 22, 2021, available at: <https://doi.org/10.1186/s42774-021-00077-8> (accessed: 20/08/2023).
6. Kunkel J., Betke E. Toward a workflow for identifying jobs with similar i/o behavior utilizing time series analysis, high performance computing. ISC high performance 2021, lecture notes in Computer Science, vol 12761.
7. Shaikhislamov D., Voevodin V. Solving the problem of detecting similar supercomputer applications using machine learning methods. Parallel computational technologies 2020, vol. 1263 of communications in computer and information science, New York, Springer International Publishing, 2020, pp. 46–57.
8. Quoc V. Le, Mikolov T. Distributed representations of sentences and documents. ArXiv.org. 2014, available at: DOI:10.48550/arXiv.1405.4053 (accessed: 20/08/2023).
9. Shaikhislamov D., Voevodin V. Development and practical application of methods for detecting similar supercomputer jobs. Parallel computational technologies, PCT 2021, vol. 1437 of communications in computer and information science, Cham, Switzerland, Springer International Publishing AG, 2021, pp. 18-30.
10. Shaikhislamov D., Voevodin V. Analysis of software package usage based on methods for identifying similar HPC applications. Russian supercomputing days, RuSCDays 2021, ed. Voevodin V., Sobolev S., vol. 1510 of communications in computer and information science, Springer International Publishing, Cham, 2021, pp. 310-321.
11. Berndt D.J., Clifford J. Using dynamic time warping to find patterns in time series. Proceedings of the 3rd international conference on knowledge discovery and data mining, AAAIWS'94, AAAI Press, pp. 359-370.
12. Shaikhislamov D., Voevodin V. Smart clustering of hpc applications using similar job detection methods. Parallel processing and applied mathematics, vol. 13826 of lecture notes in computer science, New York, Springer International Publishing, 2023, pp. 209-221.
13. Nikitenko D.A., Voevodin V.V., Zhumatiy S.A. Driving a Petascale HPC center with octoshell management system. Lobachevskii J Math 40, 2019, pp. 1817-1830.
14. Voevodin V., Stefanov K., Zhumatiy S. Overhead analysis for performance monitoring counters multiplexing. 8th Russian supercomputing days, RuSCDays 2022, Moscow, Russia, vol. 13708 of lecture notes in computer science, Cham, Switzerland, Springer International Publishing AG, 2022, pp. 461-474.

Shaikhislamov Denis Ilgizovich. Technician at research computing center of Lomonosov Moscow State University, Senior engineer at Huawei RRI. The main areas of scientific activity: application performance analysis, big data, computing systems, data processing systems. SPIN: 9153-5619, ORCID: 0000-0002-9279-6397, Scopus AuthorID: 57193691627, sdenis1995@gmail.com.

Voevodin Vadim Vladimirovich. PhD, head of the laboratory in the research computing center of Lomonosov Moscow State University. The main areas of scientific activity: parallel computing, supercomputers, parallel programming technologies, system software, performance analysis, anomaly search, job flow analysis, monitoring, efficiency. ResearcherID: F-1783-2017, SPIN: 3588-3465, ORCID: 0000-0003-1897-1828, Scopus AuthorID: 57188745295.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 26.10.2023.

The article was submitted 09/04/2023; approved after reviewing 10/26/2023; accepted for publication 10/26/2023.

УДК 004.82

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.003

Система онтологий научного портала знаний для системных исследований энергетики

Ворожцова Татьяна Николаевна, Пестерев Дмитрий Вячеславович

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

Россия, Иркутск, tnn@isem.irk.ru

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы структурирования знаний в области исследований энергетики и предлагается система онтологий для обеспечения доступа к знаниям с использованием разрабатываемого онтологического портала научных знаний. Научный портал знаний для исследований энергетики разрабатывается на основе технологии построения порталов научных знаний, созданной в Институте систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН в Новосибирске. Предлагаемая система онтологий формируется с учетом системного подхода как общей методологии системных исследований, выполняемых в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН). Приведены примеры онтологий, отражающих взаимосвязи между направлениями исследований и сложной структурой объектов исследования.

Ключевые слова: портал знаний, онтология, системный подход, энергетика, технологии построения порталов знаний

Цитирование: Ворожцова Т.Н. Система онтологий научного портала знаний для системных исследований энергетики / Т.Н. Ворожцова, Д.В. Пестерев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 31-39. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.003.

Введение. В ИСЭМ СО РАН выполняется работа по формированию онтологического пространства знаний для системных исследований энергетики, которое представляет собой совокупность онтологий, отражающих взаимосвязи базовых понятий предметной области исследований энергетики и смежных предметных областей. Доступ к этому пространству знаний обеспечивается посредством научного портала знаний, который представляет собой единый интерфейс для работы с большими объемами информационных ресурсов. Научный портал знаний – это специализированный интернет-портал, обеспечивающий систематизацию знаний и информационных ресурсов в заданной научной области знаний, их интеграцию и содержательный доступ к ним. Онтологический портал знаний – это интернет-портал, основанный на системе взаимосвязанных онтологий, отражающих необходимые и доступные для исследований знания в области энергетики и других смежных предметных областей.

Наиболее близкое отношение к категории научных порталов имеют интернет-ресурсы, в частности, порталы и сайты образовательных учреждений, научных журналов, академических институтов, а также специализированные порталы, посвященные новостям науки. Научные порталы знаний имеют, как правило, новостную, образовательную или энциклопедическую направленность. Примеры научных порталов:

- Наука.рф – официальный сайт «Десятилетия науки и технологий в России» содержит информацию о главных новостях, инициативах, проектах и мероприятиях [1].
- Научная Россия – электронное периодическое издание «Научная Россия» [2].
- ПостНаука – образовательная платформа, лекции лучших российских и зарубежных ученых, интервью с исследователями фундаментальной науки и практикующими специалистами [3].
- Новая наука – актуальные новости научных открытий, высоких технологий, электроники и космоса [4].
- Наука и просвещение – международный центр научного сотрудничества. Конференции, конкурсы, монографии [5].

Существует ряд интернет-ресурсов, порталов и сайтов, посвященных энергетической тематике, в том числе, научных и образовательных. Примеры порталов по энергетике можно условно разделить на отраслевые, посвященные как отрасли в целом, так и ее отдельным направлениям; новостные, содержащие актуальные новости; и порталы энергетических компаний и организаций. К первой группе относятся, например, следующие:

- Энергетика и промышленность России – ведущий отраслевой портал, содержит новости энергетики, статьи, аналитику, интервью, новые технологии, каталог предприятий, мероприятия [6].
- Энергосети России – портал об электроэнергетике, включает каталог поставщиков, энергетических компаний, электростанций, публикации, обзоры [7].
- Energyland.info – интернет-портал сообщества ТЭК, содержит разделы: теплоэнергетика, альтернативная энергетика, гидроэнергетика, технологии и разработки, ТЭК [8].

Примеры новостных энергетических порталов:

- Новости энергетики – информационный портал; включает актуальные новости разделов: электроэнергетика, альтернативная энергетика, атомная энергетика, энергосбережение, электрические сети [9].
- Медиа-новости – для освещения событий и тенденций в энергетической отрасли Евразии и мира [10].
- Энергоньюс – мировые новости и инновации в энергетике [11].

Порталы энергетических компаний и организаций:

- Министерство энергетики РФ – содержит разделы: новости, деятельность, статистика [12].
- РЭА – Российское энергетическое агентство Минэнерго России [13].
- РусГидро – портал энергохолдинга «РусГидро». Включает разделы: деятельность, новости, инновации, цифровая трансформация [14].

Особенностью разрабатываемого портала знаний для исследований энергетики является его более узкая научная направленность, в отличие от других порталов по энергетике, ориентированных на доступ к информационным ресурсам практического и коммерческого назначения, а также в отличие от порталов знаний и научных порталов, имеющих образовательную или энциклопедическую направленность.

Актуальность использования онтологий обусловлена необходимостью интеграции и наглядного представления знаний для системных исследований энергетики. Онтологии используются в качестве ядра информационной модели портала знаний.

1. Технология построения портала. Научный портал знаний для исследований энергетики разрабатывается на основе технологии построения интеллектуальных научных интернет ресурсов (ИНИР), предложенной в Институте систем информатики им. А.П. Ершова СО РАН в Новосибирске [15, 16]. Особенности этой технологии являются: использование онтологий в качестве средства представления и систематизации знаний и ориентация на экспертов, специалистов в тех областях знаний, для которых создаются ресурсы.

Процесс построения разрабатываемого портала знаний для исследований энергетики включает следующие этапы:

- Разработка онтологии и тезауруса предметной области (построение базовых иерархий «общее-частное» или «часть-целое» из метапонятий, определение отношений между понятиями, задание атрибутов, описывающих свойства понятий и отношений, кодирование онтологии в системе Protege).
- Настройка пользовательского интерфейса – визуализация Информационных Объектов (ИО), являющихся экземплярами понятий онтологии.

- Информационное наполнение портала знаний.
Построение онтологии портала базируется на следующих принципах:
- Структурирование онтологий.
- Использование уже разработанных базовых онтологий (базовая онтология научной деятельности, базовая онтология научного знания, базовая онтология задач и методов, базовая онтология научных информационных ресурсов).
- Использование паттернов онтологического проектирования для построения онтологий научных предметных областей.

Структурирование онтологий в соответствии с технологией построения портала знаний предполагает выделение онтологии научной деятельности и онтологии научного знания. Онтология научной деятельности относится к организации научно-исследовательской работы, описывающей участников (исследователей, организации), мероприятия (конференции, семинары), проекты, публикации и др. Онтология научного знания описывает предметную область с выделением направлений, разделов, объектов, предметов, методов исследования.

2. Структура знаний системных исследований энергетики. Системные исследования энергетики предполагают системный подход как общую методологию исследований, которая включает иерархическое представление структуры объектов исследования, учет внешних связей рассматриваемой системы, учет неопределенностей и неполноты информации, а также использование математических методов и информационных технологий [17].

В ИСЭМ СО РАН разработано множество графических онтологий, отражающих разные аспекты исследований. На начальном этапе онтологии разрабатываются в графическом виде с использованием инструментария SmartTools. Такие онтологии отражают совокупность основных понятий и взаимосвязей рассматриваемого раздела исследований. Это обеспечивает их наглядность и возможность согласования базовых понятий между исследователями. Тематика системных исследований энергетики охватывает большое количество компонентов необходимых знаний и, соответственно, большое количество терминов предметной области (например, как это показано на рисунке 1).

Каждый из представленных на рисунке терминов является понятием онтологии системных исследований энергетики. Показанные связи базовых понятий отражают только иерархические отношения между представленными понятиями, а вся совокупность возможных взаимосвязей между ними значительно шире. Основой для систематизации области знаний рассматриваемой предметной области является структура системных исследований энергетики, представленная в работах [18, 19]. Основные направления системных исследований, выполняемых в ИСЭМ СО РАН, остаются неизменными, так как достаточно полно охватывают тематику исследований и включают:

- Комплексные проблемы энергетики:
- Прогнозирование развития систем энергетики.
- Исследование развития мировой энергетики.
- Энергетическая безопасность.
- Экологические проблемы.
- Управление системами энергетики:
 - Управление развитием систем энергетики.
 - Управление функционированием систем энергетики.
- Теоретические основы:
 - Свойства систем энергетики.
 - Закономерности развития систем энергетики и энергетических технологий.
 - Методы моделирования и системного анализа, информационные технологии.

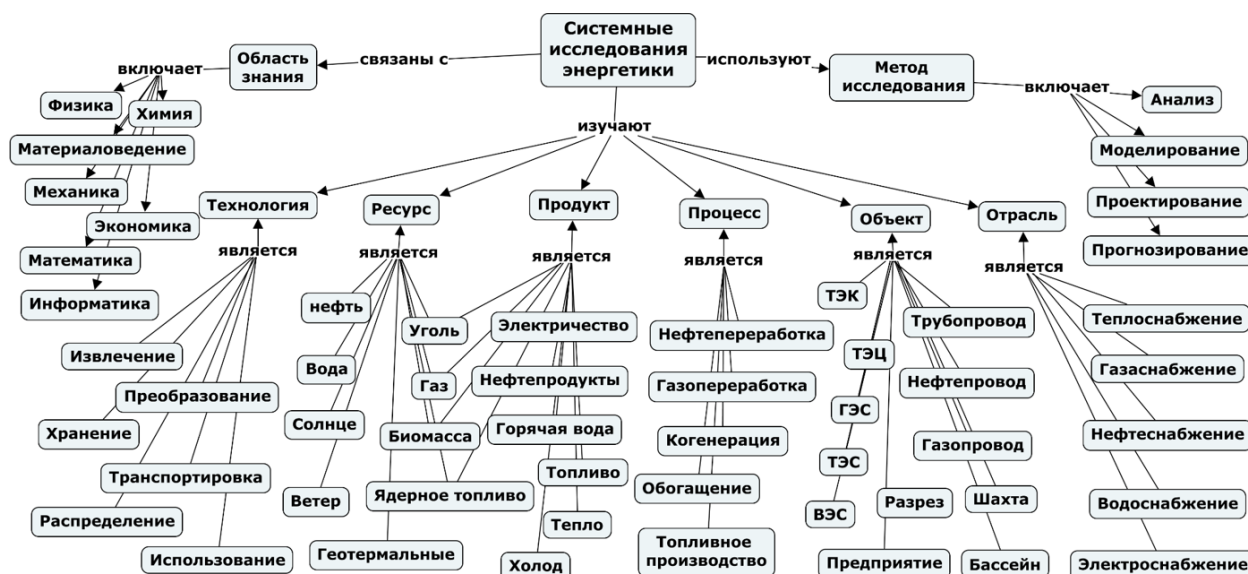


Рис. 1. Компоненты системных исследований энергетики

Разработанная в ИСЭМ СО РАН система онтологий структурируется на основе фрактального подхода [20], обеспечивающего переход от онтологий верхнего уровня (метаонтологий), включающих наиболее общие понятия, к более детальным, описывающим различные разделы системных исследований. На рисунке 2 показана метаонтология системных исследований энергетики, которая является основой системы онтологий разрабатываемого портала знаний.

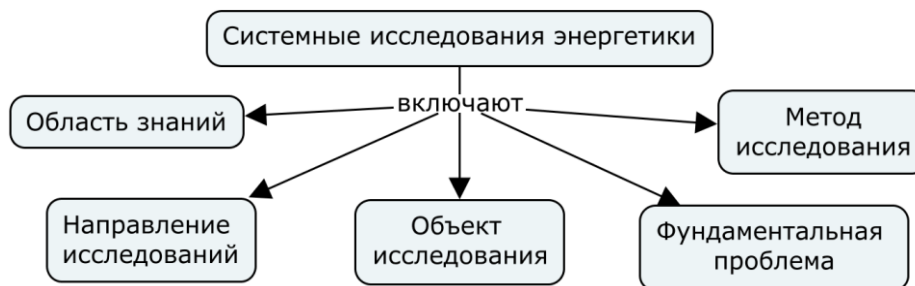


Рис. 2. Метаонтология системных исследований энергетики

На основе графических онтологий создается их формализованное представление с использованием открытой системы разработки онтологий Protégé на языке OWL, которое используется системой настройки и управления его контентом.

3. Система онтологий портала знаний. Система онтологий портала соответствует структуре предметной области исследований энергетики и сложной иерархической структуре объектов исследований, отражает направления и особенности выполняемых конкретных исследований, методы исследований, информационные ресурсы и другие источники знаний.

С учетом используемой технологии построения портала знаний и структуры предметной области исследований энергетики онтология разрабатываемого портала знаний включает описание научной деятельности, предметной области исследований энергетики и релевантных ей ресурсов. На рисунке 3 показаны эти основные разделы портала (Деятельность, Информационный ресурс, Системные исследования энергетики) и их компоненты.

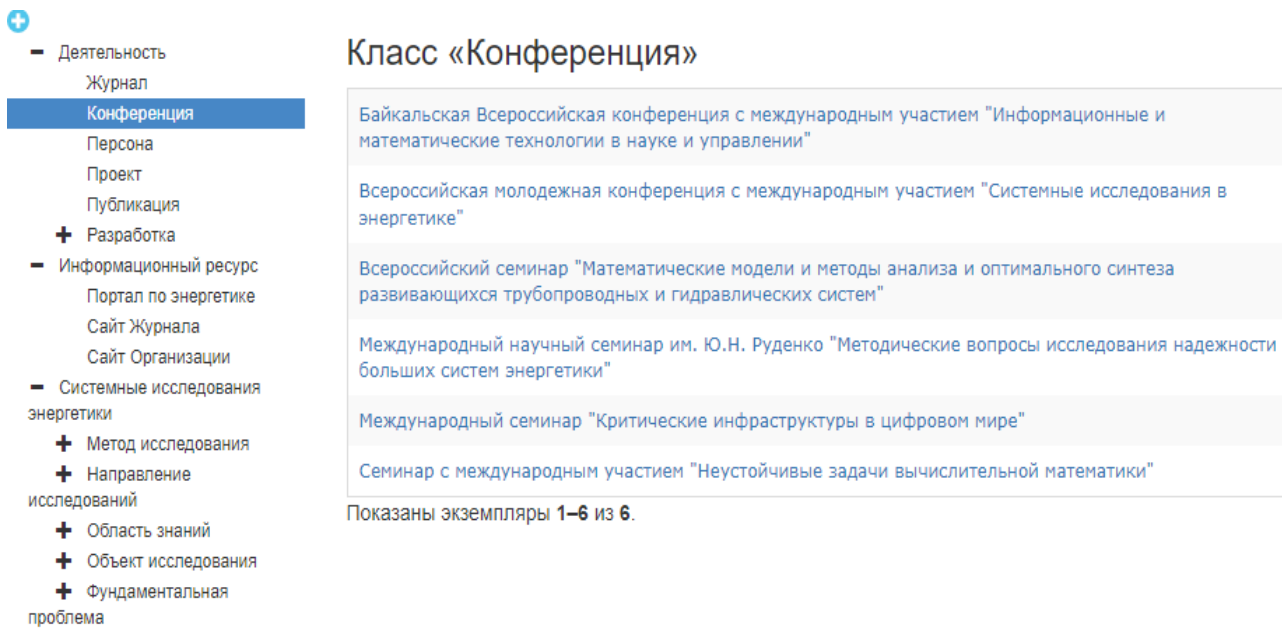


Рис. 3. Иерархия разделов портала

В разделе «Деятельность» отражается научно-организационная деятельность ИСЭМ СО РАН, в частности, проводимые в институте семинары и конференции разного уровня, издаваемые научные журналы, выполняемые проекты и разработки и др. Раздел «Информационный ресурс» предполагает обеспечение доступа к тематическим интернет-ресурсам соответствующей предметной области, а именно, порталам, сайтам и журналам энергетической тематики.

Раздел «Системные исследования энергетики» детализируется в соответствии с представленной выше метаонтологией системных исследований энергетики. В частности, раздел «Область знаний» включает физику, химию, материаловедение, информатику, экономику и другие, как это показано на рисунке 1. Там же перечислены используемые методы исследований. Раздел «Направление исследований» детализируется в соответствии с тематикой научных подразделений института. Раздел «Фундаментальные проблемы» соответствует тематике базовых проектов исследований по государственному заданию на 2021-2025 годы в программе фундаментальных научных исследований РФ 2021-2030.

Наиболее сложной является система онтологий раздела «Объект исследования». Основной объект исследований энергетики – это топливно-энергетический комплекс (ТЭК), объединяющий совокупность взаимосвязанных отраслей и систем энергетики. Структуру ТЭК можно представить в разных аспектах рассмотрения. Предлагается в качестве основных понятий (классов) метаонтологии исследований ТЭК рассматривать отраслевую, производственно-технологическую и территориальную системы, а также понятия – ресурс/продукт и объект/предприятие. Отраслевая структура включает совокупность отраслей: электроэнергетическую, теплоснабжающую, нефте-газоснабжающую, углеснабжающую. Производственно-технологическая структура рассматривается в соответствии с этапами технологического процесса: добыча, транспортировка, переработка топлива, преобразование топлива в энергию, транспортировка энергии, распределение энергии. Иерархия территориальной структуры ТЭК включает страну, федеральные округа, субъекты Российской Федерации.

Дальнейшая детализация онтологий предполагает представление объектов исследования на все более детальном уровне. На рисунке 4 показана онтология электростанций, являющаяся основой для представления таких объектов исследования в портале знаний.

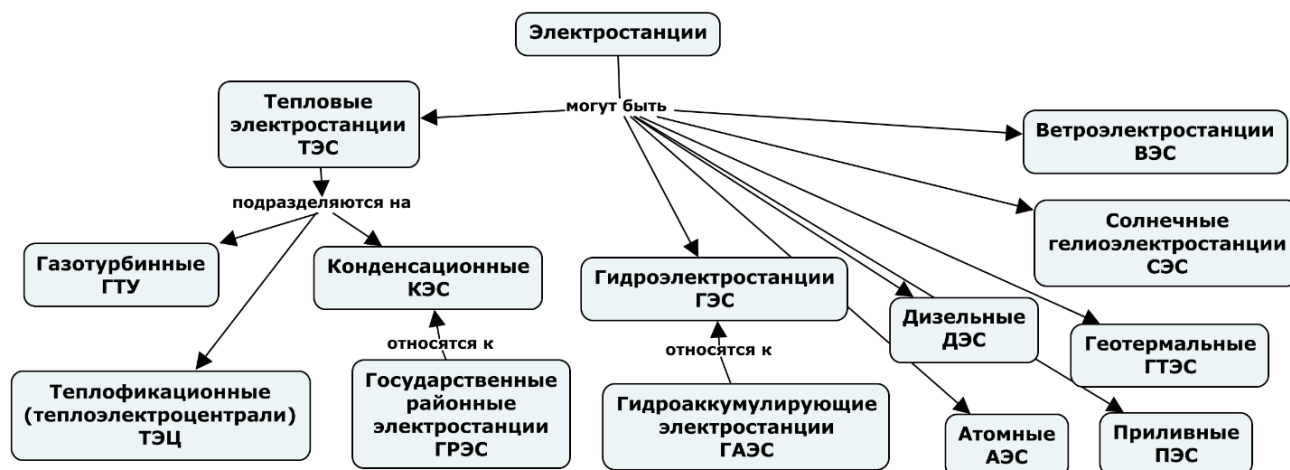


Рис. 4. Онтология электростанций

Примером онтологии более детального уровня является раздел теплоэнергетики, показанный на рисунке 5.

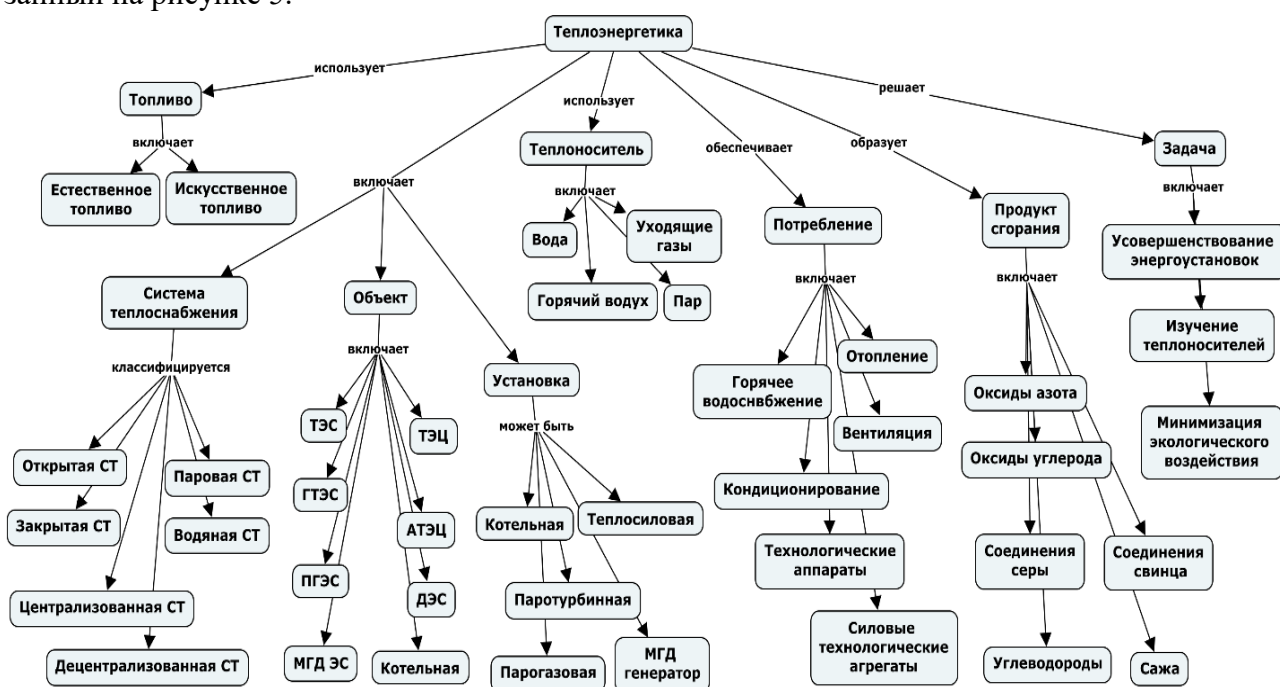


Рис. 5. Онтология теплоэнергетики

4. Информационные объекты портала знаний. Информационные ресурсы портала для представления реальных объектов и связей между ними организованы в виде сети взаимосвязанных Информационных Объектов (ИО), каждый из которых является экземпляром некоторого понятия онтологии портала. На рисунке 6 приведен пример, где представлены экземпляры или информационные объекты понятия «Проект», являющиеся конкретными названиями проектов, выполняемых в институте ИСЭМ СО РАН.

Взаимосвязи между информационными объектами определяются отношениями, заданными между соответствующими понятиями в онтологии. Предполагаются отношения наследования для построения иерархии понятий, отношения включения: «часть-целое», а также множество ассоциативных отношений. Совокупность таких информационных объектов образует контент портала, его информационное содержание. Доступ к знаниям и данным осуществляется путем навигации по дереву понятий онтологии.

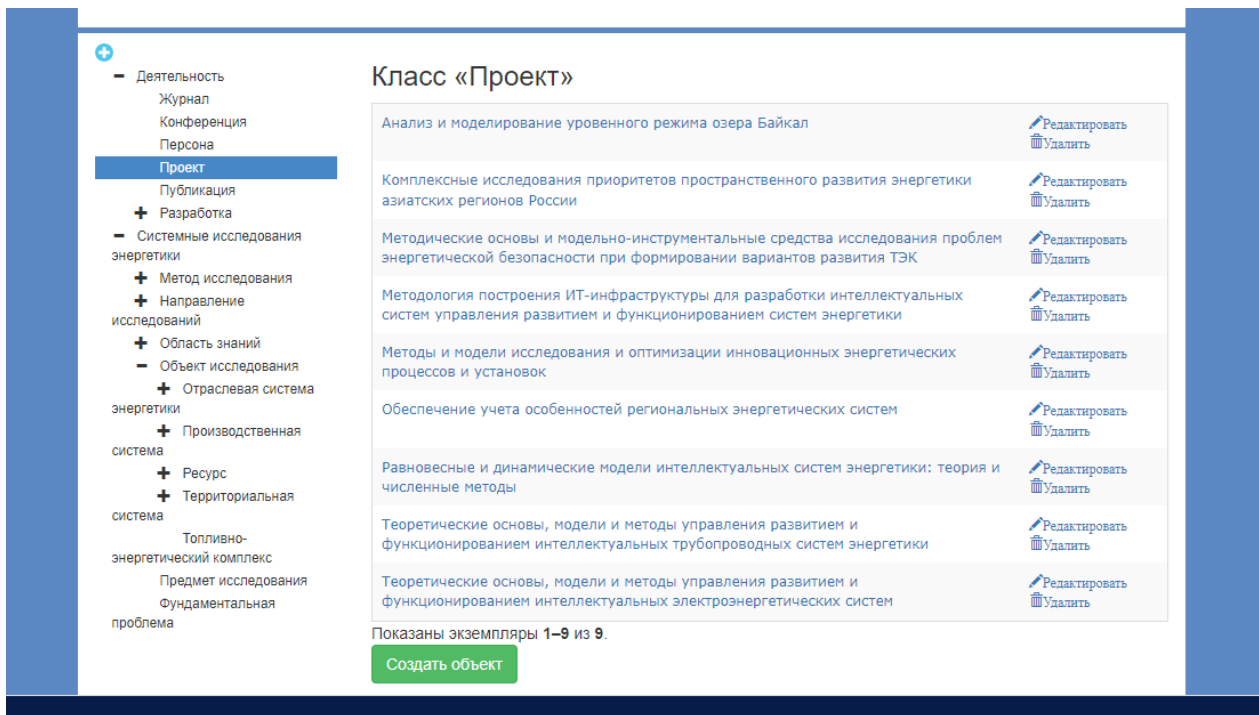


Рис. 6. Пример навигации по portalу

Заключение. Использование современных подходов к представлению знаний в области энергетики обусловлено необходимостью описания, структурирования и интеграции сложной структуры знаний для системных исследований энергетики. Разрабатываемый научный портал знаний предназначен для обеспечения доступности и наглядного представления знаний по конкретной тематике и с этой точки зрения имеет специфическую направленность. Такой портал обеспечивает интеграцию знаний, описанных в терминах онтологии и представленных в виде большого набора фрагментов, относящихся к разным разделам предметной области «Энергетика». Возможности предлагаемой технологии позволяют расширять области описываемых информационных ресурсов и интеграцию знаний, а также оперативно пополнять контент портала знаний в процессе его эксплуатации.

Благодарности. Работа по разработке, интеграции и наполнению онтологий научного портала знаний продолжается в рамках проекта государственного задания ИСЭМ СО РАН «Методология построения ИТ-инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики» (№ FWEU-2021-0007, рег. № AAAA-A21_121012090007) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Список источников

1. Официальный сайт Десятилетия науки и технологий в России. – URL: <https://наука.рф> (дата обращения: 20.10.2023).
2. Научная Россия. Электронное периодическое издание. – URL: <https://scientificrussia.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
3. ПостНаука. – URL: <https://postnauka.org> (дата обращения 20.10.2023).
4. New-Science.ru. Новости науки, технологий и техники. – URL: <https://new-science.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
5. Наука и просвещение. Конференции. Публикация статей. – URL: <https://naukaip.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
6. Энергетика и промышленность России. Информационный портал. – URL: <https://www.eprussia.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
7. Энергетика России. Портал об электроэнергетике. – URL: <https://energoseti.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
8. Energyland.info. Новости энергетики, все инструменты для бизнеса, аналитика, обзоры. – URL: <https://energyland.info> (дата обращения: 20.10.2023).

9. Последние новости энергетики России. Информационный портал энергетика. – URL: <https://novostienergetiki.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
10. E²nergy. Энергетика Евразии и мира. – URL: <https://eenergy.media> (дата обращения: 20.10.2023).
11. ЭнергоНьюс. Новости энергетики. – URL: <http://energo-news.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
12. Министерство энергетики. Министерство энергетики РФ. – URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
13. Российское энергетическое агентство. – URL: <https://rosenergo.gov.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
14. ПАО «РусГидро». – URL: <https://rushydro.ru> (дата обращения: 20.10.2023).
15. Загоруйко Ю.А. Технология создания тематических интеллектуальных интернет-ресурсов, базирующаяся на онтологии / Ю.А. Загоруйко, Г.Б. Загоруйко, О.И. Боровикова. // Программная инженерия, 2016. – № 2. – Том 7. – С. 51-60. – DOI: 10.17587/prin.7.51-60.
16. Загоруйко Ю.А. Технология разработки порталов научных знаний / Ю.А. Загоруйко // Программные продукты и системы, 2009. – № 4. – С. 25-29.
17. Иерархическое моделирование систем энергетики / отв. ред. Н.И. Воропай, В.А. Стенников; Рос. акад. Наук, Сиб. Отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2020. – С. 314. – ISBN 978-5-6043021-9-4 (в пер.). – DOI:10.21782/B978-5-6043021-9-4.
18. Системные исследования проблем энергетики / Л.С. Беляев, Б.Г. Санеев, С.П. Филиппов и др. Под ред. Н.И. Воропая. Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. – 558 с.
19. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2010. – 686 с.
20. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л.В. Массель // Онтология проектирования, 2016. – Т.6. – №2(20). – С. 149-161. – DOI:1018287/2223-9537-2016-6-2-149-161.

Ворожцова Татьяна Николаевна. Кандидат технических наук, ведущий инженер исследователь отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, ORCID: 0000-0002-4022-8937, tnn@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова д. 130.

Пестерев Дмитрий Вячеславович. Инженер-исследователь отдела систем искусственного интеллекта в энергетике, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, SPIN: 4804-0232, ORCID: 0000-0002-8700-9520, pesterev.dmitriy@gmail.com, Россия, Иркутск, Лермонтова д. 130.

UDC 004.82

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.003

Ontologies system of a scientific knowledge portal for systemic energy research

Tatyana N. Vorozhtsova, Dmitrii V. Pesterev

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,

Irkutsk, Russia, tnn@isem.irk.ru

Abstract. The paper discusses issues of structuring knowledge in the field of energy research and proposes a system of ontologies to provide access to knowledge and information using the developed ontological portal of scientific knowledge. The scientific knowledge portal for energy research is being developed on the basis of the technology for constructing scientific knowledge portals developed at the A.P. Ershov Institute of Informatics Systems SB RAS in Novosibirsk. The proposed ontologies system is formed taking into account the systems approach as a general methodology for systems research carried out at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (MESI SB RAS). Examples of ontologies are given that reflect the relationships between areas of research and the complex structure of research objects.

Keywords: knowledge portal, ontology, systems approach, energy, technologies for constructing knowledge portals

Acknowledgements: Work on the development, integration and filling of ontologies of the scientific knowledge portal continues within the framework of the state task project “Methodology for building an IT infrastructure for the development of intelligent systems for managing the development and functioning of energy systems” (No. FWEU-2021-0007) of the Russian Federation fundamental research program for 2021-2030 yy.

References

1. Oficialnyj sajt Desyatiletiya nauki i tekhnologij v Rossii [Official website of the Decade of Science and Technology in Russia], available at: <https://наука.рф> (accessed: 10/20/2023).
2. Nauchnaya Rossiya. Elektronnoye periodicheskoye izdaniye [Scientific Russia. Electronic periodical], available at: <https://scientificrussia.ru> (accessed: 10/20/2023).
3. PostNauka [PostScience], available at: <https://postnauka.org> (accessed: 10/20/2023).
4. New-Science.ru. Novosti nauki, tekhnologij i tekhniki [New-Science.ru. News of science, technology and engineering], available at: <https://new-science.ru> (accessed: 10/20/2023).
5. Nauka i prosveshchenie. Konferencii. Publikaciya statej [Science and education. Conferences. Publication of articles], available at: <https://naukaip.ru> (accessed: 10/20/2023).
6. Energetika i promyshlennost' Rossii. informatsionnyy portal [Energy and industry of Russia. informational portal], available at: <https://www.eprussia.ru> (accessed: 10/20/2023).
7. Energetika Rossii. Portal ob elektroenergetike [Energy of Russia. Portal about the electric power industry], available at: <https://energosei.ru> (accessed: 10/20/2023).
8. Energyland.info. Novosti energetiki, vse instrumenty dlya biznesa, analitika, obzory [Energyland.info. Energy news, all business tools, analytics, reviews], available at: <https://energyland.info> (accessed: 10/20/2023).
9. Poslednie novosti energetiki Rossii. Informacionnyj portal energetika [Latest Russian energy news. Energy Information Portal], available at: <https://novostienergetiki.ru> (accessed: 10/20/2023).
10. E2energy. Energetika Yevrazii i mira [Energy of Eurasia and the world], available at: <https://eenergy.media> (accessed: 10/20/2023).
11. EnergoN'yus. Novosti energetiki [EnergoNews. Energy News], available at: <http://energo-news.ru> (accessed 10/20/2023).
12. Ministerstvo energetiki. Ministerstvo energetiki RF [Ministry of Energy. Ministry of Energy of the Russian Federation], available at: <https://minenergo.gov.ru> (accessed: 10/20/2023).
13. Rossiyskoye energeticheskoye agentstvo [Russian Energy Agency], available at: <https://rosenergo.gov.ru> (accessed: 10/20/2023).
14. PAO "RusGidro" [RusHydro], available at: <https://rushydro.ru> (accessed: 10/20/2023).
15. Zagorulko Yu.A., Zagorulko G.B., Borovikova O.I. Tekhnologiya sozdaniya tematiceskikh intellektual'nykh nauchnykh internet-resursov, bazirujushhajasja na ontologii [Technology for building subject-based intelligent scientific internet resources based on ontology]. Programmnaia inzhenerija [Software Engineering], 2016, no. 2, pp. 51-60, DOI:10.17587/prin.7.51-60.
16. Zagorulko Yu.A. Tehnologija razrabotki portalov nauchnykh znaniy [Technology portal development of scientific knowledge]. Programmnye produkty i sistemy [Software & Systems], 2009, no.4, pp. 25-29.
17. Voropai N.I., Stennikov V.A., eds. Ierarkhicheskoe modelirovanie sistem energetiki [Hierarchical modeling of energy systems]. Novosibirsk, Geo Publ., 2020. 314 p., ISBN 978-5-6043021-9-4, DOI:10.21782/B978-5-6043021-9-4.
18. Belyayev L.S. Sistemnye issledovaniya problem energetiki [Systematic studies of energy problems]. Ed. by N.I. Voropay, Novosibirsk, Nauka, Sibirskaya firma RAN [Science. Siberian firm RAS], 2000, 558 p.
19. Sistemnye issledovaniya v jenergetike: retrospektiva nauchnykh napravlenij SEI-ISEM [Systems research in energy: a retrospective of the scientific directions of SEI-ISEM]. Ed. N.I. Voropay. Novosibirsk: Nauka [Science], 2010, 686 p.
20. Massel L.V. Fraktal'nyj podhod k strukturirovaniyu znaniy i primery ego primeneniya [Fractal approach to knowledge structuring and examples of its application]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of designing]. 2016, vol.6, № 2(20), pp. 149-161, DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.

Vorozhtsova Tatiana Nikolaevna. Ph.D, leading research engineer of the department of artificial intelligence systems in energy, Melentiev energy systems institute SB RAS, ORCID: 0000-0002-4022-8937, tnn@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, Lermontova, 130.

Pesterev Dmitrii Vyacheslavovich. Research engineer of the department of artificial intelligence systems in energy, Melentiev energy systems institute SB RAS, SPIN: 4804-0232, ORCID: 0000-0002-8700-9520, pesterev.dmitriy@gmail.com, Russia, Irkutsk, Lermontova, 130.

Статья поступила в редакцию 17.11.2023; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 11/17/2023; approved after reviewing 02/16/2024; accepted for publication 03/11/2024.

УДК 504.3.054: (004.822+504.05+519.876.2)

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.004

Онтологическое моделирование предметной области «Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха»

Асламова Вера Сергеевна, Плеханова Ольга Сергеевна

Иркутский государственный университет путей сообщения,

Россия, Иркутск, *aslamovav@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлены онтологии предметной области «Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха», описывающие классы источников загрязнения, причины и виды загрязняющих веществ, показатели качества атмосферного воздуха с указанием влияющих на него факторов, и методы вычисления показателей, которые будут применены в проектируемой информационной системе. На основе онтологий будет сформирована база данных информационной системы. Для оценки уровня загрязнения атмосферы предложена модель агрегатного комплексного показателя, учитывающая предельные допустимые концентрации и число их превышения фактическими среднегодовыми концентрациями загрязнителей, их класс опасности и годовые массы выбросов, расстояние от источника выброса.

Ключевые слова: атмосферный воздух, загрязняющее вещество, онтологическая модель, агрегатный комплексный показатель, уровень загрязнения

Цитирование: Асламова В.С. Онтологическое моделирование предметной области «Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха» / В.С. Асламова, О.С. Плеханова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 40-49. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.004.

Введение. Структурирование знаний на основе онтологий и когнитивных карт прочно вошло в науку, промышленность, энергетику, для анализа: взаимосвязей социо-экологических и энергетических систем развития [1] и оценки их устойчивости [2], последствий чрезвычайной ситуации в энергетике [3], антропогенного влияния энергетических объектов на качество жизни населения [4] и природную среду [5], проектирования систем поддержки управления техносферной [6] и пожарной [7] безопасностью, удобства использования программного обеспечения [8], системы защиты информации [9] и проектирования баз данных [10], в менеджменте. В учебном процессе онтологии применяются для повышения эффективности преподавания [11, 12], передачи, усвоения и контроля знаний обучающихся [13-15], а также при расчёте рейтинга преподавателей [16].

Онтологии – наглядный простой инструмент для понимания и осмысления специфичности предметной области (ПрО), стандарт в сфере формирования баз знаний (БЗ) [12], эффективный инструмент для классификации и приобретения знаний [17, 18], структурирования знаний для проведения исследований [19]. Под онтологией понимают спецификацию или формальное представление ПрО, которые включают словарь указателей на концепты (термины) ПрО, логические выражения, описывающие назначение концептов, их связь и соотношение [11].

Актуальность разработки онтологий ПрО «Антропогенное загрязнение атмосферного воздуха (АВ)» аргументируется также неудовлетворительным качеством АВ городов Иркутской области [20].

1. Онтологии предметной области. Система «Антропогенное загрязнение АВ» является слабо структурированной и трудно формализуемой. Для выявления, описания и структурирования взаимосвязей между ее элементами часто используют качественное онтологическое моделирование знаний [1-7], а также агрегатное моделирование, оценивающее, как система, ее классы, подклассы соответствуют своей цели, как система выполняет свои функции, как приспособлена она к решению поставленных задач, каким обобщённым показателем можно описать функционирование системы [21].

На рисунке 1 представлена онтология ПрО загрязнения атмосферы.

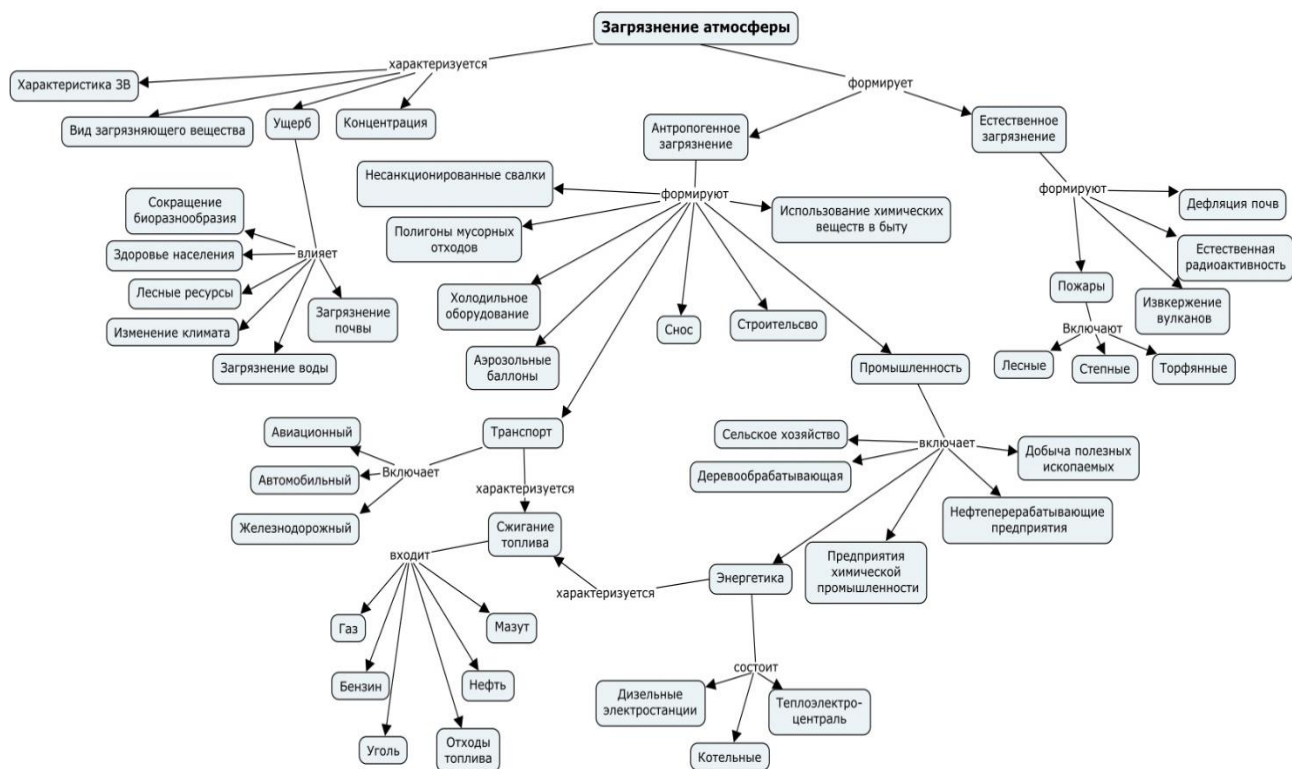


Рис. 1. Онтология ПрО загрязнения атмосферы

Согласно РД 52.04.667-2005, под **загрязнением атмосферы** понимают изменение ее состава из-за наличия в ней загрязняющих веществ (ЗВ). Поскольку в статье рассматривается антропогенное загрязнение АВ, то источники естественного загрязнения АВ далее не рассматриваются. Загрязнение АВ формирует антропогенный поражающий фактор (АПФ).

АПФ формируется в процессе человеческой деятельности и характеризуется видом загрязняющих веществ (ЗВ), их физическими, химическими, биологическими свойствами и концентрациями, которые наносят ущерб населению и окружающей природной среде (ОПС), включая АВ. ОПС – преобразованная человеком биосфера, которая служит средством, местом и условием обитания человека и всех живых организмов.

Ущерб от загрязнения АВ приводит к сокращению биоразнообразия ОПС, жизни населения, нанося вред его здоровью, вызывает загрязнение водных, лесных и почвенных ресурсов, изменение климата. Источниками антропогенного загрязнения АВ служат промышленные выбросы заводов алюминия и ферросплавов, лесопромышленных комплексов, целлюлозно-бумажной промышленности, ТЭЦ, котельных, транспорта, захоронение отходов, сельское хозяйство и использование в быту химических веществ.

Онтология причин и видов ЗВ источников антропогенного загрязнения АВ представлена на рисунке 2.

Как видно из рис. 2, причины антропогенного загрязнения АВ вызваны неполным сжиганием топлива транспортными средствами и электроэнергетическими комплексами, промышленными выбросами токсичных химических веществ, тяжелых металлов, летучих органических соединений (ЛОС), бенз(а)пирену (БП), относящемуся к полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ), взвешенных частиц при строительстве и сносе. Полигоны, свалки твердых коммунальных и бытовых отходов загрязняют АВ за счет выделения сернистого и углекислого газов, метана, всевозможных диоксидов.

Как правило, количественные выбросы автономных источников теплоснабжения не включаются в сводные отчеты и государственные доклады о состоянии АВ, хотя они оказывают существенное влияние на уровень загрязнения АВ населённых пунктов [22, 23].

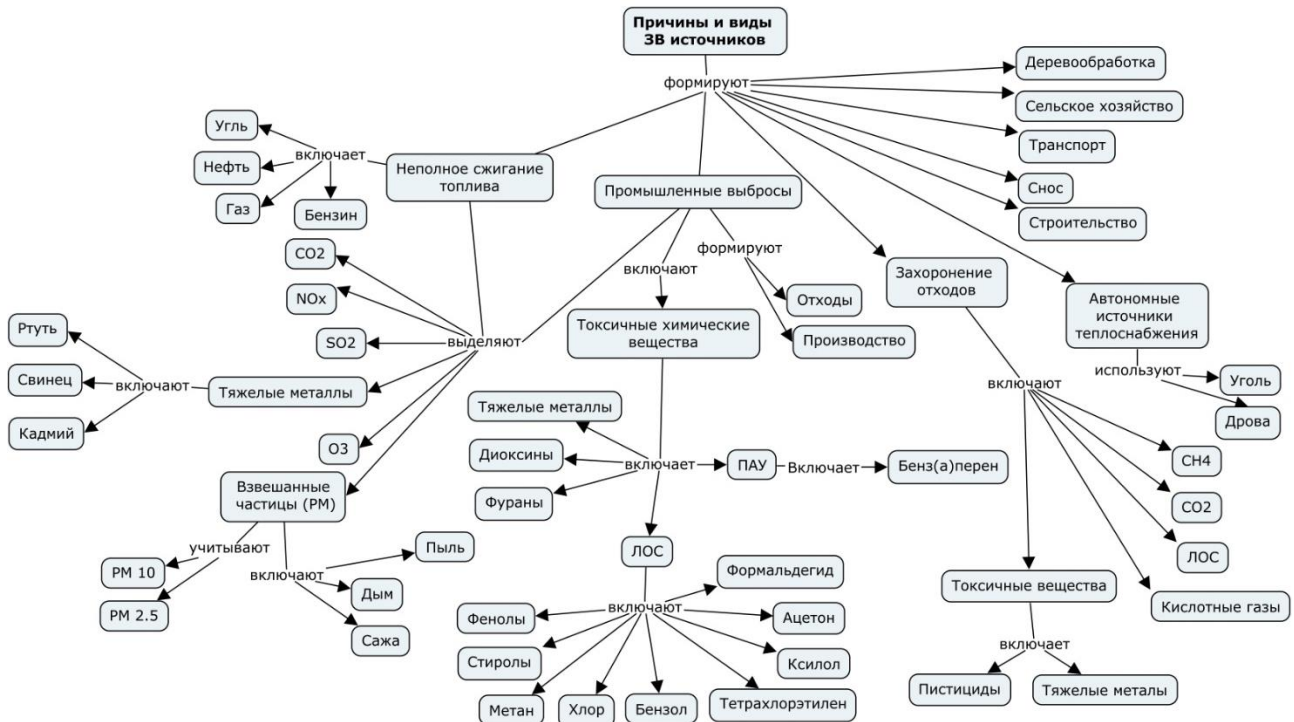


Рис. 2. Онтология причин и видов ЗВ

Показатели качества атмосферного воздуха. На рисунке 3 представлены показатели, используемые для оценки качества АВ. Под качеством АВ понимается совокупность химических, физических, биологических свойств АВ, которая отражает степень соответствия АВ гигиеническим и экологическим нормативам качества. Согласно СанПиН 1.2.3685-21 [24], для оценки качества АВ используется гигиенический норматив – предельно допустимые концентрации (ПДК) ЗВ. Изменены значения ПДКсс (среднесуточные ПДК), установлены ПДКсг (среднегодовые ПДК) для некоторых ЗВ. Под ПДК понимают максимальную концентрацию ЗВ, которая не производит на человека, его потомство косвенного или прямого вредного воздействия, не снижает его работоспособность, не ухудшает санитарно-бытовых условий жизни и его самочувствие.

Степень загрязнения АВ является качественной характеристикой уровня загрязнения. Ее оценивают посредством сравнения фактических среднегодовых концентраций с ПДКсг. Если последние отсутствуют, то сравнивают фактические среднесуточные с ПДКсс, либо максимальные из разовых концентраций с ПДКмр (ПДК максимальные разовые).

Для оценки качества АВ согласно РД 52.04.667-2005 [25] используются экологические показатели:

- ИЗА (комплексный индекс загрязнения АВ), величина которого вычисляется по значениям среднегодовых концентраций ЗВ, деленных на ПДК и приведенных к вредности диоксида серы. Он характеризует уровень длительного, хронического загрязнения АВ;
- СИ (стандартный индекс), равный отношению максимальной измеренной разовой концентрации ЗВ к ПДК; определяется из данных наблюдений в пункте за одним ЗВ, или на всех пунктах рассматриваемой территории за всеми ЗВ за месяц или за год.;
- НП (наибольшая повторяемость), в %, превышения ПДК любым ЗВ в городе.

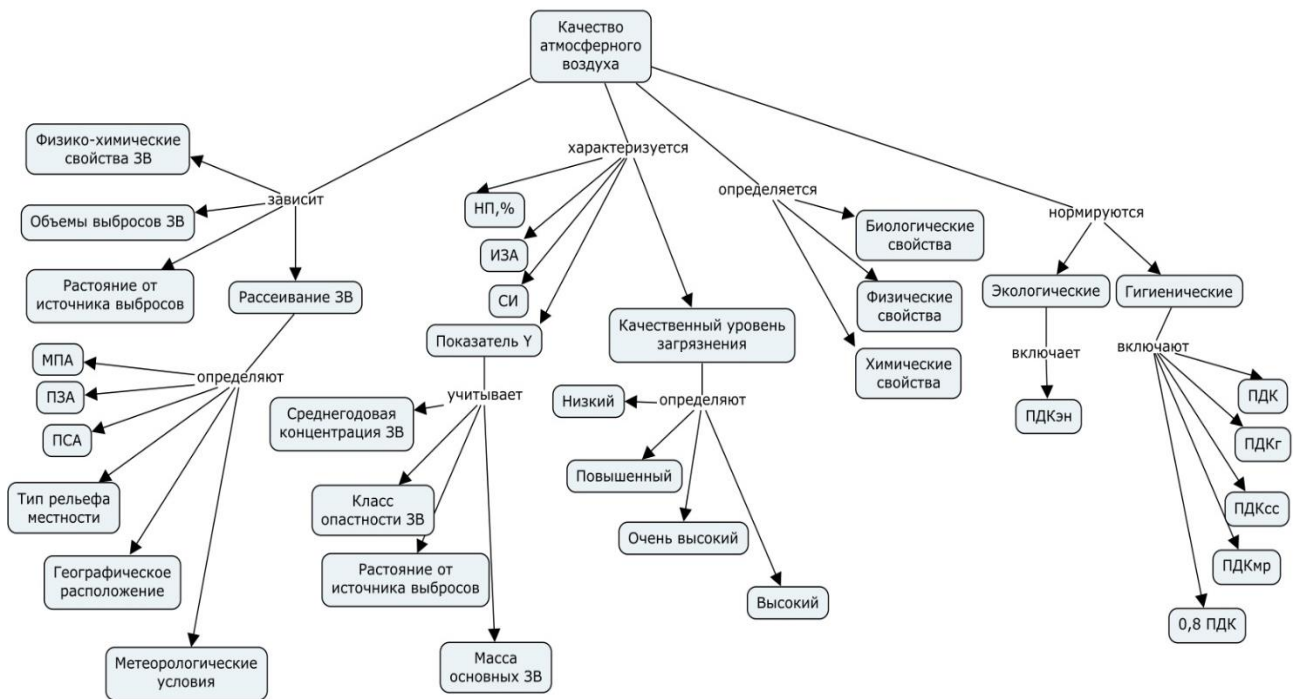


Рис. 3. Онтология показателей качества АВ

Экологический норматив качества АВ – критерий, отражающий предельно допустимое максимальное содержание ЗВ, при котором отсутствует вредное воздействие на окружающую среду.

Качество АВ зависит от расстояния до источника выброса, от объема и высоты выброса ЗВ источника, рассеивающей способность атмосферы, определяемой метеорологическими условиями рассеивания и переноса ЗВ, а также вымыванием ЗВ осадками.

При холодных выбросах из низких дымовых и вентиляционных труб концентрация ЗВ вблизи источника мала, она повышается на подветренной стороне, достигая максимума на расстоянии от трубы, величина которого зависит от скорости ветра. При выбросах и горячих выбросах из высоких труб металлургии, химических производств, электростанций распределение ЗВ в АВ зависит как от скорости и направления ветра, так и от состояния вертикальной устойчивости атмосферы. В случае инверсии, когда температура АВ возрастает с увеличением высоты, то рассеивание ЗВ снижается. При длительных инверсиях и неорганизованных низких выбросах, например, автотранспорта, котельных и т.п.) концентрации ЗВ могут значительно возрастать.

При конвекции, когда температура с высотой уменьшается, в летние месяцы в дневное время формируются условия для турбулентного интенсивного обмена. Это вызывает возникновение в приземном слое АВ значительных колебаний концентраций ЗВ, которые поступают из высотных труб.

При слабом ветре 1-2 м/с концентрации ЗВ у земли снижаются за счет подъема факела и переноса ЗВ вверх. При сильном ветре 5-7 м/с вертикальный подъем ЗВ уменьшается, но возрастает скорость переноса ЗВ в горизонтальном направлении.

При туманах концентрации ЗВ могут весомо возрастать за счет увеличенной влажности воздуха и приземной инверсии, вызывая зимние смоги.

В городских условиях на рассеивание ЗВ значительно влияют: планировка улиц, их направление и ширина, высота зданий. В крупных городах Сибири, особенно в зимнее время, в случае длительных прояснений погоды часто формируется так называемый "остров тепла" со своей циркуляционной структурой и образованием устойчивого потока АВ к центру этого острова, где сосредотачиваются значительные концентрации ЗВ.

Топография города оказывает существенное влияние на рассеивание ЗВ. На пересеченной местности возникают восходящие потоки АВ на наветренных склонах, в которых приземные концентрации ЗВ уменьшаются. В нисходящих потоках АВ на подветренных склонах приземные концентрации ЗВ увеличиваются. Летом над реками, озерами образуются нисходящие потоки АВ, в прибрежных зонах – восходящие потоки АВ. При нисходящих потоках, при восходящих - уменьшаются. В котловинах АВ застаивается, что способствует накоплению ЗВ над подстилающей поверхностью. На ровной местности максимумы приземной концентрации ЗВ, как правило, меньше, чем на холмистой.

Климатические условия определяют ПЗА (потенциал загрязнения атмосферы). По ГОСТ 17.2.1.04 ПЗА – это сочетание метеорологических условий, которое обуславливает уровень вероятного загрязнения АВ от действующих источников выбросов. Значение ПЗА зависит от следующих метеорологических параметров: повторяемость приземных инверсий, в %, их мощность, в км и интенсивность, в °С; повторяемость застоев АВ, в % и скорости ветра 0-1 м/с; продолжительность туманов, в часах). Следует отметить, что для Восточной Сибири характерны самые неблагоприятные метеорологические условия для рассеивания ЗВ [25]. Чем больше значение ПЗА, тем способность атмосферы к самоочищению меньше [26].

В [26] предложен индекс – потенциал самоочищения атмосферы (ПСА), учитывающий зависимые (возможность появления туманов при слабых ветрах) и независимые (возможность совмещения событий: существенный ветер и осадки). Результаты выполненных расчетов за 52-летний период подтвердили, что Иркутск находится в зоне накопления ЗВ в АВ (85,1% случаев).

В [27] предложен другой индекс, МПА (метеорологический потенциал атмосферы), учитывающий факторы, которые способствуют как самоочищению АВ, так и его загрязнению. МПА учитывает повторяемости: как небольших скоростей ветра от 0 до 1 м/с, так и скоростей ветра больше 6 м/с; суточных осадков, превышающих 0,5 мм; дней с туманами. При значении МПА < 1 преобладают процессы, которые благоприятствуют очищению АВ, а при МПА > 1 преобладают процессы, которые способствуют накоплению ЗВ в АВ.

Поскольку фактическая концентрация ЗВ снижается при увеличении расстояния от источника выброса, для оценки уровня загрязнения АВ предложена модель агрегатного комплексного показателя Y_x , 1/км [20], учитывающая ПДК, класс опасности ЗВ, число превышения ПДК фактической среднегодовой концентрации l -го ЗВ; Z_i – эмпирический коэффициент, 1/тыс.т, обеспечивающий соответствие вычисляемого показателя Y_x наблюдаемым уровням загрязнения АВ; M_i – годовая масса ЗВ и расстояние от источника выброса:

$$Y_x = \left(\sum_{l=1}^d K_l N_l + \sum_{i=1}^s Z_i M_i \right) / (R + 5x),$$

где $d = 35$; l, i – порядковые номера анализируемого ЗВ; $s = 4$ – число основных ЗВ (СО, NO₂, SO₂, взвешенные вещества); K_l – эмпирический коэффициент, который учитывает класс опасности l -го ЗВ (для I класса опасности $K_1 = 16,3$, для II – $K_2 = 7,43$, для III – $K_3 = 3,43$, для IV – $K_4 = 1,58$); N_l демонстрирует, во сколько раз среднегодовое значение концентрации l -го ЗВ превосходит ПДК; Z_i – эмпирический коэффициент, 1/тыс.т, обеспечивающий соответствие вычисляемого показателя Y_1 наблюдаемым уровням загрязнения АВ; M_i – годовая масса i -го ЗВ, тыс.т; R – условный радиус города, км, определяемый по формуле

$$R = \sqrt{G / \pi},$$

где G – площадь исследуемого города; $x = 1, 2, 3$ – номер уровня, для которого рассчитывается Y_x на расстоянии $5x$, км от границы города. Эмпирические коэффициенты Z_i и K_l подбирались

в вычислительном эксперименте методом перебора таким образом, чтобы рассчитанные данные соответствовали оценкам загрязнения АВ Иркутского УГМС, которые представлены в годовом отчете. Уровень загрязнения АВ служит качественной характеристикой загрязнения.

Величину Y_x можно применять для оценки уровня загрязнения АВ в 0, 5, 10 и 15 км от границы города согласно табл. 1 [20].

Таблица 1. Соответствие значений Y_x индексу ИЗА

Уровень загрязнения АВ	Значения ИЗА по РД 52.04.186-89	Значения Y_x
низкий уровень загрязнения	0-4	0-4
повышенный уровень загрязнения	5-7	4,1-8
высокий уровень загрязнения	7-14	8,1-18
очень высокий уровень загрязнения	>14	> 18

На рисунке 4 представлена онтология методов, которые будут применяться в проектируемой информационной системе (ИС).

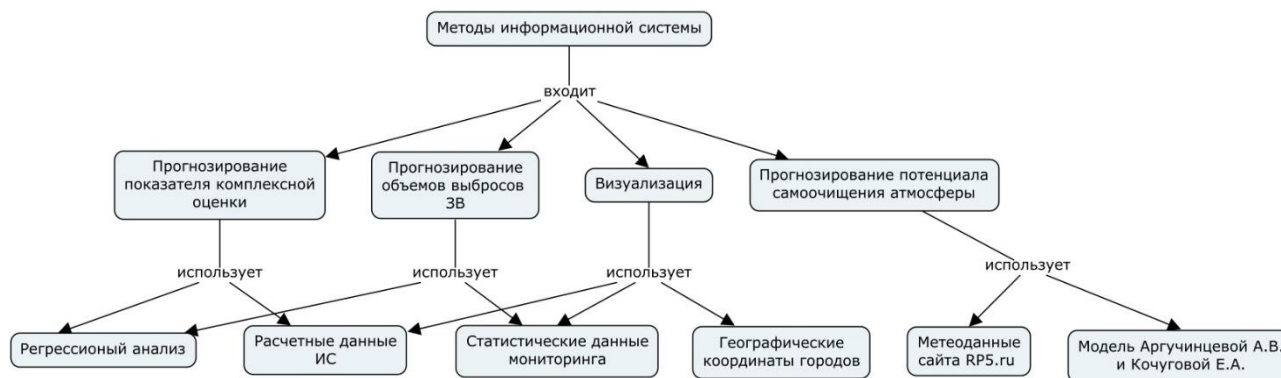


Рис. 4. Онтология методов вычисления показателей оценки качества АВ, которые будут применяться в проектируемой ИС

Результаты мониторинга загрязнения АВ городов ИР аппроксимированы регрессионными моделями, по которым в ИС будут выполнены прогнозы: выбросов основных ЗВ, значений комплексного показателя Y_x , трехмерной геопространственной визуализации загрязнения АВ ИР, значений ПСА. На основании анализа полученных результатов будут определяться тенденции изменения уровня загрязнения АВ и вырабатываться рекомендации по его снижению.

Заключение. В работе описана группа онтологий, связанных с антропогенным загрязнением АВ промышленными предприятиями, энергетикой, транспортом и т.д. Онтологические модели позволили стандартизировать терминологию и знания о ПрО и будут положены в основу базы данных проектируемой ИС. Рассмотрены показатели, используемые для оценки качества АВ, и методы вычисления показателей качества АВ, которые будут применяться в проектируемой ИС, построена онтология этих методов.

Список источников

1. Ворожцова Т.Н. Онтологический анализ взаимосвязей энергетических и социоэкологических систем / Т.Н. Ворожцова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2022. – № 2(26). – С. 127-138. – DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.012.
2. Ворожцова Т.Н. Семантическое моделирование в исследованиях устойчивости энергетических и социоэкологических систем / Т.Н. Ворожцова, Д.В. Пестерев, В.Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 4 (24). – С. 31-43. – DOI:10.38028/ESI.2021.24.4.003.
3. Массель Л.В. Применение онтологического, когнитивного и событийного моделирования для анализа развития и последствий чрезвычайных ситуаций в энергетике / Л.В. Массель // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2010. – № 2. – С. 34-43.

4. Ворожцова Т.Н. Компоненты онтологического пространства знаний для оценки влияния энергетики на качество жизни населения / Т.Н. Ворожцова, Е.П. Майсюк, И.Ю. Иванова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – № 3 (23). – С. 17-27. – DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.002.
5. Ворожцова Т.Н. Система онтологий для исследования антропогенного влияния объектов энергетики на окружающую среду / Т.Н. Ворожцова, Е.П. Майсюк, И.Ю. Иванова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2020. – № 1 (17). – С. 89-104. – DOI:10.38028/ESI.2020.17.1.007.
6. Калач А.В. Проектирование систем поддержки управления природно-техногенной безопасностью территорий с использованием онтологий / А.В. Калач, В.В. Ничепорчук, Е.В. Калач, И.А. Кубасов // Вестник ВГУ. Системный анализ и информационные технологии, 2021. – № 3. – С. 95 - 105. – DOI:10.17308/sait.2021.3/3739.
7. Шульга Т.Э. Онтологическая модель предметной области «Системы противопожарной безопасности» / Т.Э. Шульга, Ю.В. Никулина // Известия СПбГТИ(ТУ), 2019. – № 51(77). – С. 109-114.
8. Сытник А.А. Онтология предметной области «Удобство использования программного обеспечения» / А.А. Сытник, Т.Э. Шульга, Н.А. Данилов // Труды ИСП РАН, 2018. – Т. 30. – Вып. 2г. – С. 195-214. – DOI:10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-10.
9. Наседкин П.Н. Оценка состояния комплексной системы защиты информации на основе онтологий / П.Н. Наседкин, Л.В. Аршинский // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 1(29). – С. 158-177. – DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.014.
10. Ворожцова Т.Н. Онтологический подход к проектированию базы данных для оценки влияния энергетики на окружающую среду / Т.Н. Ворожцова, Н.Н. Макагонова, Л.В. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2019. – № 3 (15). – С. 31-41. – DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03.
11. Гаврилова Т.А. Понятийные структуры знаний и когнитивный стиль / Т.А. Гаврилова, И.А. Лещева // Психология. Высшая школа экономики, 2016. – Т. 13. – № 1. – С. 154-176.
12. Гаврилова Т.А. Визуально-аналитическое мышление и интеллект-карты в онтологическом инжиниринге / Т.А. Гаврилова, Э.В. Страхович // Онтология проектирования, 2020. – Т. 10. – №1(35). – С.87-99. – DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
13. Гаврилова Т.А. Об использовании визуальных концептуальных моделей в преподавании / Т.А. Гаврилова, И.А. Лещева, Э.В. Страхович // Вестник Санкт-Петербургского университета. Менеджмент, 2011. – № 4. – С. 124-150.
14. Темникова Е.А. Автоматизированная система мониторинга учебного процесса и онтология предметной области для учебного центра / Е.А. Темникова, В.С. Асламова // Вопросы естествознания, 2014. – № 1 (2). – С. 42-48.
15. Темникова Е.А. Онтологическое моделирование предметной области учреждения дополнительного профессионального образования / Е.А. Темникова, В.С. Асламова, О.Г. Берестнева // Онтология проектирования, 2015. – № 4 (18). – С. 369-385.
16. Сосинская С.С. Разработка системы для расчёта рейтинга преподавателей на основе квалиметрического подхода и онтологии / С.С. Сосинская, Р.С. Дорофеев, А.С. Дорофеев // Онтология проектирования, 2019. – Т.9. – №2(32). – С.214-224. – DOI:10.18287/2223-9537-2019-9-2-214-224.
17. Смирнов С.В. Онтологии как смысловые модели / С.В. Смирнов // Онтология проектирования, 2013. – № 2. – С. 12-19.
18. Kudryavtsev D., Gavrilova T. Diagrammatic knowledge modeling for managers – Ontology-based Approach. Proceedings of the International Conference on knowledge engineering and ontology development (KEOD-2011), 2011, pp. 386-389, ISBN: 978-989-8425-80-5, available at: <https://www.scitepress.org/papers/2011/36401/36401.pdf>, DOI:10.5220/0003640103860389 (accessed: 11/14/2023).
19. Массель Л.В. Онтологические аспекты исследования взаимовлияния энергетики и геоэкологии / Л.В. Массель, И.Ю. Иванова, Т.Н. Ворожцова, и др. // Онтология проектирования, 2018. – Т.8. – № 4(30). – С. 550-561. – DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561.
20. Асламова В.С. Регрессионные модели оценки комплексного техногенного загрязнения атмосферы городов Иркутского региона / В.С. Асламова, О.С. Плеханова, А.А. Асламов // Математические методы в технологиях и технике, 2023. – № 8. – С. 62-65.
21. Аршинский Л.В. Необходимость и достаточность при агрегировании на основе неубывающих функций / Л.В. Аршинский, В.Л. Аршинский // Онтология проектирования, 2022. – Т.12. – №1(43) . – С. 93-105. – DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-1-93-105.
22. Волкодаева М.В. Учёт выбросов загрязняющих веществ от автономных источников теплоснабжения индивидуальных жилых домов при проведении сводных расчётов загрязнения атмосферного воздуха для

- населённых пунктов / М.В. Волкодаева, А.О. Карелин, А.Ю. Ломтев и др. // Гигиена и санитария, 2023. – 102(2). – С. 141-147.
23. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». – Иркутск: ООО «Максима», 2023 г. – 285 с.: ил.
24. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2 (ред. от 30.12.2022) «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека среды обитания»». – URL: <https://base.garant.ru/400274954/> (дата обращения: 02.11.2023).
25. РД 52.04.667-2005. Документы о состоянии загрязнения атмосферы в городах для информирования государственных органов, общественности и населения. Общие требования к разработке, построению, изложению и содержанию. Дата введения 2006.02.01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118> (дата обращения: 08.10.2023).
26. Аргучинцева А.В. Потенциал самоочищения атмосферы / А.В. Аргучинцева, Е.А. Кочугова // Известия Иркутского государственного университета. Наука о Земле, 2019. – Т. 27. – С. 3-15.
27. Селегей Т.С. Потенциал рассеивающей способности атмосферы / Т.С. Селегей, И.П. Юрченко // География и природные ресурсы, 1990. – № 2. – С. 132-137.

Асламова Вера Сергеевна. Профессор, доктор технических наук, профессор кафедры Техносферная безопасность Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), AuthorID: 683194, SPIN: 3063-0626, ORCID:0000-0003-3306-0651, aslamovav@yandex.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

Плекханова Ольга Сергеевна. Соискатель, ассистент кафедры Информационные системы и защита информации Иркутского государственного университета путей сообщения (ИрГУПС), AuthorID: 641329, SPIN: 2708-5758, ORCID:0000-0001-6297-8870, plekhanova_os@bk.ru, 664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, д. 15.

UDC 504.3.054: (004.822+504.05+519.876.2)

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.004

Ontological modeling of the subject area “Anthropogenic air pollution”

Vera S. Aslamova, Olga S. Plekhanova

Irkutsk State Transport University, Russia, Irkutsk, aslamovav@yandex.ru

Abstract. The article presents ontologies of the subject area “Anthropogenic air pollution”, describing classes of pollution sources, causes and types of pollutants, indicators of atmospheric air quality with an indication of the factors influencing it and methods of the designed information system. Based on ontologies, an information system database will be formed. To assess the level of atmospheric pollution, a model of an aggregate complex indicator is proposed, taking into account the maximum permissible concentrations and the number of times they exceed the actual average annual concentrations of pollutants, their hazard class and annual emission masses, and the distance from the emission source.

Keywords: atmospheric air, pollutant, ontological model, aggregate complex indicator, pollution level

References

1. Vorozhtsova T.N. Ontologicheskii analiz vzaimosvyazey energeticheskikh i sotsioekologicheskikh system [Ontological analysis of the relationships between energy and socio-ecological systems]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2022, no. 2(26), pp. 127-138, DOI:10.38028/ESI.2022.26.2.012.
2. Vorozhtsova T.N., Pesterev D.V., Kuzmin V.R. Semanticheskoye modelirovaniye v issledovaniyakh ustoychivosti energeticheskikh i sotsio-ekologicheskikh system [Semantic modeling in sustainability studies of energy and socio-ecological systems]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 4 (24), pp. 31-43, DOI:10.38028/ESI.2021.24.4.003.
3. Massel' L.V. Primeneniye ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytiynogo modelirovaniya dlya analiza razvitiya i posledstviy chrezvychaynykh situatsiy v energetike [Application of ontological, cognitive and event modeling to analyze the development and consequences of emergency situations in the energy sector]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy* [Problems of safety and emergency situations], 2010, no. 2, pp. 34-43.

4. Vorozhtsova T.N., Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu. Komponenty ontologicheskogo prostranstva znaniy dlya otsenki vliyaniya energetiki na kachestvo zhizni naseleniya [Components of the ontological knowledge space for assessing the impact of energy on the quality of life of the population]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 3 (23), pp. 17-27. DOI:10.38028/ESI.2021.23.3.002.
5. Vorozhtsova T.N., Maysyuk E.P., Ivanova I.Yu. Sistema ontologiy dlya issledovaniya antropogennogo vliyaniya ob"yektov energetiki na okruzhayushchuyu sredu [Ontology system for studying the anthropogenic impact of energy facilities on the environment]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2020, no. 1(17), pp. 89-104. DOI:10.38028/ESI.2020.17.1.007.
6. Kalach A.V., Nicheporchuk V.V., Kalach Ye.V., Kubasov I.A. Proyektirovaniye sistem podderzhki upravleniya prirodno-tekhnogennoy bezopasnost'yu territoriy s ispol'zovaniyem ontologiy [Design of support systems for managing natural and man-made safety of territories using ontologies]. *Vestnik VGU. Sistemnyy analiz i informatsionnye tekhnologii* [VSU Bulletin. System analysis and information technology], 2021, no. 3, pp. 95- 105, DOI: 10.17308/sait.2021.3/3739.
7. Shul'ga T.Je., Nikulina Ju.V. Ontologicheskaja model' predmetnoj oblasti "Sistemy protivopozharnoj bezopasnosti" [Ontological model of the subject area "Fire safety systems"]. *Izvestiya SPbGTI(TU)* [News of SPbGTI (TU)], 2019, no. 51(77), pp. 109-114.
8. Sytnik A.A., Shul'ga T.Je., Danilov N.A. Ontologija predmetnoj oblasti "Udobstvo ispol'zovaniya programmogo obespechenija" [Ontology of the subject area "Ease of use of software"]. *Trudy ISP RAN* [Proceedings of ISP RAS], 2018, vol. 30, issue. 2, pp. 195-214, DOI:10.15514/ISPRAS-2018-30(2)-10.
9. Nasedkin P.N., Arshinskij L.V. Ocenka sostojaniya kompleksnoj sistemy zashhity informacii na osnove ontologij [Assessment of the state of an integrated information security system based on ontologies] *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 1(29), pp. 158-177, DOI:10.38028/ESI.2023.29.1.014.
10. Vorozhcova T.N., Makagonova N.N., Massel' L.V. Ontologicheskij podhod k proektirovaniyu bazy dannyh dlja ocenki vlijaniya jenergetiki na okruzhajushhuyu sredu [Ontological approach to database design for assessing the impact of energy on the environment]. *Informacionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2019, no. 3 (15). pp. 31-41, DOI: 10.25729/2413-0133-2019-3-03.
11. Gavrilova T.A., Leshheva I.A. Ponyatiynnye struktury znaniy i kognitivnyy stil' [Conceptual structures of knowledge and cognitive style]. *Psihologija. Vyshej shkoly jekonomiki* [Psychology. Higher school of economics], 2016, v. 13, no. 1, pp. 154-176.
12. Gavrilova T.A., Strahovich Je.V. Vizual'no-analiticheskoye myshleniye i intellekt-karty v ontologicheskome inzhiniringe [Visual-analytical thinking and mind maps in ontological engineering]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Design ontology], 2020, v. 10, no. 1(35), pp.87-99, DOI:10.18287/2223-9537-2020-10-1-87-99.
13. Gavrilova T.A., Leshheva I.A., Strahovich Je.V. Ob ispol'zovanii vizual'nykh kontseptual'nykh modeley v prepodavanii [On the use of visual conceptual models in teaching]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Menedzhment* [Bulletin of St. Petersburg University. Management], 2011, no. 4, 124-150.
14. Temnikova E.A., Aslamova V.S. Avtomatizirovannaja sistema monitoringa uchebnogo processa i ontologija predmetnoj oblasti dlja uchebnogo centra [Automated system for monitoring the educational process and ontology of the subject area for the educational center]. *Voprosy yestestvoznaniya* [Questions of natural science], 2014, no. 1 (2), pp. 42-48.
15. Temnikova Ye.A., Aslamova V.S., Berestneva O.G. Ontologicheskoye modelirovaniye predmetnoy oblasti uchrezhdeniya dopolnitel'nogo professional'nogo obrazovaniya [Ontological modeling of the subject area of an institution of additional professional education]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Ontology of design], 2015, no. 4 (18), pp. 369-385.
16. Sosinskaya S.S., Dorofeyev R.S., Dorofeyev A.S. Razrabotka sistemy dlya raschota reytinga prepodavateley na osnove kvalimetriceskogo podkhoda i ontologii [Development of a system for calculating teacher ratings based on the qualimetric approach and ontology]. *Ontologiya proyektirovaniya* [Design ontology], 2019, v. 9, no. 2(32), pp.214-224, DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-214-224.
17. Smirnov S.V. Ontologii kak smyslovyye modeli [Ontologies as semantic models]. *Ontologija proektirovaniya* [Design Ontology], 2013, no. 2, pp.12-19.
18. Kudryavtsev D., Gavrilova T. Diagrammatic knowledge modeling for managers – Ontology-based Approach. *Proceedings of the International Conference on knowledge engineering and ontology development (KEOD-2011)*, 2011, pp. 386-389, ISBN: 978-989-8425-80-5, available at: <https://www.scitepress.org/papers/2011/36401/36401.pdf>, DOI:10.5220/0003640103860389 (accessed: 11/14/2023).

19. Massel' L.V., Ivanova I.YU., Vorozhtsova T.N., et al. Ontologicheskiye aspekty issledovaniya vzaimovliyaniya energetiki i geoekologii [Ontological aspects of studying the mutual influence of energy and geoecology]. Ontologiya proyektirovaniya [Ontology of design], 2018, v. 8, no. 4(30), pp. 550-561, DOI:10.18287/2223-9537-2018-8-4-550-561
20. Aslamova V.S., Plekhanova O.S., Aslamov A.A. Regressionnyye modeli otsenki kompleksnogo tekhnogennoho zagryazneniya atmosfery gorodov Irkutskogo regiona [Regression models for assessing complex technogenic atmospheric pollution in cities of the Irkutsk region]. Matematicheskiye metody v tekhnologiyakh i tekhnike [Mathematical methods in technologies and engineering], 2023, no. 8, pp. 62-65.
21. Arshinskiy L.V., Arshinskiy V.L. Neobkhodimost' i dostatochnost' pri agregirovani na osnove neubyvayushchikh funktsiy [Necessity and sufficiency in aggregation based on nondecreasing functions]. Ontologiya proyektirovaniya [Design ontology], 2022, v.12, no. 1(43), pp. 93-105, DOI:10.18287/2223-9537-2022-12-1-93-105.
22. Volkodayeva M.V., Karelin A.O., Lomtev A.YU. et al. Uchot vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot avtonomnykh istochnikov teplosnabzheniya individual'nykh zhilykh domov pri provedenii svodnykh raschetov zagryazneniya atmosfernogo vozdukh dlya naselonykh punktov [Accounting for emissions of pollutants from autonomous sources of heat supply to individual residential buildings when conducting summary calculations of atmospheric air pollution for populated areas]. Gigiyena i sanitariya [Hygiene and Sanitation], 2023, no. 102(2), pp. 141-147.
23. Gosudarstvennyj doklad "O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Irkutskoj oblasti v 2022 godu" [State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk region in 2022"], Irkutsk, Maxima LLC, 2023, 285p.
24. Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha ot 28.01.2021 N 2 (red. ot 30.12.2022) "Ob utverzhdenii sanitarnykh pravil i norm SanPiN 1.2.3685-21 "Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniju bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlja cheloveka sredy obitaniya" [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation 28.01.2021 N 2 (as amended on 30.12.2022) "On approval of sanitary rules and norms SanPiN 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness to humans habitat."], available at: <https://base.garant.ru/400274954/> (accessed 11/02/2023).
25. RD 52.04.667-2005. Dokumenty o sostojanii zagryazneniya atmosfery v gorodakh dlya informirovaniya gosudarstvennykh organov, obshchestvennosti i naseleniya. Obshchiye trebovaniya k razrabotke, postroyeniyu, izlozheniyu i sodержaniyu. Data vvedeniya 2006.02.01 [Documents on the state of air pollution in cities to inform government agencies, the public and the population. General requirements for development, construction, presentation and content. Date of introduction 2006.02.01], available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200067118> (accessed: 10/08/2023).
26. Arguchintseva A.V., Kochugova Ye.A. Potentsial samoochishcheniya atmosfery [Potential for self-purification of the atmosphere]. Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle [News of Irkutsk State University. Earth Sciences], 2019, v. 27, pp. 3-15.
27. Selegey T.S., Yurchenko I.P. Potentsial rasseivayushchey sposobnosti atmosfery [Potential of the scattering ability of the atmosphere]. Geografiya i prirod. Resursy [Geography and nature. Resources], 1990. no. 2, pp. 132-137.

Aslamova Vera Sergeevna. Professor, doctor of technical sciences, professor of the department of Technosphere safety at the Irkutsk state university of transport and communications (IrGUPS), AuthorID: 683194, SPIN: 3063-0626, ORCID: 0000-0003-3306-0651, aslamovav@yandex.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Plekhanova Olga Sergeevna. Applicant, assistant at the department of Information systems and information security at the Irkutsk state university of transport and communications (IrGUPS), AuthorID: 641329, SPIN: 2708-5758, ORCID: 0000-0001-6297-8870, plekhanova_os@bk.ru, 664074, Irkutsk, st. Chernyshevsky, 15.

Статья поступила в редакцию 27.11.2023; одобрена после рецензирования 26.01.2024; принята к публикации 05.03.2024.

The article was submitted 11/27/2023; approved after reviewing 01/26/2024; accepted for publication 03/05/2024.

Математическое моделирование

УДК 621.165+51.74

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.005

Подход к оценке эффективности комплексной модернизации технологических схем действующих теплоэнергетических установок на основе методов математического моделирования и оптимизации

Клер Александр Матвеевич¹, Забуга Федор Викторович^{1,3},
Алексеюк Виталий Эдуардович^{1,2}

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, fvzabuga@yandex.ru

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

³ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго», Россия, Иркутск

Аннотация. Следствием провала в развитии электроэнергетической отрасли в девяностых годах прошлого века в нашей стране стало снижение активности внедрения современных технологий и оборудования на тепловых электростанциях. Переход к рыночным отношениям и подходы к регулированию тарифов и сегодня способствуют образованию дефицита финансовых ресурсов, не позволяют в достаточной степени производить обновление производственных фондов энергетических предприятий. В такой ситуации возрастает интерес к малозатратным способам модернизации действующего оборудования ТЭС – поиску и реализации способов повышения его эффективности при малых капитальных вложениях. Основным инструментом для решения данной задачи являются методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации. В статье представлен методический подход к оценке эффективности комплексной модернизации технологических схем действующих теплоэнергетических установок (ТЭУ), который систематизирует процесс поиска возможных путей повышения их эффективности, а также позволяет выполнять точную и оперативную оценку рассматриваемых технических решений. Предлагаемый подход состоит из трех стадий и объединяет в себе первостепенное решение задач идентификации параметров математических моделей действующих теплоэнергетических установок с последующим решением задач оптимизации их технологических схем. В качестве примеров практического применения рассматриваемого методического подхода в статье приводятся технические решения, направленные на повышение эффективности работы действующего энергоблока №5 филиала ТЭЦ-10 ООО «Байкальская Энергетическая Компания».

Ключевые слова: угольный энергоблок, повышение эффективности работы, теплоэнергетическая установка, математическое моделирование, параметрическая оптимизация, идентификация параметров математической модели, модернизация технологической схемы

Цитирование: Клер А.М. Подход к оценке эффективности комплексной модернизации технологических схем действующих теплоэнергетических установок на основе методов математического моделирования и оптимизации / А.М. Клер, Ф.В. Забуга, В.Э. Алексеюк // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 50-65. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.005.

Введение. К основному оборудованию угольных ТЭС относятся паровые котлы, паротурбинные установки (ПТУ) и турбогенераторы. В течение длительного времени основными направлениями повышения экономичности паротурбинных установок остаются: повышение начальных параметров пара, введение его промежуточного перегрева, укрупнение единичной мощности и совершенствование проточной части [1].

Что касается возможных путей модернизации действующих ПТУ, то в данном случае заслуживает внимания направление, связанное с повышением эффективности работы конденсационных установок. Так, одной из причин снижения тепловой экономичности паровых турбин являются потери теплоты в конденсаторах, связанные с поступлением в них, помимо основного потока пара, расширяющегося в части низкого давления турбины, дополнительных пароводяных потоков. Эти потоки имеют более высокую температуру, чем температура кон-

денсации пара в конденсаторе, вследствие чего их избыточное тепло отводится с охлаждающей водой и полезно не используется. К таким потокам относятся рециркуляция основного конденсата, дренажи отборов и цилиндров турбины, отсос паровоздушной смеси и слив конденсата из подогревателей, уплотнений цилиндров низкого давления и т.д. Данная проблема была подробно исследована в работах [2, 3]. Авторы приходят к выводу, что общее количество тепла, поступающего в конденсатор помимо тепла, идущего с паром из части низкого давления, составляет от 8 до 18 МВт в зависимости от типа турбоустановки и особенностей компоновки ее технологической схемы.

Другой значимой проблемой современного энергетического производства на российских тепловых электростанциях является снижение экономичности их работы из-за повышенного потребления энергии на собственные нужды (СН) электростанции. Согласно проведенным исследованиям, для пылеугольного энергоблока мощностью 200 МВт более 70% расхода электроэнергии приходится на двигатели 6 кВ и 0,4 кВ. Максимальное значение этих потерь может быть определено в зависимости от типа электростанции и выражено в процентах от ее установленной мощности.

В работе [4] рассматриваются основные способы снижения потерь электроэнергии в технологических комплексах СН ТЭС, позволяющие повысить их эффективность. Один из способов заключается в применении гидромuft – устройств, обеспечивающих регулирование частоты вращения насосных и вентиляторных установок путем изменения скольжения их приводных асинхронных двигателей [5, 6]. Другой способ снижения расхода электроэнергии на СН заключается в регулировании частоты вращения механизмов СН с помощью паротурбинного привода. Данный способ является типовым решением в отечественной электроэнергетике для турбопитательных насосов котлов энергоблоков мощностью 300-800 МВт. К следующему способу можно отнести электрическое регулирование, реализуемое на основе электроприводов с изменяемой частотой вращения, которое позволяет обеспечить оптимальное управление технологическими комплексами СН ТЭС. Такое регулирование является эффективным инструментом снижения потерь и увеличения рационального топливо-использования [7]. Помимо вышперечисленных «общепринятых» путей повышения эффективности работы механизмов СН большой интерес представляют пути модернизации, направленные на устранение потерь в действующих технологических схемах ТЭС по причине их неэффективной компоновки, учитывающие их фактическое состояние и особенности режимов работы [8].

Следует отметить, что в вышперечисленных работах для обоснования технических решений не использовались математические модели целой энергетической установки. Препятствием к использованию таких моделей является отсутствие достаточно точных математических моделей отдельных элементов установки, что связано с трудностями определения ряда коэффициентов, используемых в этих моделях (внутренний относительный КПД отсеков турбин, эффективность теплообменных поверхностей и др.). Их определение возможно лишь на основе дополнительных замеров ряда режимных параметров. Проведение этих замеров может быть выполнено в ходе специальных испытаний установки с привлечением специализированных организаций, что, в свою очередь, требует дополнительных финансовых затрат. Также необходимо заметить, что при модернизации технологической схемы изменяются параметры не только на ее измененном участке, но и в других элементах, что необходимо учитывать при расчетах энергетической и экономической эффективности установки. По этой причине основными эффективными инструментами исследования теплоэнергетического оборудования ТЭС являются методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации. Принципиальные преимущества математических моделей, такие, как возможность быстро, точно и многократно решать задачу при различных предпосылках, оперативно вносить изменения в методику расчета и другие, предопределили широкое их распространение, как при

разработке и проектировании вновь вводимых, так и при исследовании действующих источников электрической и тепловой энергии [9].

Важно учитывать то, что математические модели, разрабатываемые для существующих ТЭУ, должны быть настроены по результатам замеров режимных параметров на их текущее состояние. Только в этом случае результаты расчетов с допустимой точностью будут отражать реально протекающие в них процессы, что необходимо для корректного построения выводов и, в конечном счете, обоснованности принятия тех или иных технических решений, направленных на повышение их эффективности. В работах [10, 11] приводится описание усовершенствованной трехэтапной методики идентификации (настройки) математических моделей сложного теплоэнергетического оборудования. Эта методика позволяет эффективно выявлять грубые погрешности измерений контрольных параметров, используемых для настройки математической модели исследуемого оборудования, оценивать корректность и исправлять ошибки построения самой математической модели и повышать точность идентификации.

Следует также отметить, что настроенная в соответствии с методикой идентификации математическая модель энергетической установки предоставляет возможность дать оперативную оценку эффективности нескольких совместно выполненных модернизаций схемы. По этой причине математическая модель ТЭУ, настроенная с учетом ее фактического состояния, может быть использована как перспективный инструмент для поиска и апробации оптимальных технических решений по модернизации технологических схем. Таким образом, существует необходимость в разработке комплексного методического подхода, объединяющего в себе первостепенное решение задач идентификации параметров математических моделей действующих теплоэнергетических установок с последующим решением задач оптимизации их технологических схем.

1. Методический подход к оценке эффективности комплексной модернизации технологической схемы действующей ТЭУ.

На первой стадии осуществляется выбор объекта исследования и проводится подробный инженерный анализ действующей схемы, выбранной для проведения исследований энергетической установки с целью выявления возможных потерь. Практический интерес представляют действующие энергетические установки с большим сроком эксплуатации (30 и более лет), технологические схемы которых ранее не подвергались комплексному изучению с целью последующей модернизации. Под «подробным» понимается учет всех потоков теплоносителей, протекающих в технологической схеме. Интерес представляют низкопотенциальные тепловые потоки и потоки с малыми расходами, связывающие энергетическое оборудование исследуемой схемы (дренажи подогревателей, паропроводов и т.д.). Также выполняется анализ характеристик вращающихся механизмов (насосов, вентиляторов) и их соответствия текущему состоянию установки во всем рабочем диапазоне нагрузок. Важно на данном этапе провести предварительный учет (оценку) фактического состояния исследуемой ТЭУ. Завершается инженерный анализ составлением перечня выявленных проблем.

На второй стадии, на основании выполненного инженерного анализа и составленного на первой стадии перечня проблем принимается решение о проведении комплексной модернизации действующей технологической схемы, и предлагаются способы устранения выявленных проблем. Общепринятый на сегодняшний день подход заключается в проведении натурных испытаний на действующей установке и выполнении отдельных расчетов для оценки эффективности решения каждой проблемы. Данный подход требует немалых финансовых затрат, так как для выполнения перечисленных выше работ необходимо привлечение специализированных организаций. Следует также отметить, что весьма трудоемкой и затратной по времени является задача совместной оценки всего комплекса предлагаемых технических реше-

ний, направленных на модернизацию исследуемой технологической схемы ТЭУ. Следовательно, возникает потребность в применении нового высокоэффективного инструмента, позволяющего оперативно выполнять оценку эффективности как отдельно взятых оптимизационных решений, так и всего совместно предлагаемого комплекса мероприятий. В данном случае выполняется разработка математической модели исследуемой установки с ее последующей идентификацией (настройкой) по результатам замеров режимных контрольных параметров.

В настоящей работе для настройки коэффициентов математической модели исследуемого энергоблока применяется разработанная ранее трехэтапная методика идентификации параметров моделей сложных теплоэнергетических установок [10, 11]. Эта методика позволяет более эффективно выявлять замеры параметров с грубыми погрешностями измерений, повысить точность настройки математических моделей и получить относительную оценку точности выполненной идентификации. Все оптимизационные расчеты, необходимые для получения расчетных параметров математической модели ТЭУ, значения целевой функции и ограничений-неравенств выполнялись модифицированным градиентным методом, разработанным в ИСЭМ СО РАН [9, 12]. Этот метод позволяет решать оптимизационные задачи больших размерностей (сотни оптимизируемых параметров и ограничений-неравенств) с высокой точностью.

На третьей стадии рассматриваемого методического подхода, после идентификации математической модели, согласно выполненному ранее инженерному анализу и составленному перечню выявленных проблем и выбранных путей модернизации, вносятся изменения в ее расчетную схему. Далее выполняются оптимизационные расчеты применительно к базовому и модифицированным вариантам технологической схемы энергоустановки для различных режимов ее работы по критерию максимальной энергетической эффективности (минимум расхода топлива при заданных нагрузках) и проводится сравнение полученных результатов. Под различными режимами работы понимается работа энергоустановки в летнем и зимнем периодах года в эксплуатационном диапазоне нагрузок.

При модернизации действующих энергоустановок необходимо учитывать тот факт, что при этом происходят изменения технологической и расчетной схем ТЭУ. Следовательно, требуется предварительная разработка нескольких вариантов схем установки, отличающихся от базовой схемы действующего оборудования. При этом в модифицированных расчетных схемах исследуемого оборудования могут появиться новые элементы или узлы, такие, как трубопроводы, насосы, теплообменники и т.д. Зачастую в этих новых элементах могут находиться дополнительные оптимизируемые параметры, значения которых заранее неизвестны. Дополнительные оптимизируемые параметры делятся на два типа параметров: режимные и конструктивные. Режимные оптимизируемые параметры могут принимать различные значения в разных режимах работы установки, например, к таким параметрам могут относиться напор и производительность нового насоса в модернизированной схеме. Конструктивные оптимизируемые параметры, напротив, имеют одно значение для всех режимов работы установки, например, площадь поверхности нового теплообменника или диаметры его трубок. Таким образом, оптимизационная задача, применительно к модифицированной схеме ТЭУ, представляет собой комплексную задачу по определению оптимальных значений режимных параметров действующих узлов ТЭУ, а также режимных и конструктивных параметров новых узлов схемы.

В дополнение к вышесказанному, конструктивные оптимизируемые параметры новых узлов расчетной схемы энергоустановки могут быть не только непрерывными, но и дискретно изменяющимися. Например, к таким параметрам можно отнести диаметры трубопроводов,

имеющие строго заданный типоразмер, а также это может быть марка насоса или теплообменника. Дополнительную трудность составляет то, что для энергетического оборудования недостаточно провести подобный оптимизационный расчет лишь для одного режима работы установки. Необходимо проведение ряда расчетов при разных режимах работы ТЭУ, что позволит всецело оценить эффект от предложенных путей модернизации ее схемы.

Итак, можно сделать вывод о необходимости разработки двух постановок оптимизационных задач. Первая постановка будет направлена на определение оптимального значения целевой функции для действующей схемы исследуемой ТЭУ. Вторая постановка, в свою очередь, позволит найти оптимальное значение целевой функции, применительно к модернизированной схеме, в которую включено новое оборудование. Таким образом, сравнение значений целевой функции, рассчитанной для базовой и модернизированной схем при нескольких одинаковых режимах работы, позволит оценить возможную выгоду от внедрения модернизации в схему исследуемой ТЭУ.

Так как в работе рассматривается конденсационный энергоблок, в качестве целевой функции оптимизационной задачи может выступать удельный расход топлива на выработку электроэнергии. При этом необходимо учитывать затраты электроэнергии на привод механизмов собственных нужд, таких, как тягодутьевые машины, насосное оборудование и прочее. Другим вариантом целевой функции является полезная электрическая мощность, выработанная на энергоустановке. В данной работе в качестве целевой функции оптимизационной задачи был выбран удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии нетто (с учетом затрат электроэнергии на собственные нужды). Математическая постановка оптимизационной задачи применительно к базовой схеме энергоустановки может быть представлена следующим образом.

$$\min_{x_p^i} b_{ym}^{nem}, \quad (1)$$

при условиях

$$H(x_p^i, N_{\vartheta}^i, \theta, D^i) = 0, \quad (2)$$

$$G(x_p^i, N_{\vartheta}^i, \theta, D^i) \geq 0, \quad (3)$$

$$B_{ym}^i = f(x_p^i, N_{\vartheta}^i, \theta, D^i), \quad (4)$$

$$N_{ch}^i = \varphi(x_p^i, N_{\vartheta}^i, \theta, D^i), \quad (5)$$

$$b_{ym}^{nem} = \frac{\sum_{i=1}^R (B_{ym}^i \cdot T^i)}{\sum_{i=1}^R [(N_{\vartheta}^i - N_{ch}^i) \cdot T^i]}, \quad (6)$$

$$(x_{pn}^i)^{\min} \leq x_{pn}^i \leq (x_{pn}^i)^{\max}, \quad (7)$$

где b_{ym}^{nem} – удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии нетто; i – порядковый номер режима работы установки; $i = 1, \dots, R$; R – количество режимов работы исследуемой установки, участвующих в оптимизационном расчете; x_p^i – вектор режимных оптимизируемых параметров; n – порядковый номер режимного оптимизируемого параметра x_{pn}^i ; $n = 1, \dots, S$, где S – количество режимных оптимизируемых параметров; H – вектор-функций

ограничений-равенств, включающий в себя все уравнения математической модели ТЭУ и входящих в ее состав элементов расчетной схемы установки; G – вектор-функций ограничений-неравенств, учитывающий физические и режимные ограничения на работу реального оборудования; $N_{\text{э}}^i$ – вырабатываемая в энергоустановке электрическая мощность; θ – вектор настроенных во время идентификации коэффициентов; D^i – вектор исходных данных, относящихся к i -му режиму; B_{ym}^i – полный расход условного топлива, используемого в энергоустановке; T^i – продолжительность режима работы энергоустановки; $N_{\text{сн}}^i$ – электрическая мощность, затрачиваемая на привод механизмов собственных нужд.

В отличие от вышеизложенной постановки задачи оптимизация, применительно к модернизированной схеме, помимо прочего, будет включать в себя определение оптимальных значений режимных и конструктивных параметров нового оборудования в нескольких режимах работы исследуемой энергоустановки. С учетом этого постановка оптимизационной задачи принимает следующий вид

$$\min_{x_{\text{рд}}^i, x_{\text{рн}}^i, x_{\text{кн}}^i} b_{\text{ym}}^{\text{нет}}, \quad (8)$$

при условиях:

$$H(x_{\text{рд}}^i, x_{\text{рн}}^i, N_{\text{э}}^i, x_{\text{кн}}^i, \theta, D^i) = 0, \quad (9)$$

$$G(x_{\text{рд}}^i, x_{\text{рн}}^i, N_{\text{э}}^i, x_{\text{кн}}^i, \theta, D^i) \geq 0, \quad (10)$$

$$B_{\text{ym}}^i = f(x_{\text{рд}}^i, x_{\text{рн}}^i, N_{\text{э}}^i, x_{\text{кн}}^i, \theta, D^i), \quad (11)$$

$$N_{\text{сн}}^i = \varphi(x_{\text{рд}}^i, x_{\text{рн}}^i, N_{\text{э}}^i, x_{\text{кн}}^i, \theta, D^i), \quad (12)$$

$$b_{\text{ym}}^{\text{нет}} = \frac{\sum_{i=1}^R (B_{\text{ym}}^i \cdot T^i)}{\sum_{i=1}^R [(N_{\text{э}}^i - N_{\text{сн}}^i) \cdot T^i]}, \quad (13)$$

$$\left(x_{\text{рд } n}^i\right)^{\min} \leq x_{\text{рд } n}^i \leq \left(x_{\text{рд } n}^i\right)^{\max}, \quad (14)$$

$$\left(x_{\text{рн } o}^i\right)^{\min} \leq x_{\text{рн } o}^i \leq \left(x_{\text{рн } o}^i\right)^{\max}, \quad (15)$$

$$\left(x_{\text{кн } p}^i\right)^{\min} \leq x_{\text{кн } p}^i \leq \left(x_{\text{кн } p}^i\right)^{\max}, \quad (16)$$

где некоторые обозначения те же, что и в выражениях (1–7); $x_{\text{рд}}^i$ – вектор режимных оптимизируемых параметров, применительно к действующему оборудованию расчетной схемы; n – порядковый номер режимного оптимизируемого параметра $x_{\text{рд } n}^i$; $n = 1, \dots, S$, где S – количество режимных оптимизируемых параметров для действующего оборудования; $x_{\text{рн}}^i$ – вектор режимных оптимизируемых параметров, применительно к новому оборудованию расчетной схемы; o – порядковый номер режимного оптимизируемого параметра $x_{\text{рн } o}^i$; $o = 1, \dots, T$, где T – количество режимных оптимизируемых параметров для нового оборудования; $x_{\text{кн}}^i$ – вектор

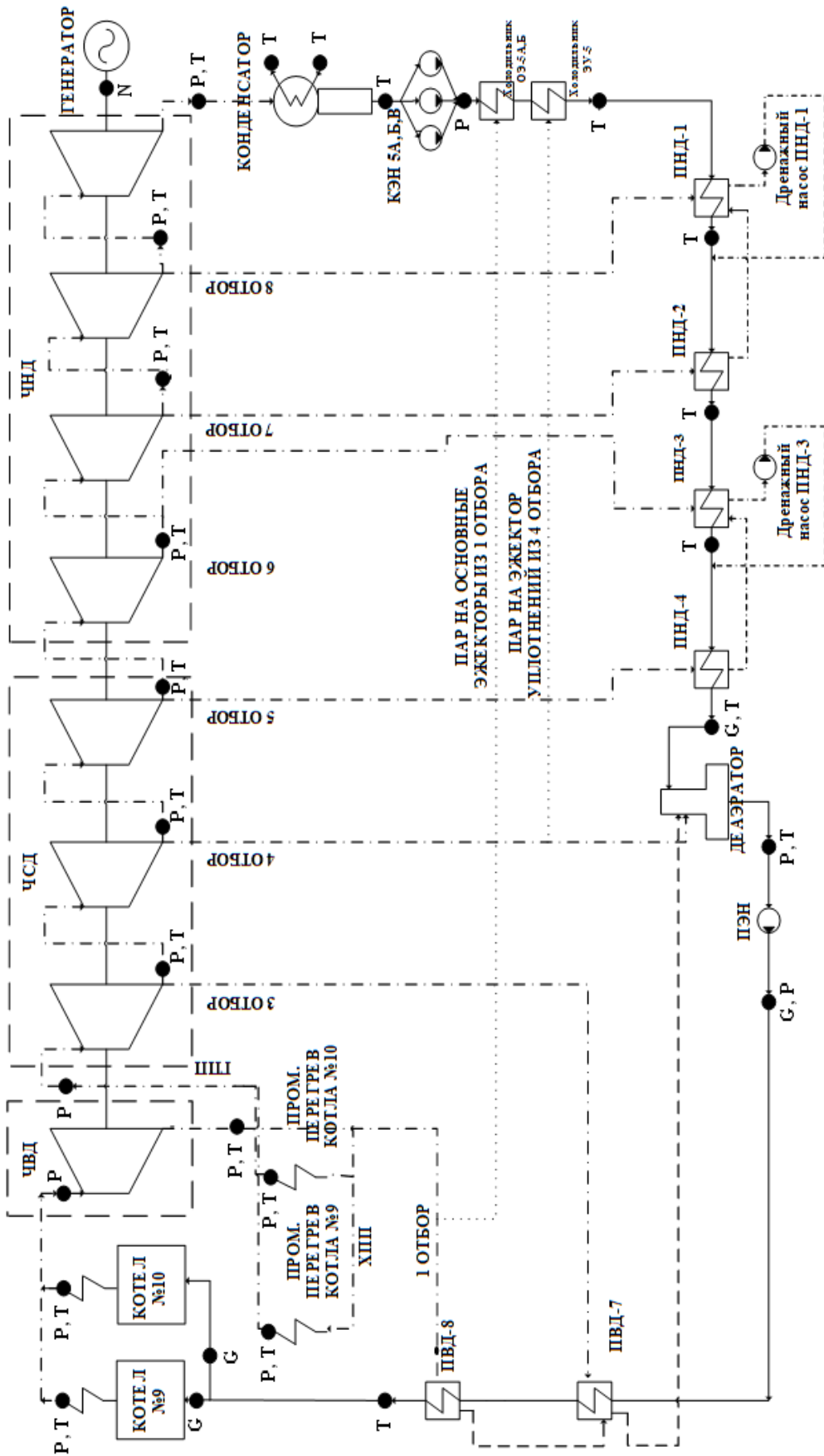
конструктивных оптимизируемых параметров, применительно к новому оборудованию расчетной схемы; p – порядковый номер конструктивного оптимизируемого параметра $x_{кп}^i$; $p = 1, \dots, U$, где U – количество конструктивных оптимизируемых параметров для нового оборудования.

На основании полученных результатов оптимизационных расчетов для базовой и модифицированной схем выполняется оценка эффективности рассматриваемых технических решений, и строятся выводы о возможности их реализации на практике.

2. Математическое моделирование исследуемого энергоблока и идентификация параметров данной математической модели. Как было сказано выше, математическая модель исследуемой ТЭУ должна быть адекватна своему прототипу, то есть должна отражать реальные режимы работы установки с достаточной точностью. Для выполнения этого условия применяется трехэтапная методика идентификации – настройка режимных параметров и коэффициентов математической модели теплоэнергетической установки, позволяющая получить настраиваемые коэффициенты, характеризующие ее текущее состояние. Для настройки данных коэффициентов модели используются замеры температур, давлений и расходов теплоносителей в различных точках технологической схемы установки в нескольких установившихся режимах ее работы. Согласно методике, выбирают от трех до шести режимов работы ТЭУ в рабочем диапазоне нагрузок. Необходимо отметить, что эти режимы работы должны быть обеспечены в относительно небольшом промежутке времени для того, чтобы считать настраиваемые коэффициенты математической модели постоянными. Кроме того, необходимо знание значений классов точности средств измерений, используемых для получения соответствующих замеров параметров.

В качестве прототипа для моделирования в настоящей работе был выбран энергоблок №5 филиала ООО «Байкальская Энергетическая Компания» ТЭЦ-10 (Иркутская область, г. Ангарск). В его состав входит паровая турбоустановка К-150-130 мощностью 150 МВт и два котельных агрегата высокого давления ПК-24 (82СП-270/140) с промежуточным перегревом пара паропроизводительностью 270 т/ч. Математическая модель исследуемого энергоблока была построена с помощью среды разработки СМПП-ПК [9, 13]. В построенной модели были объединены связями по питательной воде, острому пару и пару промежуточного перегрева математические модели двух котельных агрегатов и паровой турбины. Расчетная схема энергоблока включает 129 элементов и 208 связей между ними. Полученная математическая модель содержит 1290 информационно-входных, 1862 информационно-выходных параметров, из которых 148 – являются итерационно-вычисляемыми и требуют задания начального приближения.

Замеры параметров работы энергоблока №5, необходимые для выполнения идентификации его математической модели, были выполнены в ходе эксплуатации оборудования осенью 2018 года для установившихся режимов работы с электрической нагрузкой 140, 132 и 108 МВт. Каждый из рассматриваемых режимов работы энергоблока включал в себя 84 замеренных значений контрольных параметров в различных точках технологической схемы, из которых 8 относились к информационно-входным (задаваемым) для математической модели и 76 – к информационно-выходным (вычисляемым) при расчете математической модели. Класс точности установленных на оборудовании и используемых для замеров средств измерения составлял: для приборов, измеряющих электрическую нагрузку – 1,0%, давление – 1,0%, температуры воды, пара и воздуха – 1,0%; температуры острого пара, горячего промперегрева, уходящих газов на выходе из котлоагрегатов – 0,5%; расхода – 4,0%; дымовых газов за конвективными поверхностями нагрева котлоагрегатов – 5,0%. На рисунке 1 представлена схемы измерений контрольных параметров в технологической схеме энергоблока.



Примечания: ХШП – холодная нитка пара промежуточного перегрева; ГШП – горячая нитка пара промежуточного перегрева; ПЭН – питательный электронасос; КЭН – конденсатный электронасос; ЧВД – часть высокого давления; ЧСД – часть среднего давления; ЧНД – часть низкого давления; ПВД – регенеративный подогреватель высокого давления; ПНД – регенеративный подогреватель низкого давления

Рис. 1. Схема измерений контрольных параметров работы исследуемого энергоблока

Математическая модель энергоблока содержит 91 настраиваемый коэффициент, который необходимо определить для ее настройки с учетом текущего состояния исследуемого энергоблока. Методика идентификации параметров математических моделей теплоэнергетического оборудования позволила выявить несколько замеряемых параметров, выходящих за пределы заявленной точности средств измерения. Данные замеры были отмечены, как неточные, и удалены. Максимальное относительное отклонение (т.е. отношение абсолютной разницы между замеряемым на установке и вычисляемым на модели параметром к среднеквадратичной погрешности замера) среди всех замеряемых параметров составило 2,947 сигма, что согласуется с правилом «трех сигма». При этом среднее относительное отклонение, приходящееся на 1 замеряемый параметр, составило 1,099 сигма, что свидетельствует о высокой точности настройки модели.

Необходимо отметить, что выполненные с помощью подробной настроенной математической модели энергоблока расчеты в результате позволяют получить значения любых вычисляемых параметров в каждом из элементов расчетной схемы установки. Многие из вычисляемых параметров не замеряются на реальной установке и могут быть использованы для решения задач повышения эффективности эксплуатации и модернизации данной ТЭУ.

3. Примеры модернизаций технологической схемы энергоблока. В качестве примера применения рассматриваемого в настоящей работе методического подхода ниже представлена оценка эффективности технического решения по модернизации технологической схемы регенерации низкого давления исследуемого энергоблока, выполненная с применением его настроенной математической модели. В его действующей технологической схеме были выделены три тепловых потока, которые снижают его экономичность за счет безвозвратной потери тепла потоков дренажей с охлаждающей водой в конденсаторе ПТУ:

1. Дренаж эжектора уплотнений ЭУ-5 заведен в конденсатор турбины. Эжектор уплотнений (эжектор лабиринтного пара) предназначен для отсоса паровоздушной смеси из концевых уплотнений турбины.

2. Дренаж основных эжекторов ОЭ-5А, Б заведен в действующей схеме в паровое пространство конденсатора. В турбине К-150-130 паровоздушная смесь из конденсатора отсасывается двумя параллельно включенными основными эжекторами ЭП-3-600.

3. Дренаж конденсатоотводчиков (прогревов) блочной редуционно-охладительной установки (БРОУ-2) котлоагрегатов (КА) №9, 10 заведен в нижнюю часть конденсатосборника. Конденсатоотводчики необходимы для поддержания «тупиковых» участков трубопроводов горячего промперегрева (ГПП) перед закрытыми 9, 10 БРОУ-2 в прогретом состоянии. Трубопровод ГПП перед БРОУ-2 КА ст. №9 оснащен одним «прогревом», а КА ст. №10 – двумя «прогревами».

Оптимизационные расчеты математической модели энергоблока №5 были выполнены для действующей и измененной тепловых схем, для летнего и зимнего режимов работы с электрической нагрузкой 108 и 140 МВт на клеммах генератора.

Результаты расчетов показывают, что перенаправление вышеописанных тепловых потоков дренажей из конденсатора паровой турбины в ПНД-1 приведет к снижению расхода топлива при заданной выработке электроэнергии:

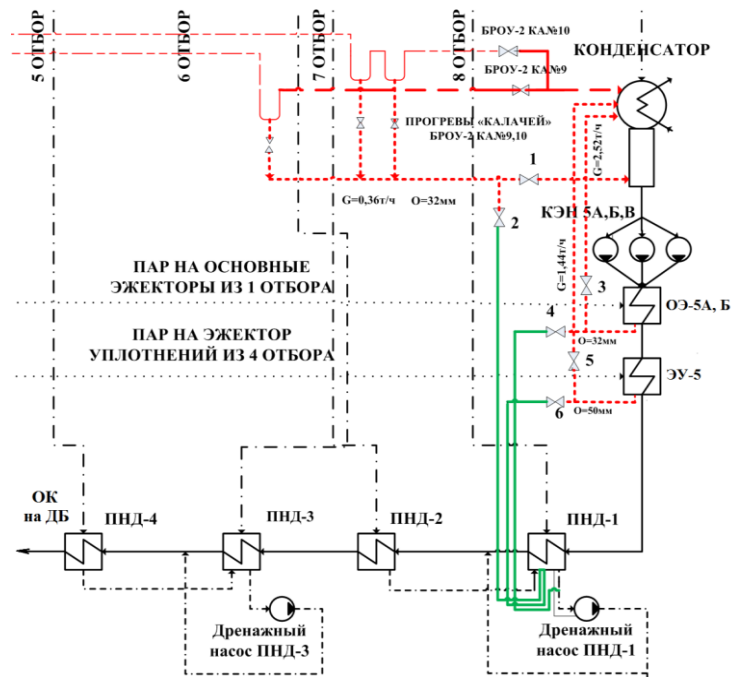
- перенаправление основных эжекторов и эжектора уплотнений энергоблока №5 позволит уменьшить удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии для рассматриваемых режимов работы в среднем на 0,014 грамма;
- перенаправление «прогревов» трубопроводов «калачей» БРОУ-2 КА-9, 10 позволит уменьшить удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии для рассматриваемых режимов работы в среднем на 0,195 грамма;

– совместное перенаправление тепловых потоков приведет к снижению удельного расхода условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии для рассматриваемых режимов работы в среднем на 0,210 грамма.

На рисунке 2 представлен фрагмент модернизированной технологической схемы энергоблока №5. На представленной схеме красной штриховой линией показаны направления тепловых потоков дренажей в действующей схеме, которые заведены в конденсатор турбины, а зеленой сплошной линией – предложенные изменения. Показатели экономической эффективности предложенной модернизации тепловой схемы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Показатели энергетической эффективности модернизации тепловой схемы

Показатель, ед. измерения	Значение
Продолжительность работы, час	4679
Снижение удельного расхода топлива, г.у.т./кВт·ч	0,210
Экономия топлива за год, т.у.т	104,883
Экономия средств за год, руб.	224215
Капиталовложения на модернизацию с учетом амортизации, руб.	37097
Экономический эффект	6,47
Срок окупаемости, год	0,15



Примечания: КЭН – конденсатный электронасос; ПНД – подогреватель низкого давления; ОЭ – основной эжектор; ЭУ – эжектор уплотнений; БРОУ – блочная редукционно-охлаждающая установка; ОК – основной конденсат; ДБ – деаэратор

Рис. 2. Модернизация тепловой схемы регенерации низкого давления энергоблока

Из таблицы 1 следует, что при работе оборудования в течение 4679 часов в год срок окупаемости предложенной модернизации технологической схемы составит около 2 месяцев. Годовая экономия средств с учетом окупаемости капиталовложений и затрат на амортизацию при этом составит 187118 рублей [14].

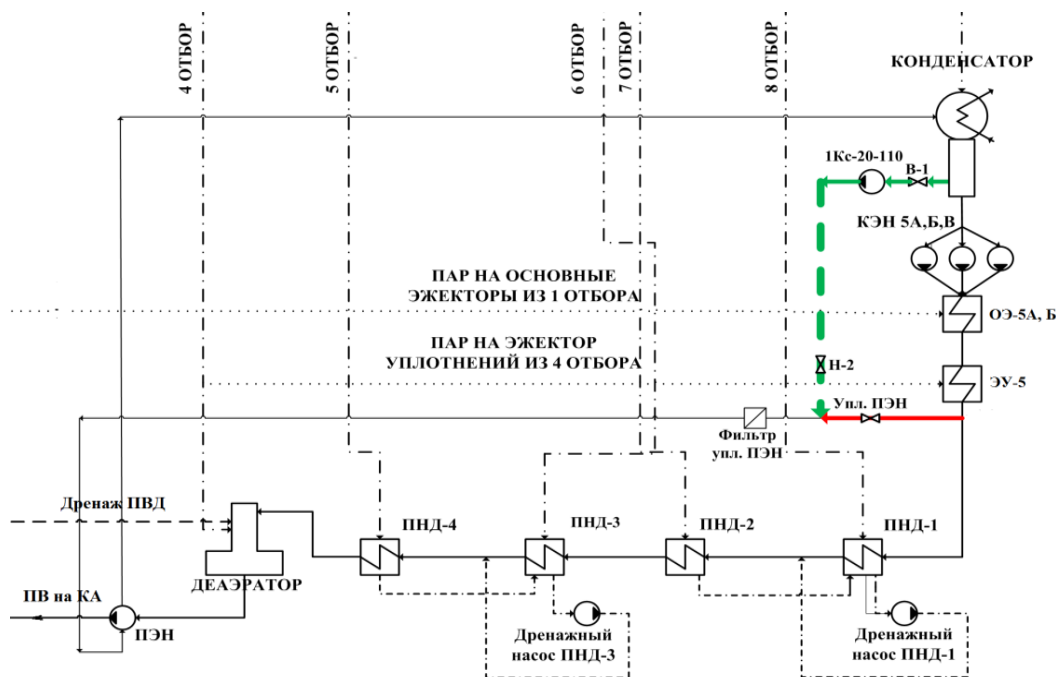
Другим примером практического применения представленного в настоящей работе методического подхода является модернизация технологической схемы основного конденсата энергоблока №5, направленная на решение проблемы повышенного расхода электроэнергии на привод конденсатных насосов блока, связанной с их неправильным выбором при проектировании схемы [15]. Действующая схема включает 3 конденсатных насоса 12КсВ 9х4 производительностью 320 м³/ч каждый при напоре 1,56 МПа. В реальных условиях эксплуатации

вследствие повышенного сопротивления сети и наличия значительной постоянной рециркуляции конденсата в работе находятся два насоса, нагруженных не более чем на 50-55% каждый.

Решение данной проблемы может быть выполнено путем включения в схему основного конденсата дополнительного насоса, который будет выполнять функцию технологически необходимой рециркуляции – подачи холодного конденсата на уплотнение рабочих валов ПЭН блока в местах выхода вала из корпуса насоса с последующим его сливом в паровое пространство конденсатора. Новый элемент технологической схемы – насос 1Кс20-110 на всех режимах работает с постоянным расходом, равным 24 т/ч.

Результаты оптимизационных расчетов математической модели для действующей и измененной схемы основного конденсата представлены в Таблице 2. В действующей схеме в режимах работы с нагрузками 108, 139 МВт в работе находится один конденсатный насос, с нагрузками 141, 150 МВт – включен в параллельную работу второй насос. В измененной схеме на всех режимах в работе находится один КЭН. Насос уплотнений 1Кс20-110 включается в работу в режимах с нагрузкой 141, 150 МВт.

Из таблицы 2 мы можем наблюдать снижение расхода электроэнергии на СН энергоблока в диапазоне нагрузок от 140 до 150 МВт, за счет отсутствия необходимости включения в параллельную работу второго КЭН. Предложенная модернизация схемы основного конденсата блока представлена на рисунке 3. На представленной схеме жирной сплошной линией показано направление движения основного конденсата в действующей схеме, а жирной штриховой линией – предложенное изменение схемы с дополнительным насосом уплотнений ПЭН.



Примечания: ПЭН – питательный электронасос; КЭН – конденсатный электронасос; ПВД – регенеративный подогреватель высокого давления; ПНД – регенеративный подогреватель низкого давления; ПВ – питательная вода; КА – котлоагрегат.

Рис. 3. Модернизация технологической схемы основного конденсата энергоблока

Ежегодно, преимущественно в летние периоды, ТЭЦ-10 работает с минимальным составом включенного в работу основного оборудования. В данных условиях возникает необходимость резервирования общестанционного коллектора «Впрыск 60ата» от ПЭН энергоблока, находящегося в резерве. На выделенном питательном насосе собирается тепловая схема и включается конденсатный насос блока. При этом по результатам проведенных замеров более 180 т/ч конденсата сбрасываются в конденсатор через открытую рециркуляцию, а лишь 12 т/ч конденсата поступает на уплотнения ПЭН, находящегося в резерве.

Таблица 2. Результаты расчетов математической модели для действующей и измененной схемы основного конденсата энергоблока при различных режимах его работы

Параметры, ед. измерения	Режим 108 МВт	Режим 139 МВт	Режим 141 МВт	Режим 150 МВт
Расход электроэнергии на перекачку ОК (действующая схема), кВт	171,44	193,77	287,14	292,55
Расход электроэнергии на перекачку ОК (измененная схема), кВт			199,10	204,96
КПД нетто энергоблока (действующая схема), %	33,769	33,869	33,847	33,810
КПД нетто энергоблока (измененная схема), %			33,875	33,852
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии (действующая схема), г.у.т./кВт·ч	363,823	362,745	362,980	363,380
Удельный расход топлива на выработку электроэнергии (измененная схема), г.у.т./кВт·ч			362,681	362,929
Снижение удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии (нетто), г.у.т./кВт·ч	–	–	0,299	0,451

Предложенную в настоящей работе модернизацию технологической схемы можно применить в данных условиях для снижения расхода электроэнергии на СН. Подача конденсата на уплотнения резервного ПЭН от насоса 1Кс20-110 позволит исключить необходимость включения КЭН блока.

Показатели экономической эффективности предложенной модернизации технологической схемы основного конденсата энергоблока приведены в таблице 3. Расчеты показывают, что при работе энергоблока №5 в течение года с $N_{эл} \geq 140$ МВт продолжительностью 378 часов (16 суток) и нахождении в резерве ПЭН-ов, входящих в его состав, в течение 360 часов (15 суток), общая экономия средств составит 87191 руб., а срок окупаемости предложенной модернизации его технологической схемы составит 4 года [16]. При этом стоит учитывать, что при повышении продолжительности работы энергоблока с электрической нагрузкой свыше 140 МВт приведет к снижению срока окупаемости предложенной модернизации.

Таблица 3. Показатели энергетической эффективности модернизации тепловой схемы

Показатель, ед. измерения	Значение
Продолжительность работы, час	378
Снижение удельного расхода топлива, г.у.т./кВт·ч	0,38
Экономия топлива за год, т.у.т	20,828
Экономия средств (работа энергоблока с $N_{э} \geq 140$ МВт)	46397
Экономия средств (резервирование коллектора), руб.	40794
Капиталовложения на модернизацию с учетом амортизации, руб.	302691
Экономический эффект	0,25
Срок окупаемости, год	4

Заключение. В данной работе представлен методический подход к оценке эффективности комплексной модернизации действующего теплоэнергетического оборудования ТЭС, который состоит из трех стадий и позволяет на основании сравнения результатов оптимизационных расчетов выявлять пути повышения эффективности исследуемой установки.

На первой стадии осуществляется выбор объекта исследования. Далее проводится подробный инженерный анализ действующей схемы ТЭУ, который завершается составлением

перечня выявленных проблем. На второй стадии предлагаются способы устранения выявленных проблем и выполняется разработка математической модели исследуемой установки с ее последующей идентификацией по результатам замеров режимных параметров. На третьей стадии вносятся изменения в расчетную схему установки; выполняются оптимизационные расчеты применительно к базовому и модифицированным вариантам технологической схемы. На основании полученных результатов выполняется сравнительная оценка энергетической и экономической эффективности рассматриваемых технических решений.

С применением данного методического подхода представлены способы повышения эффективности энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО «БЭК»:

– путем малозатратной модернизации, заключающейся в перенаправлении тепловых потоков дренажей регенерации низкого давления и конденсатоотводчиков тепловых компенсаторов БРОУ-2 котлоагрегатов из конденсатора паровой турбины в ПНД-1; результаты оптимизационных расчетов математической модели показывают, что совместное перенаправление вышеперечисленных тепловых потоков из конденсатора паровой турбины в ПНД-1 приведет к снижению удельного расхода условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии в среднем на 0,210 грамма (при работе энергоблока в течение 4679 часов в год экономия топлива составит 104,883 т.у.т);

– путем модернизации, заключающейся во включении в схему основного конденсата дополнительного насоса уплотнений ПЭН; результаты оптимизационных расчетов математической модели показывают, что работа энергоблока с одним конденсатным насосом и насосом уплотнений ПЭН 1Кс-20-110 позволит снизить расхода условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии в среднем на 0,375 грамма (при работе энергоблока с $N_{эл} \geq 140$ МВт в течение 378 часов в год экономия топлива составит 20,828 т.у.т).

Данный методический подход является универсальным и может быть применен для модернизации технологических схем других действующих теплоэнергетических установок.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания FWEU-2021-0005 (регистрационный номер: АААА-А21-121012190004-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Гуторов В.Ф. Пути повышения экономичности паротурбинных установок ТЭЦ / В.Ф. Гуторов, Л.Л. Симою, Е.И. Эфрос // Теплоэнергетика, 2001. – № 6 – С. 32-37.
2. Симою Л.Л. Повышение экономичности теплофикационных турбин с двухпоточным ЦНД / Л.Л. Симою, В.Ф. Гуторов, Е.И. Эфрос // Теплоэнергетика, 2000. – № 11 – С. 14-17.
3. Гуторов В.Ф. Направления повышения эффективности работы теплофикационных турбин / В.Ф. Гуторов, Л.Л. Симою, Е.И. Эфрос // Теплоэнергетика, 2000. – № 12 – С. 29-34.
4. Лазарев Г.Б. Управление эффективностью механизмов собственных нужд ТЭС / Г.Б. Лазарев // Энергия единой сети, 2012. – Т. 5. – № 5. – С. 58-67.
5. Костенко Д.А. Регулируемые приводы: возможности, затраты, эффективность / Д.А. Костенко, В.Б. Иванов // ТЭК, 2008. – № 4. – С. 30-33.
6. Pascal Alas, Eric Noulette Electro compression a challenging alternative: How and why to choose a gas turbine or an electric motor to drive a centrifugal compressor. Proceedings of asme turbo expo 2013: Turbine technical conference and exposition. V. 5B. Oil and gas applications. Steam turbines, DOI: 10.1115/gt2013-94163.
7. Салов А.Г. Комплексный анализ энергоэффективности вспомогательного оборудования ТЭЦ / А.Г. Салов, А.А. Гаврилова // Промышленная энергетика, 2011. – № 12. – С. 31-34.
8. Сизов Р.Р. Снижение удельного расхода электроэнергии на собственные нужды энергоблока ст.№8 Заинской ГРЭС / Р.Р. Сизов // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2015. – №3(27). – С. 129-131.
9. Клер А.М. Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов / Под ред. А.М. Клера, Э.А. Тюриной // Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Академическое изд-во Гео, 2016. – 298 с.

10. Алексеюк В.Э. Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования / В.Э. Алексеюк, А.С. Максимов, П.Г. Сафронов // Вестник Иркутского государственного технического университета, 2019. – Т. 23. – № 3. – С. 503–515. – DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-503-515.
11. Vitalii Alekseiuk Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. ENERGY-21. Sustainable development & Smart management, E3S Web Conf., 2020, vol. 209, 03002, DOI:10.1051/e3sconf/202020903002.
12. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. Energy, ID: 116230, 2019, DOI: 10.1016/j.energy.2019.116230.
13. Клер А.М. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями / А.М. Клер, Н.П. Деканова, С.К. Скрипкин [и др.]. – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1997. – 120 с.
14. Забуга Ф.В. Оценка энергетической эффективности модернизации схемы энергоблока № 5 ТЭЦ-10 ООО “Байкальская энергетическая компания” с применением его настроенной математической модели / Ф.В. Забуга, В.Э. Алексеюк // Оперативное управление в электроэнергетике: подготовка персонала и поддержание его квалификации, 2022. – №3. – С. 15-22.
15. Соболев С.П. Паровая турбина К-160-130 ХТГЗ / С.П. Соболев. – Москва: Энергия, 1980 – 192 с.
16. Забуга Ф.В. Оценка модернизации схемы основного конденсата энергоблока №5 ТЭЦ-10 с применением его настроенной математической модели / Ф.В. Забуга, В.Э. Алексеюк // iPolytech Journal, 2022. – Т. 26. – № 3. – С. 426-438. – DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-426-438.

Клер Александр Матвеевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий отделом теплосиловых систем, институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, AuthorID: 20219, SPIN: 8502-2561, ORCID: 0000-0002-0460-9062, kler@isem.irk.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова 130.

Забуга Федор Викторович. Ведущий инженер отдела теплосиловых систем ИСЭМ СО РАН, инженер-технолог 1 категории, ООО «Инженерный центр «Иркутскэнерго», AuthorID: 1124933, SPIN: 2630-4282, ORCID: 0000-0003-2298-3530, fvzabuga@yandex.ru, Россия, Иркутск, бул. Рябикова, 67.

Алексеюк Виталий Эдуардович. Кандидат технических наук, младший научный сотрудник отдела теплосиловых систем, институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, доцент кафедры теплоэнергетики, Иркутский национальный исследовательский технический университет, AuthorID: 1149694, SPIN: 6956-2240, ORCID: 0000-0002-4226-0519, alexeyuk.vitaliy@yandex.ru, Россия, Иркутск, Лермонтова 83.

UDC 621.165+51.74

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.005

An approach to assessing the effectiveness of complex modernization of technological schemes of existing thermal power plants based on mathematical modeling and optimization methods

Aleksandr M. Kler¹, Fedor V. Zabuga^{1,3}, Vitalii E. Alekseiuk^{1,2}

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

²Irkutsk National Research Technical University, Russia, Irkutsk

³Engineering Center “Irkutskenergo” LLC, Russia, Irkutsk

Abstract. The failure in the development of the electric power industry in the nineties of the last century in our country contributed to a decrease in the activity of the introduction of modern technologies and equipment at thermal power plants. The transition to market relations and approaches to tariff regulation today contribute to the formation of a shortage of financial resources, do not sufficiently allow updating the production funds of energy enterprises. In such a situation, there is an increasing interest in low-cost ways to modernize existing TPP equipment - the search and implementation of ways to increase its efficiency with small capital investments. The main tool for solving this problem are methods of mathematical modeling and circuit parametric optimization. This paper presents a methodological approach to assessing the effectiveness of the comprehensive modernization of technological schemes of existing thermal power plants (TEP), which systematizes the process of searching for

possible ways to improve their efficiency, and also allows for an accurate and prompt assessment of the technical solutions under consideration. This approach consists of three stages and combines the primary solution of the problems of identifying the parameters of mathematical models of operating thermal power plants with the subsequent solution of optimization problems of their technological schemes. As examples of the practical application of the considered methodological approach, this paper presents technical solutions aimed at improving the efficiency of the operating power unit No. 5 of the CHPP-10 of Baikal Energy Company LLC.

Keywords: coal-fired power unit, efficiency improvement, thermal power plant, mathematical modeling, parametric optimization, identification of mathematical model parameters, modernization of technological scheme

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project of the state task

FWEU-2021-0005 (reg. no.: AAAA-A21-121012190004-5) of the program of fundamental research of the Russian Federation for 2021-2030 with the use of resources of the CKP "High Temperature Circuit" (Ministry of Education and Science of Russia, project No. 13.CKP.21.0038).

References

1. Gutorov V.F., Simoyu L.L., Efros E.I. Puti povysheniya jekonomichnosti paroturbinnih ustanovok TJeC [Ways to increase the efficiency of the steam-turbine installations of the TPP]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2001, no. 6, pp. 32-37.
2. Simoyu L.L., Gutorov, V.F., Efros E.I. Povyshenie jekonomichnosti teplofikacionnyh turbin s dvuhpotochnym CND [Increase of the economical efficiency of the heating turbines with a two-flow CND]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2000, no. 11, pp. 14-17.
3. Gutorov V.F., Simoyu L.L., Efros E.I. Napravleniya povysheniya jeffektivnosti raboty teplofikacionnyh turbin [Directions for increasing the efficiency of operation of the heating turbines]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering], 2000, no. 12, pp. 29-34.
4. Lazarev G.B. Upravlenie jeffektivnost'ju mehanizmov sobstvennyh nuzhd TJeS [Efficiency management of the TPP auxiliary needs mechanisms]. *Energiya yedinoj seti* [Energy of the united network], 2012, vol. 5, no. 5, pp. 58-67.
5. Kostenko D.A., Ivanov V.B. Reguliruemye privody: vozmozhnosti, zatraty, jeffektivnost' [Adjustable drives: opportunities, costs, efficiency]. *TEK*, 2008, no. 4, pp. 30-33.
6. Pascal Alas, Eric Noulette Electro compression a challenging alternative: how and why to choose a gas turbine or an electric motor to drive a centrifugal compressor. *Proceedings of asme turbo expo 2013: Turbine technical conference and exposition. V. 5B. Oil and gas applications. Steam turbines*, DOI: 10.1115/gt2013-94163.
7. Salov A.G., Gavrilova A.A. Kompleksnyj analiz jenergojeffektivnosti vspomogatel'nogo oborudovaniya TJeC [Complex analysis of the energy efficiency of the auxiliary equipment of the CHPP]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2011, no. 12, pp. 31-34.
8. Sizov R.R. Snizhenie udel'nogo rashoda jelektrojenergii na sobstvennye nuzhdy jenerglobloka st.№8 Zainskoj GRJeS [Reduction of the specific power consumption for auxiliary needs of the power unit st.№8 of Zainskaya GRES]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennoy energeticheskogo universiteta* [Bulletin of kazan state power engineering university], 2015, no. 3(27). pp. 129-131.
9. Kler A.M., Tyurina E.A. Optimizacionnye issledovaniya jenergeticheskikh ustanovok i kompleksov [Optimization studies of power plants and complexes]. Russian academy of sciences, Siberian Branch, L.A. Melentiev energy systems institute, Novosibirsk: Academic Publishing House Geo, 2016, 298 p.
10. Alekseyuk V.E., Maksimov A.S., Safronov P.G. Uovershenstvovannaja metodika identifikacii matematicheskikh modelej teplojenergeticheskogo oborudovaniya [Improved methodology of identification of mathematical models of the heat power equipment]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk state technical university], 2019, vol. 23, no. 3, pp. 503-515, DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-503-515.
11. Vitalii Alekseiuk Improving the efficiency of the three-stage technique of mathematical model identification of complex thermal power equipment. *ENERGY-21. Sustainable development & Smart management, E3S Web Conf.*, 2020, vol. 209, 03002, DOI:10.1051/e3sconf/202020903002.
12. Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O. Parametric optimization of supercritical power plants using gradient methods. *Energy*, ID: 116230, 2019, DOI: 10.1016/j.energy.2019.116230.
13. Kler A.M., Dekanova N.P., Skripkin S.K. et al. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija v zadachah operativnogo upravleniya teplovymi jelektrostancijami [Mathematical modeling and optimization in problems of operational control of thermal power plants]. *Novosibirsk. Nauka. Sib. predpriyatiye RAN* [Science. Sib. enterprise RAS], 1997, 120 p.
14. Zabuga F.V., Alekseiuk V.E. Ocenka jenergeticheskoy jeffektivnosti modernizacii shemy jenerglobloka no. 5 TJeC-10 OOO "Bajkal'skaja jenergeticheskaja kompanija" s primeneniem ego nastroennoj matematicheskoy modeli [Assessment of the energy efficiency of modernization of the scheme of power unit No. 5 of CHPP-10 of LLC "Baikal

- Energy Company” using its adjusted mathematical model]. *Operativnoye upravleniye v elektroenergetike. Podgotovka personala i podderzhaniye yego kvalifikatsii* [Operational management in electric power industry. Personnel training and maintenance of its qualification], 2022, no. 3, pp. 15-22.
15. Sobolev S.P. Parovaja turbina K-160-130 HTGZ [Steam turbine K-160-130 KTGZ]. Moscow. Energia [Energy], 1980, 192 p.
16. Zabuga F.V., Alexeyuk V.E. Ocenka modernizacii shemy osnovnogo kondensata jenergobloka №5 TJeC-10 s primeneniem ego nastroennoj matematicheskoy modeli [Evaluation of the modernization of the main condensate scheme of the power unit no. 5 of CHPP-10 with application of its adjusted mathematical model]. *iPolytech Journal*, 2022, vol. 26, no. 3. pp. 426-438, DOI: 10.21285/1814-3520-2022-3-426-438.

Kler Aleksandr Matveevich. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Thermal Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, AuthorID: 20219, SPIN: 8502-2561, ORCID: 0000-0002-0460-9062, kler@isem.irk.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontov 130.

Zabuga Fedor Viktorovich. Leading engineer of the thermal energy systems department, engineer-technologist of the 1st category LLC "Engineering Center "Irkutskenergo", AuthorID: 1124933, SPIN: 2630-4282, ORCID: 0000-0003-2298-3530, fvzabuga@yandex.ru, Russia, Irkutsk, blvd. Ryabikova, 67.

Alekseiuk Vitalii Eduardovich. Candidate of technical sciences, junior researcher, department of thermal power systems, Melentiev energy systems institute SB RAS, associate professor of the department of thermal power engineering, Irkutsk national research technical university, AuthorID: 1149694, SPIN: 6956-2240, ORCID: 0000-0002-4226-0519, alexeyuk.vitaliy@yandex.ru, Russia, Irkutsk, st. Lermontov 83.

Статья поступила в редакцию 07.11.2023; одобрена после рецензирования 07.03.2024; принята к публикации 13.03.2024.

The article was submitted 11/07/2023; approved after reviewing 03/07/2024; accepted for publication 03/13/2024.

УДК 544.45; 519.245

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.006

Численный анализ статистических закономерностей теплового зажигания в стохастической среде

Донской Игорь Геннадьевич¹, Гросс Егор Иванович²

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

Россия, Иркутск, *donskoy.chem@mail.ru*

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

Аннотация. В работе с помощью численного моделирования исследуется поведение реагирующих сред со стохастическим пространственным распределением реакционной способности. Для таких систем ставится задача определения границ тепловой устойчивости и поведения в закритических условиях. Эти задачи решаются численно с помощью метода Монте-Карло. Проводится анализ результатов моделирования, оцениваются статистические характеристики процессов зажигания в стационарной и нестационарной постановках. Новизна работы заключается в установлении зависимостей между разбросом реакционной способности и дисперсией характеристик зажигания. Результаты работы могут быть полезны при анализе поведения химических систем со случайным распределением реагирующих компонентов.

Ключевые слова: стохастический процесс, тепловой взрыв, критические условия, математическое моделирование

Цитирование: Донской И.Г. Численный анализ статистических закономерностей теплового зажигания в стохастической среде / И.Г. Донской, Е.И. Гросс // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 66-77. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.006.

Введение. Критические явления, в том числе связанные с иницированием и тушением процессов горения, могут быть чувствительны к случайным шумам. Такое влияние может быть определяющим при больших вариациях реакционной способности и макроскопических потоков, например, в дисперсных средах [1, 2] и турбулентных течениях [3–5]. Стохастический характер изменения переменных приводит к тому, что решение может стать неустойчивым при любых начальных условиях, даже если решение усредненного уравнения устойчиво. В связи с этим появляются вопросы о вероятностях осуществления устойчивых режимов и ожидаемых временах «убегания». Актуальность исследования таких явлений связана с типичными задачами хранения и использования топлив: хранение топлива требует исключения возможности зажигания; конверсия топлива, напротив, требует обеспечения устойчивого зажигания для минимизации потерь с недожогом и вредных выбросов.

Исследование критических явлений в изотермических системах проводилось в работах [6, 7]. Адиабатическая постановка задачи о тепловом взрыве (задача Годеса) рассматривалась в работах [8–10], где было показано, что при достижении критических условий влияние флуктуаций меняется с гасящего на усиливающее. В работах [11–14] численно оценивался порог по числу частиц для перехода к континуальной модели.

Задача Семенова со стохастическим слагаемым рассматривалась в работах [15, 16]. В отличие от адиабатической задачи, в задаче с теплопотерями могут сосуществовать два устойчивых стационарных решения, поэтому потенциал в уравнении Фоккера-Планка является бистабильным: динамика такой системы определяется вероятностью преодоления барьера [17]. Влияние флуктуаций температуры потока на устойчивость каталитической частицы исследовалось в работах [18]: интересным результатом этих работ является вывод о неизбежности теплового взрыва при любых начальных условиях (интенсивность флуктуаций определяет ожидаемое время зажигания). Флуктуации коэффициентов переноса рассматривались в [19, 20].

Уравнение Фоккера-Планка для задачи Франк-Каменецкого исследовалось в работах [21, 22]. Исследование устойчивости решений на основе вариационных методов проводилось в работах [23, 24]. Оценки устойчивости реакционных сред с заданным распределением реакционных центров по энергиям получены в работе [25].

Статистические закономерности играют важную роль в химической технологии, где тепловая устойчивость экзотермических реакторов определяется распределением активных частиц в зернистом слое [1, 26, 27]. Случайное распределение реагирующего компонента может оказывать влияние на выгорание твердых топлив [28, 29]. Перколяционные режимы горения исследовались в работах [30–32].

Тепловая устойчивость проточного реактора идеального перемешивания с флуктуациями реакционной способности (числа Дамкелера) теоретически исследовалась в работе [33], где для стационарных состояний были получены приближенные зависимости между параметрами, в явном виде содержащие дисперсионные слагаемые. Моделирование реакторов частичного перемешивания с флуктуациями скорости перемешивания проводилось в работах [34, 35].

Большая часть неопределенности связана, безусловно, с коэффициентами реакционной способности и точностью задания начальных условий. Для исследования этих факторов в работах [36, 37] проводились многовариантные расчеты. В некоторых случаях дисперсия реакционной способности может быть ключевым фактором, определяющим тепловую устойчивость решений системы уравнений тепломассопереноса в реагирующей среде. Эта дисперсия, однако, связана с распределением активных центров, поэтому величина флуктуации зависит от пространственных координат, но не от времени. Такое приближение ограничивает область применимости результатов системами, в которых неоднородность является макроскопической, например, связана со случайным характером засыпки в зернистом слое, или распределением активных частиц по поверхности насадки, при этом реагент в подвижной фазе распределен непрерывно (в первом приближении – однородно). Расчетные исследования таких систем проводились в работах [38, 39] для пористых каталитических гранул. Целью настоящей работы является исследование зависимости характеристик зажигания от параметров распределения реакционной способности. Для этого проводятся расчеты методом Монте-Карло для стационарной и нестационарной задач теплового взрыва, а также определяются статистические свойства практически важных величин.

В настоящей работе рассматривается образец, в котором случайным образом распределены реакционные центры (частицы топлива, или частицы катализатора, или поверхностные дефекты). Для такого образца определяются условия существования теплового равновесия. Сначала мы рассмотрим наиболее простые варианты неоднородного распределения реакционной способности по образцу, затем перейдем к решению стохастической задачи теплового взрыва в квазистационарном приближении, и, наконец, исследуем влияние стохастичности на нестационарные процессы и отбор стационарных состояний.

1. Стационарная задача теплового взрыва в образце со ступенчатым распределением реакционной способности. Следуя классическим работам, мы записываем уравнение теплового взрыва в одномерной постановке в следующем виде [40]:

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + Fk \exp(\theta) = 0. \quad (1)$$

Здесь θ – безразмерная температура, Fk – число Франк-Каменецкого (критическое значение для единичного отрезка примерно 0.88). Граничные условия для уравнения (1) записываются следующим образом:

$$\frac{d\theta}{d\xi}(0) = 0; \theta(1) = 0. \quad (2)$$

Для численного решения уравнений (1) используется итеративный алгоритм, подробно описанный в [25, 38]: уравнение расщепляется, распределение температуры определяется для заданного распределения источника, затем источник переопределяется для нового распределения температуры; итерации продолжаются до тех пор, пока температура не превышает допустимое значение (происходит тепловой взрыв), либо до установления стационарного состояния.

Мы рассматриваем только вариант с плоской симметрией: цилиндрическая и сферическая симметрия в одномерном случае приводят к неустранимым корреляциям между координатой и распределением реакционной способности.

Рассмотрим случай, когда параметр F_k зависит от координаты. Тогда уравнение (1) при $F_k = \text{const}$ соответствует однородному распределению. Зададим неоднородное распределение, например, зададим функцию $F_k(\xi)$ в виде ступенчатой функции. Кроме того, потребуем, чтобы среднее значение параметра F_k было равно заданной величине $\langle F_k \rangle$. Если реакционная способность образца концентрируется в области, ограниченной координатами b_l и b_r , то получим распределение:

$$F_k(\xi) = \begin{cases} 0, & \xi < b_l \\ C, & b_r \leq \xi < b_l \\ 0, & \xi \geq b_r \end{cases} \quad (3)$$

Если $b_l = 0$, то реагирующий образец покрыт слоем инертного материала; если $b_r = 1$, то реакционноспособный слой нанесен на инертный носитель. Такие постановки задачи теплового взрыва рассматривались в работах [41, 42]. Естественно, что $\langle F_k \rangle = C(b_r - b_l)$, поэтому высота C , в общем случае, больше $\langle F_k \rangle$. Результаты расчетов для ступенчатых (Π -образных) распределений представлены на рис. 1: теплоизоляция ожидаемо снижает критическое значение $\langle F_k \rangle$; расположение реакционноспособного слоя ближе к внешней поверхности позволяет повысить тепловую устойчивость образца.

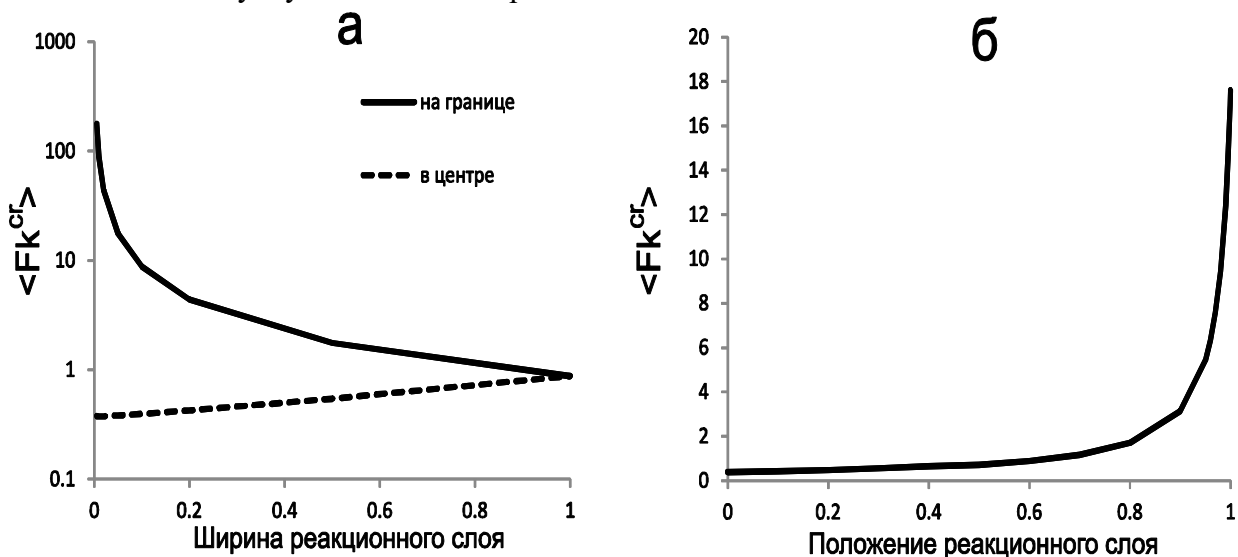


Рис. 1. Зависимость критического значения $\langle F_k \rangle$: от ширины реакционного слоя при его расположении в центре и на внешней границе (а); и от положения реакционного слоя при его постоянной ширине, равной 0.05 (б)

Таким образом, при неоднородном распределении реакционной способности тепловой взрыв в образце возможен при значениях $\langle F_k \rangle$ меньших, чем 0.88; также возможно и устойчивое решение при значениях $\langle F_k \rangle$ больше 0.88. Расчеты для ступенчатых распределений

$Fk(\xi)$ показывают, что расположение реакционного слоя вблизи границ позволяет получить критические значения от 0.3 до 170. Таким образом, при случайном распределении мы можем получать вероятности того, что решение окажется устойчивым или неустойчивым, в зависимости от того, с какой вероятностью произойдет сгущение реакционных центров в разных частях образца. При достаточно больших значениях $\langle Fk \rangle$ будет расти вероятность реализации неустойчивого решения, при малых – вероятность реализации устойчивого решения.

2. Стационарная задача теплового взрыва в образце со стохастическим распределением реакционной способности. В стохастической постановке параметр Fk является случайным полем:

$$Fk(\xi) = \langle Fk \rangle + \eta(\xi). \quad (4)$$

Здесь $\langle Fk \rangle$ - среднее число Франк-Каменецкого, η – случайное слагаемое. Для того, чтобы разные варианты распределения были сопоставимы между собой, необходимо, чтобы среднее значение Fk сохранялось, т.е. $\langle \eta(\xi) \rangle = 0$. Удобно принять, что флуктуации нескоррелированы.

Еще одно необходимое условие – это неотрицательность Fk , поэтому в каждой точке $|\eta(\xi)| \leq \langle Fk \rangle$. Для численного моделирования возьмем генератор случайных чисел в диапазоне (0, 1) и будем задавать случайное распределение Fk по формуле:

$$Fk(\xi) = \langle Fk \rangle \left\{ 1 + \Delta \left[2\eta_0^1(\xi) - 1 \right] \right\}. \quad (5)$$

Здесь Δ – максимальный разброс значений, отклонение от среднего (не превышает 1), η_0^1 – случайное число из диапазона (0, 1). Расчеты проводятся следующим образом: для большого набора случайно сгенерированных распределений $Fk(\xi)$ решается уравнение (1), после чего определяется доля устойчивых и неустойчивых решений. Тогда, задаваясь разными значениями $\langle Fk \rangle$, можно оценить вероятность теплового самовоспламенения в системе со случайным распределением реакционной способности. Для расчетов использовались следующие значения параметров: число узлов сетки – 500; число случайных конфигураций для каждого значения $\langle Fk \rangle$ – 1000; шаг по $\langle Fk \rangle$ – 0.005; шаг по Δ – 0.1.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности зажигания, рассчитанные, как число случайных конфигураций, для которых не было найдено стационарное решение. С увеличением Δ ширина переходной области между безопасными и взрывными режимами увеличивается.

Если принять, что каждое сечение $\Delta = \text{const}$ соответствует своей функции распределения, то можно оценить изменение дисперсии распределения с ростом Δ . На рис. 3 показаны результаты аппроксимации функций плотности вероятности (производных от P_{ign} по $\langle Fk \rangle$) для разных Δ . Можно видеть, что численные результаты хорошо аппроксимируются гауссианами: вероятность зажигания имеет экстремум при изменении $\langle Fk \rangle$. Экстремумы функций плотности распределения (рис. 3) соответствуют точкам перегиба соответствующих функций распределения (рис. 2). Средним (при этом, содержащим наибольшую неопределенность) оказывается значение $\langle Fk \rangle$ для равномерного случая, т.е. классическое критическое значение $Fk = 0.88$. Зависимость дисперсий аппроксимирующих плотностей распределения, приведенных на рис. 3, линейно зависит от Δ (см. рис. 4).

Полученная зависимость позволяет оценивать диапазоны устойчивости для систем со стохастическим распределением реакционной способности. Для заданного уровня отклонений от среднего можно оценить дисперсию плотности вероятности зажигания (при аппроксимации нормальным распределением), и выбрать значение $\langle Fk \rangle$, соответствующее нужному режиму протекания химической реакции.

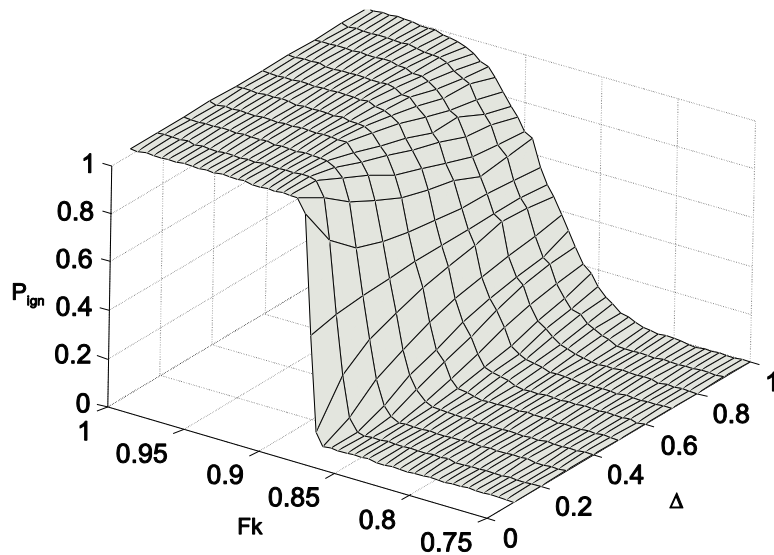


Рис. 2. Зависимость вероятности зажигания от параметров распределения реакционной способности

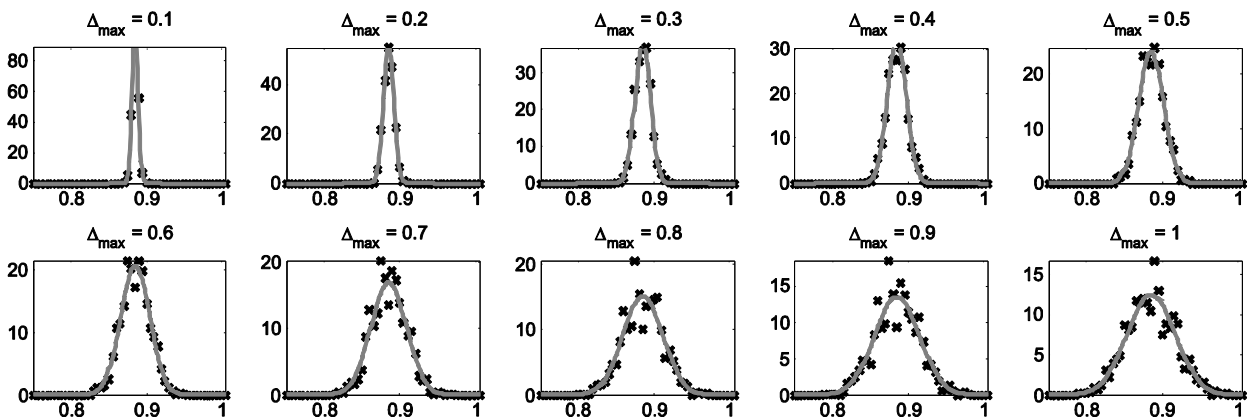


Рис. 3. Аппроксимации плотностей распределения гауссовыми кривыми.

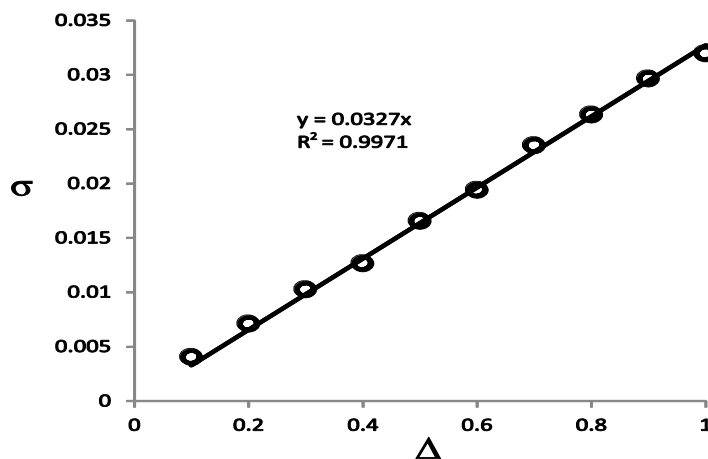


Рис. 4. Зависимость дисперсии вероятности зажигания от максимального отклонения от среднего в формуле (5)

3. Нестационарная задача зажигания в образце со стохастическим распределением реакционной способности. Система уравнений для описания нестационарных процессов в образце с распределенной реакционной способностью записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \text{Da}(\xi) \Theta \varphi \exp\left(\frac{\theta}{1 + \text{Ar}\theta}\right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{1}{\text{Le}} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} - \text{Da}(\xi) \varphi \exp\left(\frac{\theta}{1 + \text{Ar}\theta}\right). \quad (7)$$

Здесь t – безразмерное время (приведенное к скорости тепловой релаксации), Θ – тепловой эффект реакции, φ – концентрация реагента, Le – число Льюиса, Da – число Дамкелера, Ar – число Аррениуса. Граничные условия для температуры и концентрации записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi}(t, 0) = 0; \theta(t, 1) = 0; \frac{\partial \varphi}{\partial \xi}(t, 0) = 0; \varphi(t, 1) = 1. \quad (8)$$

Начальными условиями являются однородно распределенные поля температуры и концентрации:

$$\theta(0, \xi) = 0; \varphi(0, \xi) = 1. \quad (9)$$

Число Дамкелера является случайным полем:

$$\text{Da}(\xi) = \langle \text{Da} \rangle \left\{ 1 + \Delta \left[2\eta_0^1(\xi) - 1 \right] \right\}. \quad (10)$$

Система уравнений (6–10) может служить моделью каталитических процессов для пористых сред (например, слоя насадки) со случайным распределением каталитически активных центров по объему – за счет распределения каталитических центров по поверхности насадки или за счет распределения каталитических гранул в слое инертных частиц. Подобные системы исследовались в работах [1, 39].

Как и в предыдущем разделе, будем искать распределение решений с разными случайными полями с фиксированным средним значением $\langle \text{Da} \rangle = 0.02$. Значения других параметров: $\Theta = 50$, $\text{Le} = 0.5$, $\text{Ar} = 0.02$ (выбраны таким образом, чтобы зажигание достигалось за время порядка нескольких чисел Фурье). Начальным условием является однородное распределение температуры и концентрации. Значение параметра $\langle \text{Fk} \rangle$ для стационарного аналога в этом случае оказывается выше критического ($\langle \text{Fk} \rangle = \langle \text{Da} \rangle \Theta = 1 > 0.88$), поэтому для всех случаев наблюдается устойчивое зажигание (см. рис. 3). При этом, однако, в зависимости от конкретной реализации распределения реакционной способности, время зажигания будет разным. Целью расчетов является получение расчетного распределения времени зажигания при выбранных значениях параметров.

Нестационарные расчеты требуют большего вычислительного времени, поэтому, по сравнению со стационарными расчетами, было выбрано меньшее число реализаций (150 для каждого значения Δ). Разностная схема записывается следующим образом:

$$\frac{\varphi_i - \varphi_i^0}{\tau} = \frac{1}{\text{Le}} \frac{\varphi_{i-1} + \varphi_{i+1} - 2\varphi_i}{h^2} - \text{Da}_i \Theta \varphi_i \exp\left(\frac{\theta_i^0}{1 + \text{Ar}\theta_i^0}\right), \quad (11)$$

$$\frac{\theta_i - \theta_i^0}{\tau} = \frac{\theta_{i-1} + \theta_{i+1} - 2\theta_i}{h^2} + \text{Da}_i \Theta \varphi_i \exp\left(\frac{\theta_i^0}{1 + \text{Ar}\theta_i^0}\right). \quad (12)$$

Схема (11–12) получается из уравнений (6–7) путем дискретизации и расщепления по физическим процессам. Здесь индекс 0 относится к предыдущему временному слою. Как видно из рис. 5, схема (11–12) имеет первый порядок аппроксимации по времени и по пространству (из-за нелинейности и резких градиентов в приграничной области, второй порядок аппроксимации по пространственному шагу остается лишь верхней оценкой). В расчетах используются следующие параметры сетки: $\tau = 8 \times 10^{-3}$; $h = 10^{-3}$. Погрешность определения времени зажигания при этом составляет около 2%.

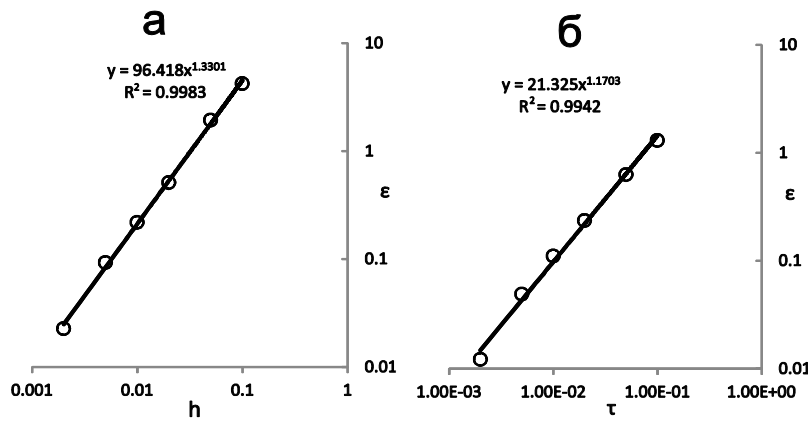


Рис. 5. Определение порядков сходимости разностной схемы (11)-(12):
 ϵ – оценка погрешности численного решения; h – шаг пространственной сетки;
 τ – шаг временной сетки

В отличие от расчетов в предыдущем разделе, нас интересует распределение динамических характеристик. Основной такой характеристикой является время зажигания, которое определяется как время достижения максимальной скорости роста температуры в центре образца. Результаты расчетов приведены на рис. 6 и 7: среднее время зажигания практически не меняется, а зависимость дисперсии распределения времени зажигания от разброса опять можно аппроксимировать прямой линией. Увеличение дисперсии вполне ожидаемо, хотя линейный характер ее зависимости от разброса реакционной способности не очевиден. Вероятно, полученные качественные зависимости будут сохраняться для других значений параметров (положение границы между докритическими и сверхкритическими режимами, как правило, слабо зависит от особенностей уравнения (7)). Для подтверждения этих закономерностей, однако, требуются более развернутые расчеты с варьированием всех параметров задачи.

Отметим, что полученные результаты соответствуют наиболее грубым предположениям о кинетике химических реакций. При переходе к явлениям зажигания даже в простейших газовых системах требуется анализ большого числа одновременно протекающих гомогенных и гетерогенных превращений [43]. Представленные результаты соответствуют условиям, когда тепловое самоускорение и стохастическая природа реагирующей среды являются определяющими факторами.

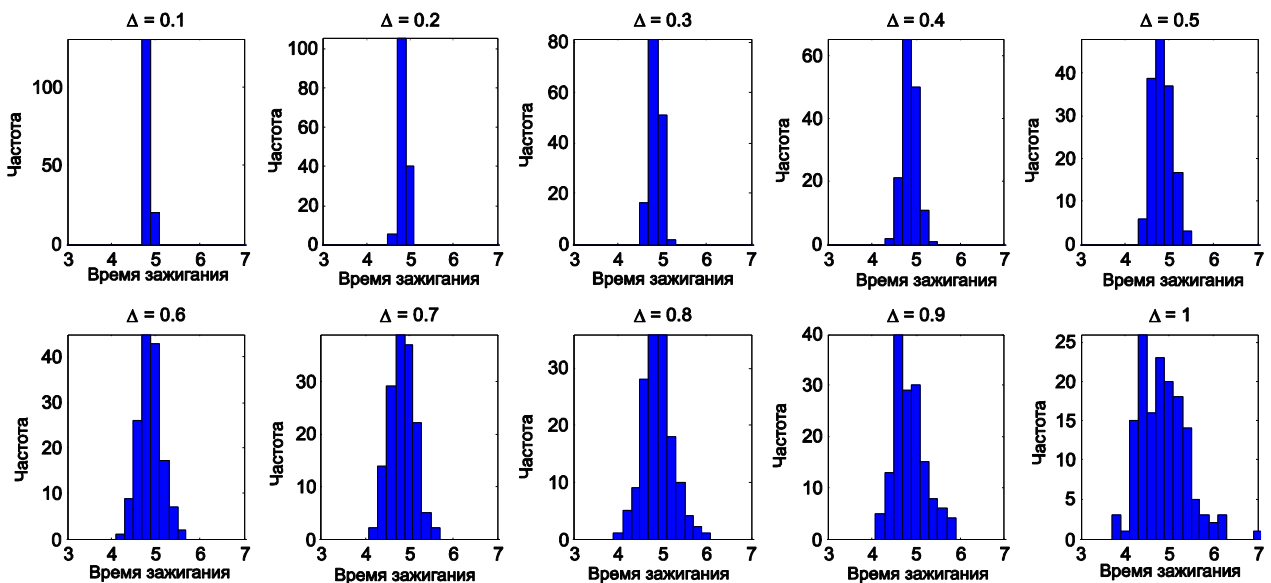


Рис. 6. Распределение времен зажигания (отн. ед.) при разных значениях максимального разброса реакционной способности

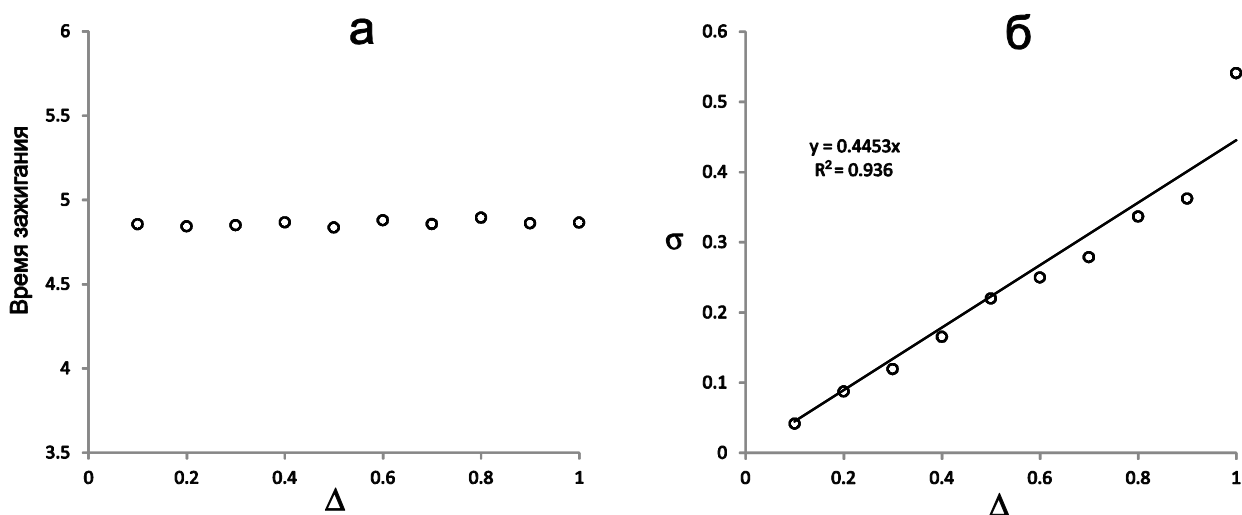


Рис. 7. Зависимость среднего времени зажигания (а) и дисперсии распределения времени зажигания (б) от максимального разброса реакционной способности в формуле (9)

Заключение. В работе проведены расчеты для оценки тепловой устойчивости реагирующих сред со стохастическим полем реакционной способности в одномерном приближении. Расчеты проводятся методом Монте-Карло, параметром является разброс реакционной способности (по физическим соображениям, он меняется от 0 до 1). Анализ результатов показывает, что критическое значение числа Франк-Каменецкого для однородной задачи соответствует точкам перегиба для распределений вероятности зажигания в квазистационарном приближении.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0005) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. с использованием ресурсов ЦКП "Высокотемпературный контур" (Минобрнауки России, проект № 13.ЦКП.21.0038).

Список источников

1. Ganzer G., Freund H. Influence of statistical activity variations in diluted catalyst beds on the thermal reactor behavior: Derivation of an a priori criterion. *Chemical engineering science*, 2020, v. 220, p. 115607, DOI: 10.1016/j.ces.2020.115607.
2. Hareli S., Nave O., Gol'dshtein V. The evolutions in time of probability density functions of polydispersed fuel spray – The continuous mathematical model. *Applied sciences*, 2021, v. 11, p. 9739, DOI:10.3390/app11209739.
3. Dopazo C., O'Brien E.E. An approach to the autoignition of a turbulent mixture. *Acta Astronautica*, 1974, v. 1, pp. 1239-1266, DOI:10.1016/0094-5765(74)90050-2.
4. Fernandez A., Rabitz H. Stochastic theory of ignition processes. *International journal of theoretical physics*, 1987, v. 26, pp. 1093-1105, DOI: 10.1007/BF00669364.
5. Lackmann T., Hewson J.C., Knaus R.C. et al. Stochastic modeling of unsteady extinction in turbulent non-premixed combustion. *Proceedings of the combustion institute*, 2017, v. 36, iss. 2, pp. 1677-1684, DOI:10.1016/j.proci.2016.07.014.
6. Frankowicz M., Mansour M.M., Nicolis G. Stochastic analysis of explosive behaviour: A qualitative approach. *Physica*, 1984, v. 125, iss. 1, pp. 237-246, DOI:10.1016/0378-4371(84)90011-6.
7. van Kampen N.G. Intrinsic fluctuations in explosive reactions. *Journal of statistical physics*, 1987, v. 46, pp. 933-948, DOI:10.1007/BF01011150.
8. Baras F., Nicolis G., Mansour M.M., Turner J.W. Stochastic theory of adiabatic explosion. *Journal of statistical physics*, 1983, v. 32, pp. 1-23, DOI:10.1007/BF01009416.
9. de Pasquale F., Mecozzi A. Theory of chemical fluctuations in thermal explosions. *Physical Review A*, 1985, v. 31, p. 2454. DOI:10.1103/PhysRevA.31.2454.
10. Vlad M.O., Ross J. A stochastic approach to nonequilibrium chain reactions in disordered systems: Breakdown of eikonal approximation. *International journal of thermophysics*, 1997, v. 18, pp. 957-975, DOI:10.1007/BF02575241.
11. Gorecki J., Popielawski J. On the stochastic theory of adiabatic thermal explosion in small systems – Numerical results. *Journal of statistical physics*, 1986, v. 44, pp. 941-954, DOI:10.1007/BF01011916.

12. Gorecki J., Gryko J. The adiabatic thermal explosion in a small system: Comparison of the stochastic approach with the molecular dynamics simulation. *Journal of statistical physics*, 1987, v. 48, pp. 329-342, DOI:10.1007/BF01010412.
13. Vlachos D.G. Stochastic modeling of chemical microreactors with detailed kinetics – induction times and ignitions of H₂ in air. *Chemical engineering science*, 1998, v. 53, pp. 157-168, DOI:10.1016/S0009-2509(97)00275-3.
14. Chou D.-P., Lackner T., Yip S. Fluctuation effects in models of adiabatic explosion. *Journal of statistical physics*, 1992, v. 69, pp. 193-215, DOI:10.1007/BF01053790.
15. Saceres M.O., Nicolis G., Budde C.E. About the shift between the advanced and delayed thermal explosion times. *Chaos, solitons & fractals*, 1995, v. 6, pp. 51-57, DOI:10.1016/0960-0779(95)80010-E.
16. Fedotov S.P., Tretyakov M.V. Stochastic criteria for ignition of single particles. *Combustion science and technology*, 1991, v. 78, pp. 1-6, DOI:10.1080/00102209108951737.
17. van Kampen N.G. *Stochastic processes in physics and chemistry*. Amsterdam, Elsevier, 1992, 480 p.
18. Derevich I., Galdina D. Simulation of thermal explosion of catalytic granule in fluctuating temperature. *Applied mathematics and physics*, 2013, v. 1, pp. 1-7, DOI:10.4236/jamp.2013.15001.
19. Буевич Ю.А. Формирование режимов гетерогенной реакции под воздействием мультипликативного шума / Ю.А. Буевич, С.П. Федотов // *Инженерно-физический журнал*, 1987. – Т. 53. – № 5. – С. 802-807.
20. Nowakowski B., Lemarchand A. Thermal explosion near bifurcation: stochastic features of ignition. *Physica A: Statistical mechanics and its applications*, 2002, v. 311, pp. 80-96, DOI:10.1016/S0378-4371(02)00824-5.
21. Fernandez A., Rabitz H. The scaling of nonequilibrium fluctuations in gaseous thermal explosions. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1988, v. 92, no. 6, pp. 754-760, DOI: 10.1002/bbpc.198800184.
22. Baer M.R., Gartling D.K., Desjardin P.E. Probabilistic models for reactive behaviour in heterogeneous condensed phase media. *Combustion theory and modelling*, 2012, v. 16, pp. 75-106, DOI:10.1080/13647830.2011.606916.
23. Fedotov S.P. Statistical model of the thermal ignition of a distributed system. *Combustion and flame*, 1992, v. 91, no. 1, pp. 65-70, DOI:10.1016/0010-2180(92)90127-B.
24. Fedotov S.P. Stochastic analysis of the thermal ignition of a distributed explosive system. *Physics letters A*. – 1993, v. 176, pp. 220-224, DOI:10.1016/0375-9601(93)91038-7.
25. Донской И.Г. Стационарное уравнение теплового взрыва в среде с распределенной энергией активации: численное решение и приближения / И.Г. Донской // *iPolytech Journal*, 2022. – Т. 26. – № 4. – С. 626-639. – DOI: 10.21285/1814-3520-2022-4-626-639.
26. Sofekun O.A., Rollins D.K., Doraiswamy L.K. A random particle model for catalyst dilution. *Chemical engineering science*, 1994, v. 49, iss. 16, pp. 2611-2620, DOI:10.1016/0009-2509(94)E0053-S.
27. Calverley E.M., Witt P.M., Sweeney J.D. Reactor runaway due to statistically driven axial activity variations in graded catalyst beds. *Chemical engineering science*, 2012, v. 80, pp. 393-401, DOI:10.1016/j.ces.2012.06.047.
28. Du Y., Wang C., Che D., Mathews J.P. The influence of char particle morphology on char burnout behavior by atomistic simulation. *Fuel*, 2022, v. 314, p. 123129, DOI:10.1016/j.fuel.2022.123129.
29. Goroshin S., Palecka J., Bergthorson J.M. Some fundamental aspects of laminar flames in nonvolatile solid fuel suspensions. *Progress in energy and combustion science*, 2022, v. 91, p. 100994, DOI:10.1016/j.peccs.2022.100994.
30. Рашковский С.А. Очаговое горение гетерогенных конденсированных смесей. Тепловая перколяция / С.А. Рашковский // *Физика горения и взрыва*, 2005. – Т. 41. – № 1. – С. 41-54.
31. Гринчук П.С. Влияние стохастичности пространственного распределения частиц газозвеси на распространение фронта пламени / П.С. Гринчук // *Физика горения и взрыва*, 2014. – Т. 50. – № 3. – С. 32-42.
32. Schiulaz M., Laumann C.R., Balatsky A.V., Spivak B.Z. Theory of deflagration in disordered media. *Physical Review E*, 2017, v. 95, p. 032103, DOI: 10.1103/PhysRevE.95.032103.
33. Oberlack M., Arlitt R., Peters N. On stochastic Damkohler number variations in a homogeneous flow reactor. *Combustion theory and modelling*, 2000, v. 4, p. 495, DOI: 10.1088/1364-7830/4/4/307.
34. Chen J.-Y. Stochastic modeling of partially stirred reactors. *Combustion science and technology*, 1997, v. 122, pp. 63-94, DOI:10.1080/00102209708935605.
35. Iavarone S., Pequin A., Chen Z.X. et al. An a priori assessment of the Partially Stirred Reactor (PaSR) model for MILD combustion. *Proceedings of the combustion institute*, 2021, v. 38, iss. 4, pp. 5403-5414, DOI:10.1016/j.proci.2020.06.234.
36. Медведев В.Г. Статистический анализ кинетики адиабатического теплового взрыва / В.Г. Медведев, В.Г. Телегин, Г.Г. Телегин // *Физика горения и взрыва*, 2009. – № 3. – С. 44-48.
37. Fischer M., Vignes A. An imprecise bayesian approach to thermal runaway probability. *Proceedings of the 12th International symposium on imprecise probability: Theories and applications (PMLR)*, 2021, v. 147, pp 150-160.
38. Деревич И.В. Математическая модель катализатора синтеза с локальными центрами реакции / И.В. Деревич, А.Ю. Фокина // *Математика и математическое моделирование*, 2017. – № 3. – С. 13-31.

39. Derevich I.V., Ermolaev V.S., Mordkovich V.Z. et al. Heat and mass transfer in Fischer–Tropsch catalytic granule with localized cobalt microparticles. *Journal of heat and mass transfer*, 2018, v. 121, pp. 1335-1349, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.077.
40. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
41. Колесников А.К. Тепловой взрыв в слое реагирующей жидкости, ограниченном массивами разной теплопроводности / А.К. Колесников // *Физика горения и взрыва*. – 1984. – № 2. – С. 91-94.
42. Gainutdinov R.S. Conjugate problem of thermal explosion. *Journal of engineering physics and thermophysics*, 1999, v. 72, pp. 181-185, DOI:10.1007/BF02699135.
43. Козлова М.А. Построение графа химических реакций для анализа реагирующих систем / М.А. Козлова, В.А. Шаманский // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*, 2022. – № 4. – С. 108-118, DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.008.

Донской Игорь Геннадьевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории термодинамики ИСЭМ СО РАН, AuthorID: 670547, SPIN: 9616-0926, ORCID: 0000-0003-2309-8461, donskoy.chem@mail.ru.

Гросс Егор Иванович. Студент ИрНИТУ, кафедра радиоэлектроники и телекоммуникационных систем, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

UDC 544.45; 519.245

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.006

Numerical analysis of thermal ignition statistics in a stochastic reacting medium

Igor G. Donskoy¹, Egor I. Gross²

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
Russia, Irkutsk, donskoy.chem@mail.ru

²National Research Irkutsk State Technical University, Russia, Irkutsk

Abstract. In this work, we use numerical modeling, to study the behavior of reacting media with a stochastic spatial distribution of reactivity. The aim is to determine the boundaries of thermal stability and ignition behavior under supercritical conditions for such systems. These problems are solved numerically using the Monte Carlo method. The simulation results are analyzed and the statistical characteristics of ignition processes in stationary and non-stationary settings are assessed. The results of the work can be useful in analyzing the behavior of chemical systems with a random distribution of reacting components.

Keywords: stochastic process, thermal explosion, critical conditions, mathematical modeling

Acknowledgements: The research was carried out under State Assignment Project (no. FWEU-2021-0005) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030 using the resources of the High-Temperature Circuit Multi-Access Research Center (Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no 13.СКР.21.0038).

References

1. Ganzer G., Freund H. Influence of statistical activity variations in diluted catalyst beds on the thermal reactor behavior: Derivation of an a priori criterion. *Chemical engineering science*, 2020, v. 220, p. 115607, DOI: 10.1016/j.ces.2020.115607.
2. Hareli S., Nave O., Gol'dshtein V. The evolutions in time of probability density functions of polydispersed fuel spray – The continuous mathematical model. *Applied sciences*, 2021, v. 11, p. 9739, DOI:10.3390/app11209739.
3. Dopazo C., O'Brien E.E. An approach to the autoignition of a turbulent mixture. *Acta Astronautica*, 1974, v. 1, pp. 1239-1266, DOI:10.1016/0094-5765(74)90050-2.
4. Fernandez A., Rabitz H. Stochastic theory of ignition processes. *International journal of theoretical physics*, 1987, v. 26, pp. 1093-1105, DOI: 10.1007/BF00669364.
5. Lackmann T., Hewson J.C., Knaus R.C. et al. Stochastic modeling of unsteady extinction in turbulent non-premixed combustion. *Proceedings of the combustion institute*, 2017, v. 36, iss. 2, pp. 1677-1684, DOI:10.1016/j.proci.2016.07.014.

6. Frankowicz M., Mansour M.M., Nicolis G. Stochastic analysis of explosive behaviour: A qualitative approach. *Physica*, 1984, v. 125, iss. 1, pp. 237-246, DOI:10.1016/0378-4371(84)90011-6.
7. van Kampen N.G. Intrinsic fluctuations in explosive reactions. *Journal of statistical physics*, 1987, v. 46, pp. 933-948, DOI:10.1007/BF01011150.
8. Baras F., Nicolis G., Mansour M.M., Turner J.W. Stochastic theory of adiabatic explosion. *Journal of statistical physics*, 1983, v. 32, pp. 1-23, DOI:10.1007/BF01009416.
9. de Pasquale F., Mecozzi A. Theory of chemical fluctuations in thermal explosions. *Physical Review A*, 1985, v. 31, p. 2454. DOI:10.1103/PhysRevA.31.2454.
10. Vlad M.O., Ross J. A stochastic approach to nonequilibrium chain reactions in disordered systems: Breakdown of eikonal approximation. *International journal of thermophysics*, 1997, v. 18, pp. 957-975, DOI:10.1007/BF02575241.
11. Gorecki J., Popielawski J. On the stochastic theory of adiabatic thermal explosion in small systems – Numerical results. *Journal of statistical physics*, 1986, v. 44, pp. 941-954, DOI:10.1007/BF01011916.
12. Gorecki J., Gryko J. The adiabatic thermal explosion in a small system: Comparison of the stochastic approach with the molecular dynamics simulation. *Journal of statistical physics*, 1987, v. 48, pp. 329-342, DOI:10.1007/BF01010412.
13. Vlachos D.G. Stochastic modeling of chemical microreactors with detailed kinetics – induction times and ignitions of H₂ in air. *Chemical engineering science*, 1998, v. 53, pp. 157-168, DOI:10.1016/S0009-2509(97)00275-3.
14. Chou D.-P., Lackner T., Yip S. Fluctuation effects in models of adiabatic explosion. *Journal of statistical physics*, 1992, v. 69, pp. 193-215, DOI:10.1007/BF01053790.
15. Caceres M.O., Nicolis G., Budde C.E. About the shift between the advanced and delayed thermal explosion times. *Chaos, solitons & fractals*, 1995, v. 6, pp. 51-57, DOI:10.1016/0960-0779(95)80010-E.
16. Fedotov S.P., Tret'yakov M.V. Stochastic criteria for ignition of single particles. *Combustion science and technology*, 1991, v. 78, pp. 1-6, DOI:10.1080/00102209108951737.
17. van Kampen N.G. *Stochastic processes in physics and chemistry*. Amsterdam, Elsevier, 1992, 480 p.
18. Derevich I., Galdina D. Simulation of thermal explosion of catalytic granule in fluctuating temperature. *Applied mathematics and physics*, 2013, v. 1, pp. 1-7, DOI:10.4236/jamp.2013.15001.
19. Buyevich Yu.A., Fedotov S.P. Formirovaniye rezhimov geterogennoj reaktzii pod vozdeystviem mul'tiplikativnogo shuma [Formation of heterogeneous reaction modes under the influence of multiplicative noise]. *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal [Engineering-physical journal]*, 1987, v. 53, no. 5, pp. 802-807.
20. Nowakowski B., Lemarchand A. Thermal explosion near bifurcation: stochastic features of ignition. *Physica A: Statistical mechanics and its applications*, 2002, v. 311, pp. 80-96, DOI:10.1016/S0378-4371(02)00824-5.
21. Fernandez A., Rabitz H. The scaling of nonequilibrium fluctuations in gaseous thermal explosions. *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie*, 1988, v. 92, no. 6, pp. 754-760, DOI: 10.1002/bbpc.198800184.
22. Baer M.R., Gartling D.K., Desjardin P.E. Probabilistic models for reactive behaviour in heterogeneous condensed phase media. *Combustion theory and modelling*, 2012, v. 16, pp. 75-106, DOI:10.1080/13647830.2011.606916.
23. Fedotov S.P. Statistical model of the thermal ignition of a distributed system. *Combustion and flame*, 1992, v. 91, no. 1, pp. 65-70, DOI:10.1016/0010-2180(92)90127-B.
24. Fedotov S.P. Stochastic analysis of the thermal ignition of a distributed explosive system. *Physics letters A*. – 1993, v. 176, pp. 220-224, DOI:10.1016/0375-9601(93)91038-7.
25. Donskoy I.G. Statsionarnoye uravneniye teplovogo vzryva v srede s raspredelennoy energiyey aktivatsii: chislennoye resheniye i priblizheniya [Steady-state equation of thermal explosion in a distributed activation energy medium: numerical solution and approximations]. *iPolytech Journal*, 2022, v. 26, no. 4, pp. 626-639, DOI:10.21285/1814-3520-2022-4-626-639.
26. Sofekun O.A., Rollins D.K., Doraiswamy L.K. A random particle model for catalyst dilution. *Chemical engineering science*, 1994, v. 49, iss. 16, pp. 2611-2620, DOI:10.1016/0009-2509(94)E0053-S.
27. Calverley E.M., Witt P.M., Sweeney J.D. Reactor runaway due to statistically driven axial activity variations in graded catalyst beds. *Chemical engineering science*, 2012, v. 80, pp. 393-401, DOI:10.1016/j.ces.2012.06.047.
28. Du Y., Wang C., Che D., Mathews J.P. The influence of char particle morphology on char burnout behavior by atomistic simulation. *Fuel*, 2022, v. 314, p. 123129, DOI:10.1016/j.fuel.2022.123129.
29. Goroshin S., Palecka J., Bergthorson J.M. Some fundamental aspects of laminar flames in nonvolatile solid fuel suspensions. *Progress in energy and combustion science*, 2022, v. 91, p. 100994, DOI:10.1016/j.pecs.2022.100994.
30. Rashkovskij S.A. Ochagovoe gorenje geterogennykh kondensirovannykh smesey. Teplovaja perkoljatsija [Focal combustion of heterogeneous condensed mixtures. Thermal percolation]. *Fizika gorenija i vzryva [Combustion, Explosion and Shock Waves]*, 2005, v. 41, no. 1, pp. 41-54.

31. Grinchuk P.S. Vlijanie stokhastichnosti prostranstvennogo raspredelenija chastits gazovzvesi na rasprostranenie fronta plameni [Effect of stochasticity of the spatial distribution of particles in a gas suspension on combustion front propagation]. Fizika gorenija i vzryva [Combustion, Explosion and Shock Waves], 2014, v. 50, no. 3, pp. 32-42
32. Schiulaz M., Laumann C.R., Balatsky A.V., Spivak B.Z. Theory of deflagration in disordered media. Physical Review E, 2017, v. 95, p. 032103, DOI: 10.1103/PhysRevE.95.032103.
33. Oberlack M., Arlitt R., Peters N. On stochastic Damkohler number variations in a homogeneous flow reactor. Combustion theory and modelling, 2000, v. 4, p. 495, DOI: 10.1088/1364-7830/4/4/307.
34. Chen J.-Y. Stochastic modeling of partially stirred reactors. Combustion science and technology, 1997, v. 122, pp. 63-94, DOI:10.1080/00102209708935605.
35. Iavarone S., Pequin A., Chen Z.X. et al. An a priori assessment of the Partially Stirred Reactor (PaSR) model for MILD combustion. Proceedings of the combustion institute, 2021, v. 38, iss. 4, pp. 5403-5414, DOI:10.1016/j.proci.2020.06.234.
36. Medvedev V.G., Telegin V.G., Telegin G.G. Statisticheskij analiz kinetiki adiabaticheskogo teplovogo vzryva [Statistical analysis of kinetics of an adiabatic thermal explosion]. Fizika gorenija i vzryva [Combustion, explosion and shock waves], 2009, no. 3, pp. 44-48.
37. Fischer M., Vignes A. An imprecise bayesian approach to thermal runaway probability. Proceedings of the 12th International symposium on imprecise probability: Theories and applications (PMLR), 2021, v. 147, pp 150-160.
38. Derevich I.V., Fokina A.Ju. Matematicheskaja model' katalizatora sinteza s local'nymi tsentrami reaktsii [Mathematical model of synthesis catalyst with local reaction centers]. Matematika i matematicheskoe modelirovanie [Mathematics I mathematical modelling], 2017, no 3, pp. 13-31, DOI:10.24108/mathm.0317.0000071.
39. Derevich I.V., Ermolaev V.S., Mordkovich V.Z. et al. Heat and mass transfer in Fischer–Tropsch catalytic granule with localized cobalt microparticles. Journal of heat and mass transfer, 2018, v. 121, pp. 1335-1349, DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.077.
40. Frank-Kamenetskii D.A. Diffuzija i teploperedacha v khimicheskij kinetike [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow, Nauka [Science], 1987, 502 p.
41. Kolesnikov A.K. Teplovoj vzryv v sloe reagirujuschej zhidkosti, ogranichennoj massivami raznoj teplovopodnosti [Thermal explosion in a layer of reacting liquid bounded by arrays of different thermal conductivities]. Fizika gorenija i vzryva [Combustion, explosion and shock waves], 1984, no. 2, pp. 91-94.
42. Gainutdinov R.S. Conjugate problem of thermal explosion. Journal of engineering physics and thermophysics, 1999, v. 72, pp. 181-185, DOI:10.1007/BF02699135.
43. Kozlova M.A., Shamanskij V.A. Postroenie grafa khimicheskikh reaktsij dlja analiza reagirujuschikh system [Application of graphs for the analysis of the mechanism of chemical kinetics]. Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2022, no. 4, pp. 108-118, DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.008.

Donskoy Igor Gennad'evich. Candidate of sciences (Eng.), senior researcher in the laboratory of Thermodynamics of Melentiev energy systems institute, AuthorID: 670547, SPIN: 9616-0926, ORCID: 0000-0003-2309-8461, donskoy.chem@mail.ru.

Gross Egor Ivanovich. Student in Irkutsk state technical university. 664033, Russia, Irkutsk, Lermontova st., 130.

Статья поступила в редакцию 18.10.2023; одобрена после рецензирования 08.02.2024; принята к публикации 05.03.2024.

The article was submitted 10/18/2023; approved after reviewing 02/08/2024; accepted for publication 03/05/2024.

Математическое моделирование интенсивности водопотребления различными типами водоразборных устройств

Поливанов Дмитрий Евгеньевич, Семенов Алексей Александрович,
Яркова Ольга Николаевна

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, Санкт-Петербург, dmitry_polivanov@mail.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования интенсивности водопотребления различными типами водоразборных устройств (смесителями кухонной мойки и ванны (душевой кабины), унитазом со смывным бачком, стиральной и посудомоечной машинами), использующими воду из системы водоснабжения. Выполнена оценка теоретических законов распределения величины секундного расхода воды и их параметров. Выполнена оценка однородности эмпирических выборок значений секундного расхода воды и теоретических законов распределения. Выполнен выбор наилучших теоретических законов распределения при уровне значимости $\alpha = 0.05$. В результате исследования была предложена классификация водоразборных устройств по изменчивости интенсивности водопотребления, а также оценены и обоснованы теоретические законы распределения, наилучшим образом описывающие интенсивность водопотребления различными типами водоразборных устройств.

Ключевые слова: математическое моделирование, вероятностная модель, теоретический закон распределения, система водоснабжения, стохастический характер

Цитирование: Поливанов Д.Е. Математическое моделирование интенсивности водопотребления различными типами водоразборных устройств / Д.Е. Поливанов, А.А. Семенов, О.Н. Яркова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 78-92. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.007.

Введение. Водопотребление является одним из основных процессов, обеспечивающих удовлетворение ряда потребностей современного общества, а также неотъемлемой частью как производственного цикла промышленных предприятий, так и жизнедеятельности обычного человека.

Процесс реального водопотребления является сложным и многофакторным [1]. Непредсказуемость его изменчивости во времени может быть обусловлена огромным количеством причин, таких как: режим работы (жизни) потребителей, их количество [2], частота и продолжительность использования оборудования, характеристики используемого оборудования, давление в системе водоснабжения, этажность здания, срок эксплуатации системы водоснабжения и качество ее обслуживания [3], конкретный период водопотребления (время года, месяц, день недели), а также географические, климатические и социально-экономические условия и культурные привычки (психофизиологические факторы) [4].

Большое количество причин, от которых зависит фактическое водопотребление, в совокупности с отсутствием возможности их учета, как величин, однозначно влияющих на конечный результат, определяют стохастическую природу процесса водопотребления. Случайность и неопределенность данного процесса подчеркивалась в работах многих отечественных (например, в работе С.Н. Карамбинова, Д.А. Манукьяна, Л.Б. Бекишевой [5], работе Н.Н. Новицкого, О.В. Вантеевой [6]) и зарубежных авторов (например, в работе I. Vertommen, R. Magini, M. Cunha [7], работе S.G. Buchberger, L. Wu [8] и работе S. Alvisi, M. Franchini, A. Marinelli [9]), занимающихся вопросами определения расхода воды в системах водоснабжения и разработки математических моделей водопотребления.

Другое объяснение стохастической природы водопотребления заключается в неопределенности и случайности составляющих данного процесса, к которым относятся интенсивность, продолжительность и частота использования водоразборных устройств (водоразборной аппаратуры и бытового оборудования) [8].

Совокупность вышеперечисленных факторов делает прогнозирование водопотребления сложной, но в то же самое время базовой задачей, решение которой требует значительных объемов экспериментальных исследований и тем самым осложняет создание достоверной математической модели спроса на воду [1, 10, 11].

При этом, насколько бы сложной ни была данная задача, ее решение не может быть оставлено без внимания. Моделирование водопотребления важно при рассмотрении целого ряда вопросов, таких, как: экономия воды в регионах с ее нехваткой и рациональное управление водными ресурсами [12], обеспечение надежного водоснабжения, экономия энергоресурсов предприятий водопроводно-канализационного хозяйства и иных организаций [13], минимизация капитальных затрат на возведение сетей и сооружений водоснабжения [14], обеспечение достаточных скоростей движения воды в трубопроводах для минимизации накопления в них отложений [15], предотвращение потери качества транспортируемой потребителю воды [16] и т.д.

Исследования и попытки прогнозирования водопотребления предпринимались, начиная с тридцатых годов двадцатого века. Одними из основоположников данных исследований были С. А. Курсин (СССР) и Р. Б. Хантер (США) [17]. Впоследствии, их теория была развита и доработана Л. А. Шопенским на основании проведенного комплекса исследований в шестидесятых – семидесятых годах двадцатого века. Разработанная Л. А. Шопенским методика расчета была заложена в основу нормативных документов, регламентирующих расчет расходов в системах водоснабжения [17, 18]. За время своего существования, данная методика претерпела некоторые незначительные изменения и используется в практике отечественного проектирования для выполнения расчета расходов в системах водоснабжения по настоящее время [17].

Исследованию и вероятностному моделированию процесса водопотребления также посвящен и ряд публикаций зарубежных авторов. В относительно недавних исследованиях (1995 – 2023 гг.) достаточно успешно применялась общая гипотеза о том, что процесс водопотребления может быть представлен в виде последовательности прямоугольных импульсов. При этом разными авторами разрабатывались и использовались разные модели.

Одними из первых стохастическую модель водопотребления предложили Buchberger и Wu [8]. По мнению авторов, спрос на воду в жилом здании на одну семью может быть описан при помощи неоднородного Пуассоновского процесса (PPR). Данная модель показала неплохие результаты при оценке ее адекватности [19], но имела и ряд недостатков [3].

В 2003 году Alvisi, Franchini и Marinelli предложили использовать для описания процесса водопотребления кластерный стохастический процесс Неймана – Скотта (NSRP) [9], а в 2005 году Blokker и Vreeburg разработали прогнозирующую модель конечного использования [15].

Со временем интерес к моделированию процесса водопотребления все возрастает, а вопросы разработки наиболее исчерпывающей и точной модели водопотребления становятся все более актуальными [20]. Например, в [4] авторы, продолжая развивать модель конечного использования, выполнили более точную оценку потребления воды в домохозяйствах за счет мониторинга с высоким временным разрешением (интервал регистрации событий составил 1 секунду).

В любом случае, для разработки имитационной вероятностной математической модели водопотребления требуется выполнить оценку и обоснование теоретических законов распределения (и их параметров) значений каждой из составляющих процесса водопотребления (интенсивности, продолжительности и частоты использования водоразборных устройств).

В настоящей статье представлены результаты исследования интенсивности водопотребления различными типами водоразборных устройств (смесителями кухонной мойки и ванны (душевой кабины), унитазом со смывным бачком, стиральной и посудомоечной машинами),

использующими воду из системы водоснабжения при давлении не ниже установленного в действующих нормативных документах.

Целью работы является оценка и обоснование теоретических законов распределения величины расхода воды, возникающего при эксплуатации водоразборных устройств, установленных в отдельных точках системы внутреннего водоснабжения зданий (элементарных расходов).

Объектом исследования являются наиболее распространенные типы водоразборных устройств.

Предметом исследования является величина секундного расхода воды различными водоразборными устройствами.

Задачами исследования являются:

- получение статистических данных о значениях секундного расхода воды, возникающих при работе наиболее распространенных типов водоразборных устройств;
- построение графиков (гистограмм и кривых) плотности распределения значений секундного расхода воды на основе эмпирических данных;
- классификация водоразборных устройств по характеру изменчивости значений секундного расхода воды в процессе эксплуатации;
- выявление закономерностей режимов водопотребления различными типами водоразборных устройств (оценка и обоснование законов распределения значений секундного расхода воды).

1. Материалы и методы. При выполнении исследования был получен набор статистических данных, содержащий сведения о зарегистрированной величине расхода воды в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения в местах их непосредственного подключения к водоразборным устройствам. Исследование проводилось на наиболее распространенных типах водоразборных устройств, таких как:

- 1) смеситель кухонной мойки;
- 2) смеситель ванны (душевой кабины);
- 3) унитаз со смывным бачком;
- 4) стиральная машина;
- 5) посудомоечная машина.

Наблюдение за системой водоснабжения выполнялось круглосуточно, без перерывов. Регистрация значений расхода воды в трубопроводах производилась каждую секунду. Сбор, обработка, запись, временное хранение и последующая передача данных выполнялись автоматизированным способом при помощи системы, разработанной автором данной статьи и подробно описанной в [21], а также сети Internet. Количество измерений, выполненных каждым датчиком, определялось суммарным временем работы конкретного водоразборного устройства в рассматриваемый период времени и, в силу стохастической природы процесса водопотребления, является случайной величиной. Периоды времени, когда расход воды в трубопроводах отсутствовал (время простоя) системой игнорировались. Контроль корректности передаваемых данных выполнялся при помощи видеофиксации работы приборов учета водопотребления, являющихся поверенным средством измерения. Конкретное время (период) и продолжительность выполняемых мероприятий по контролю выбирались случайным образом.

Длительность эксперимента (проводимого исследования) составила 93 дня (период с 05.06.2023 г. по 02.10.2023 г. включительно без учета дней, в которые система водоснабжения не использовалась).

Исследование режима работы наиболее распространенных типов водоразборных устройств было выполнено в следующих условиях:

- назначение здания – жилое;
- место расположения водоразборных устройств – квартира;
- типы смесителей – рычажные (наборный и настенный с душевой сеткой на гибком шланге);
- количество потребителей – 2 человека;
- давление в системе холодного водоснабжения – 196,13 – 215,75 кПа;
- давление в системе горячего водоснабжения – 264,78 – 284,39 кПа;
- места установки датчиков – трубопроводы систем холодного и горячего водоснабжения непосредственно перед подключением к каждой из исследуемых водоразборных точек.

Условия проведения эксперимента выбирались таким образом, чтобы была возможность наблюдения за процессом водопотребления при давлении в системе водоснабжения не ниже установленного в действующих нормативных документах.

Для обработки и анализа полученных данных использовались методы теории вероятностей и математической статистики. Обработка данных выполнялась в разработанной авторами программе на языке C#, а визуализация результатов и статистический анализ – в разработанной авторами программе на языке R.

Полученный в результате исследования общий набор статистических данных о величине секундного расхода воды в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения был разделен на группы по типам водоразборных устройств, для которых выполнялись измерения. Затем данные были обработаны и сгруппированы по интервалам. Количество интервалов для группировки данных определялось по правилу Стерджеса [22]:

$$k = 1 + 3.322 \cdot \lg n,$$

где k – оптимальное количество интервалов, n – объем выборки.

Полученное значение было округлено до ближайшего меньшего целого числа.

Визуализация результатов, а именно построение гистограмм и кривых плотности вероятности по обработанным эмпирическим данным, выполнялась в среде разработки R Studio в разработанной авторами программе на языке R.

Первичная оценка теоретических законов распределения величины секундного расхода воды в трубопроводе была выполнена в результате использования комбинации следующих двух способов [23]:

- 1) в результате анализа статистических оценок эмпирических данных;
- 2) на основании сравнительной оценки графиков плотности и функции распределения, построенных по эмпирическим данным, с известными теоретическими законами распределения.

Также, при выдвижении гипотезы о теоретических законах распределения, авторы руководствовались, в том числе, соображениями о природе исследуемых процессов с учетом ранее опубликованных работ других авторов [4, 8, 9, 15, 24].

Оценка параметров рассматриваемых видов распределений выполнялась методом максимального правдоподобия. Выбор данного метода обусловлен его наилучшими асимптотическими свойствами [25].

Представление любого набора эмпирических данных в виде теоретического закона распределения всегда является некоторым приближением и фактически отклонения эмпирических значений от теоретических неизбежны. Причиной отклонений является тот факт, что количество непрерывных законов распределения, используемых в задачах статистического анализа, немногим превышает 100. В прикладных же исследованиях используется порядка 30. Совершенно естественно, что данные законы не могут в точности описать все случайные величины, которые встречаются на практике [26].

При этом имеющиеся методы математической статистики позволяют оценить однородность эмпирических данных и теоретических законов распределения при заданном уровне значимости, который был принят $\alpha = 0.05$.

В данном исследовании для оценки однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения был применен критерий Колмогорова [27]. Статистика критерия определялась по формуле:

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|,$$

где $F_n(x)$ и $F(x)$ – эмпирическая и теоретическая функции распределения соответственно, D_n – статистика критерия.

Расчет уровня значимости и статистики критерия был выполнен в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции «ks.test» из пакета «stats». При этом были учтены особенности применения статистических методов для выборок большого объема, изложенные в [25, 28].

Степень соответствия экспериментальных данных теоретическому закону распределения определялась по методу, изложенному в [29]. Оценка принадлежности эмпирических выборок нормальному закону распределения выполнялась на основании рассчитанного критерия Шапиро – Уилка. Учитывая, что большой объем рассматриваемых выборок может вызвать проблемы в применении приведенного критерия [25], оценка однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения была выполнена по репрезентативным выборкам меньшего объема [28].

В результате анализа значений полученных статистик и p_{value} , рассчитанных в разработанной авторами программе на языке R, был сделан вывод о наиболее вероятном теоретическом законе распределения значений секундного расхода воды для каждого типа водоразборных устройств.

2. Результаты и обсуждение. В ходе выполненного исследования было получено 324349 результатов измерений секундного расхода воды для всех рассматриваемых водоразборных точек. Количество выполненных измерений с распределением по типам водоразборных устройств, а также сведения о количестве интервалов для группировки результатов измерений, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество выполненных измерений для каждого из водоразборных устройств

Место установки датчика расхода воды	Условное обозначение места установки датчика	Количество выполненных измерений
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смесителю кухонной мойки	СмКх	32 125
Трубопровод горячего водоснабжения, подающий воду к смесителю кухонной мойки	СмКг	25 247
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смесителю ванны	СмВх	53 001
Трубопровод горячего водоснабжения, подающий воду к смесителю ванны	СмВг	78 751
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смывному бачку унитаза	Ух	105 746

Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к посудомоечной машине	Пмх	15 542
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к стиральной машине	Стх	13 937

Дальнейший анализ полученных значений выполнялся отдельно для каждого типа водоразборных устройств. В результате выполненной проверки корректности фиксируемых значений расхода в 100 % случаев был получен удовлетворительный результат. Максимальные отклонения сопоставляемых значений (полученных автоматизированным способом и путем наблюдения за работой приборов учета) составили не более 0,5%, что является приемлемым результатом и не превышает указанной в паспорте погрешности измерений используемых приборов учета.

По обработанным и сгруппированным эмпирическим данным в программе, разработанной авторами на языке R в среде разработки R Studio, было выполнено построение графиков (гистограмм и кривых) плотности распределения значений секундного расхода воды для каждой из эмпирических выборок (рисунок 1). Ось ординат соответствует значениям плотности вероятности, ось абсцисс – значениям секундного расхода воды в трубопроводе (в л/с).

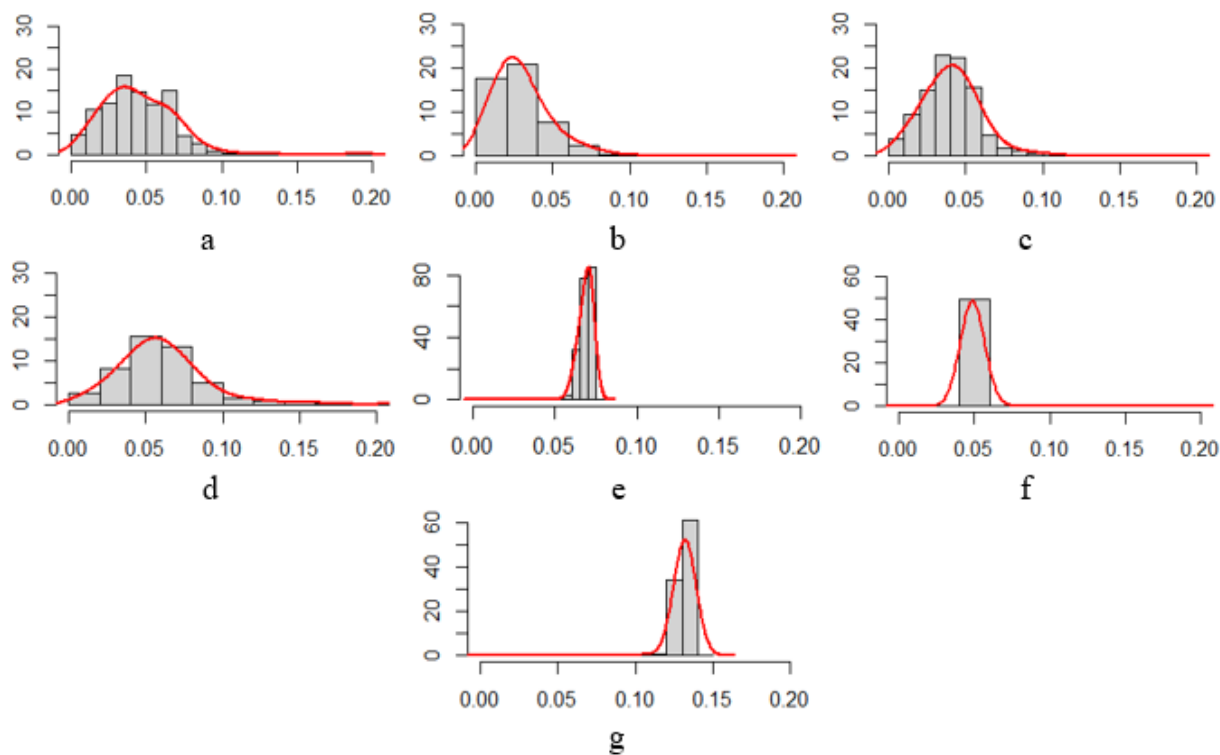


Рис. 1. Гистограммы и кривые плотности распределения эмпирических значений секундного расхода воды (а – СмКх, б – СмКг, с – СмВх, d – СмВг, e – Ух, f – Пмх, g – Стх)

Также, для повышения достоверности первичной оценки вида распределения, по полученным эмпирическим выборкам были определены оценки числовых характеристик случайной величины секундного расхода воды. Принимая во внимание тот факт, что все операции выполнялись с выборочной совокупностью, в процессе расчетов была сделана поправка и вычислены исправленные (несмещенные) числовые характеристики случайной величины.

Наименования числовых характеристик и значения их оценок, полученные по эмпирическим выборкам, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Оценки основных числовых характеристик значений секундного расхода воды

Показатель	Место установки датчика расхода воды						
	СмКх	СмКг	СмВх	СмВг	Ух	Пмх	Стх
Характеристики положения							
Оценка моды $\hat{M}o_{q_0}$, л/с	0,069	0,023	0,036	0,052	0,072	0,049	0,133
Оценка медианы $\hat{M}e_{q_0}$, л/с	0,041	0,026	0,040	0,058	0,069	0,049	0,133
Оценка математического ожидания \hat{m}_{q_0} , л/с	0,047	0,030	0,041	0,063	0,069	0,049	0,129
Характеристики рассеяния							
Оценка дисперсии \hat{D}_{q_0} , (л/с) ²	0,00079	0,00040	0,00036	0,00126	0,00002	0,00006	0,00023
Оценка среднеквадратичного отклонения $\hat{\sigma}_{q_0}$, л/с	0,028	0,020	0,019	0,036	0,004	0,008	0,015
Оценка коэффициента вариации \hat{C}_v	0,60	0,66	0,46	0,56	0,06	0,155	0,118
Характеристики формы							
Оценка коэффициента асимметрии \hat{C}_s	1,91	2,41	1,04	1,85	-1,79	19,85	-6,25
Оценка эксцесса \hat{E}_{q_0}	6,99	13,38	3,44	5,67	11,84	472,39	41,30

Для смесителей кухни и ванны (душевой кабины), напротив, характерно достаточно большое значение коэффициента вариации, что говорит о высокой степени изменчивости значений секундного расхода воды. Характер изменчивости значений секундного расхода воды может быть наглядно продемонстрирован на диаграмме размаха, построенной для описанных выборок (рисунок 2).

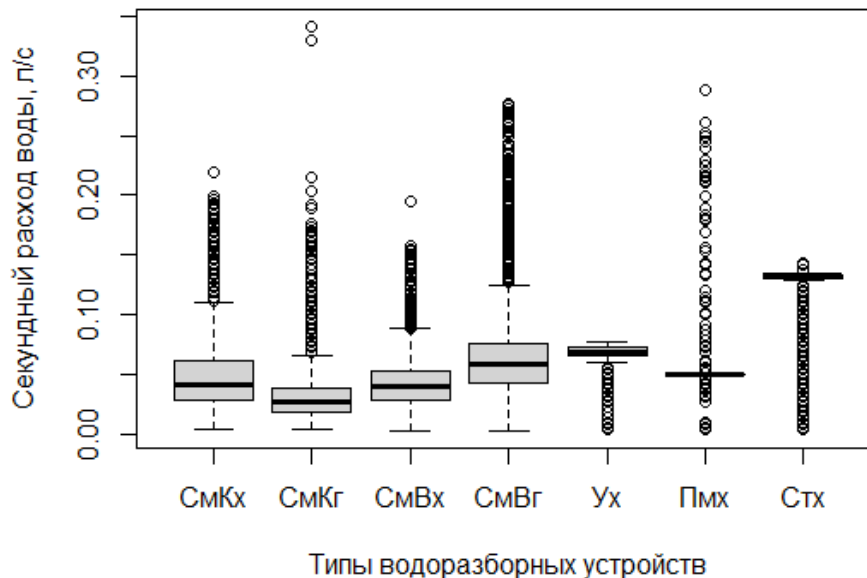


Рис. 2. Диаграмма размаха эмпирических выборок значений секундного расхода воды для различных типов водоразборных устройств

Таким образом, по характеру изменчивости значений секундного расхода воды в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения, можно выделить две группы водоразборных устройств:

1. Стохастические – со случайным характером величины расхода воды (смесители и иные типы водоразборных устройств, значение секундного расхода воды в которых в основном определяется конкретным пользователем и его потребностями).

2. Условно детерминированные – с относительно постоянным характером расхода воды (смывной бачок унитаза, стиральная и посудомоечная машины и иные типы водоразборных устройств, значение секундного расхода воды в которых определяется в основном техническими характеристиками устройства, а также характеристиками системы водоснабжения).

Каждая из выделенных групп имеет ярко выраженные особенности изменчивости интенсивности водопотребления, которые должны быть учтены при разработке математических моделей. Для математической модели условно детерминированных водоразборных устройств авторы считают целесообразным не учитывать изменения значений секундного расхода воды, возникающие в процессе работы, и принимать значение фиксированным, определяя его по результатам исследований или по паспортным данным конкретного устройства.

Подобное допущение для стохастических типов устройств недопустимо, поскольку может вызвать сильное огрубление математической модели водопотребления как отдельного устройства, так и системы водоснабжения в целом, и, как следствие, привести к неверным результатам имитационного моделирования.

Выполненное исследование и анализ полученных результатов позволяют утверждать, что величина расхода воды стохастическими типами водоразборных устройств во многом зависит от конкретного пользователя и его потребностей в конкретный момент времени. По внешнему виду гистограмм и кривых, представленных на рисунке 1, можно предположить, что изменчивость значений секундного расхода воды стохастическими типами водоразборных устройств может быть описана одним из известных теоретических законов распределения.

В первую очередь авторами была проверена гипотеза о принадлежности эмпирических выборок закону нормального распределения, как наиболее распространенному. Данная гипотеза была отвергнута на основании рассчитанного критерия Шапиро – Уилка. Значение рассчитанного уровня значимости p_{value} для каждой выборки приведено в таблице 3.

Таблица 3. Значения p_{value} , полученные в результате выполнения теста Шапиро – Уилка

Наименование выборки	СмКх	СмКг	СмВх	СмВг
p_{value}	$3,1 \cdot 10^{-17}$	$6,9 \cdot 10^{-14}$	$8,5 \cdot 10^{-13}$	$3,1 \cdot 10^{-14}$

Анализ статистических оценок эмпирических выборок и сравнительная оценка графиков плотности и функции распределения, построенных по эмпирическим данным, с известными теоретическими законами распределения показали, что для дальнейшей проверки однородности в качестве нулевых гипотез о виде распределения могут быть приняты гипотезы о том, что рассматриваемые эмпирические выборки принадлежат следующим двухпараметрическим законам распределения:

- 1) логнормальному распределению ($X \sim \text{Log}N(\mu, \sigma^2)$);
- 2) распределению Вейбулла ($X \sim W(k, \lambda)$);
- 3) гамма-распределению ($X \sim \Gamma(k, \theta)$);
- 4) бета-распределению ($X \sim B(\alpha, \beta)$).

Значения оценок параметров представленных законов распределения для каждой из выборок представлены в таблице 4.

Таблица 4. Значения оценок параметров теоретических законов распределения

Наименование закона распределения	СмКх	СмКг	СмВх	СмВг
Логнормальное распределение	$\mu = -3,25$ $\sigma = 0,65$	$\mu = -3,69$ $\sigma = 0,65$	$\mu = -3,32$ $\sigma = 0,57$	$\mu = -2,91$ $\sigma = 0,61$
Распределение Вейбулла	$k = 1,76$ $\lambda = 0,05$	$k = 1,65$ $\lambda = 0,03$	$k = 2,24$ $\lambda = 0,05$	$k = 1,88$ $\lambda = 0,07$
Гамма-распределение	$k = 2,91$ $\theta = 0,016$	$k = 2,73$ $\theta = 0,011$	$k = 4,05$ $\theta = 0,010$	$k = 3,35$ $\theta = 0,019$
Бета-распределение	$\alpha = 2,78$ $\beta = 56,76$	$\alpha = 2,64$ $\beta = 84,34$	$\alpha = 3,91$ $\beta = 90,98$	$\alpha = 3,14$ $\beta = 46,30$

Результаты проверки однородности репрезентативных выборок и теоретических законов распределения, перечисленных в таблице 4, представлены в таблице 5. В числителе приведены значения p_{value} рассчитанные для критерия Колмогорова, в знаменателе – значения статистики, рассчитанной по методу, приведенному в [29] (среднеквадратическая величина ошибок).

Таблица 5. Значения p_{value} , полученные в результате выполнения теста Колмогорова и значения статистики, рассчитанные по методу, изложенному в [29]

Наименование закона распределения	СмКх	СмКг	СмВх	СмВг
Логнормальное распределение	$\frac{0,08}{0,0811}$	$\frac{0,06}{0,0294}$	$\frac{0,06}{0,0339}$	$\frac{0,09}{0,1024}$
Распределение Вейбулла	$\frac{0,05}{0,0227}$	$\frac{0,08}{0,0038}$	$\frac{0,15}{0,0127}$	$\frac{0,08}{0,0195}$
Гамма-распределение	$\frac{0,19}{0,0178}$	$\frac{0,19}{0,0026}$	$\frac{0,07}{0,0075}$	$\frac{0,51}{0,0135}$
Бета-распределение	$\frac{0,17}{0,0184}$	$\frac{0,22}{0,0027}$	$\frac{0,07}{0,0079}$	$\frac{0,37}{0,0143}$

Как видно из таблицы 5, отвергать ни одну нулевую гипотезу о принятом теоретическом законе распределения для любой из рассматриваемых эмпирических выборок оснований нет. Однако, для повышения достоверности математической модели интенсивности водопотребления должен быть выбран теоретический закон распределения, имеющий большую степень соответствия эмпирическим данным.

Метод, описанный в [29], позволяет оценить, какой из теоретических законов наилучшим образом описывает характер изменчивости расхода воды в рассматриваемых выборках. Суть данного метода состоит в отображении выборочной функции распределения на эталонную прямую $y = x$ [29].

По полученным результатам можно утверждать, что теоретическим законом, описывающим рассматриваемые выборки наилучшим образом, является:

- 1) для СмКх – гамма-распределение с параметрами $k = 2,91, \theta = 0,016$;
- 2) для СмКг – гамма-распределение с параметрами $k = 2,73, \theta = 0,011$;
- 3) для СмВх – гамма-распределение с параметрами $k = 4,05, \theta = 0,010$;
- 4) для СмВг – гамма-распределение с параметрами $k = 3,35, \theta = 0,019$.

Типы водоразборных устройств, их принадлежность к определенной группе и предложенный вариант математического описания плотности распределения значений интенсивности водопотребления представлены в таблице 6.

Таблица 6. Сводная таблица результатов исследования

Водоразборное устройство, тип системы водоснабжения	Группа устройства	Математическое описание плотности распределения значений интенсивности водопотребления (в л/с)
Смеситель кухонной мойки, ХВС	стохастические	$f(x) = \begin{cases} x^{1,91} \frac{e^{-x/0,016}}{0,016^{2,91} \Gamma(2,91)}, & x \geq 0^* \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
Смеситель кухонной мойки, ГВС	стохастические	$f(x) = \begin{cases} x^{1,73} \frac{e^{-x/0,011}}{0,011^{2,73} \Gamma(2,73)}, & x \geq 0^* \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
Смеситель ванны или душевой кабины, ХВС	стохастические	$f(x) = \begin{cases} x^{3,05} \frac{e^{-x/0,010}}{0,010^{4,05} \Gamma(4,05)}, & x \geq 0^* \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
Смеситель ванны или душевой кабины, ГВС	стохастические	$f(x) = \begin{cases} x^{2,35} \frac{e^{-x/0,019}}{0,019^{3,35} \Gamma(3,35)}, & x \geq 0^* \\ 0, & x < 0 \end{cases}$
Смывной бачок унитаза, ХВС	условно детерминированные	0,07**
Посудомоечная машина, ХВС	условно детерминированные	0,05**
Стиральная машина, ХВС	условно детерминированные	0,13**

Примечания к таблице 6:

* – $\Gamma(k)$ – гамма функция Эйлера.

** – детерминированное значение по результатам исследования или иное детерминированное значение в соответствии с паспортными данными конкретного устройства.

Общая характеристика водопотребления (суммарный расход воды) всего рассматриваемого помещения может быть получена путем сложения расходов воды всех установленных в помещении водоразборных устройств в конкретный момент времени. На иллюстрациях (рис. 3 и рис. 4) представлены графики фрагментов временных рядов секундного расхода воды в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения в целом по рассматриваемому помещению.

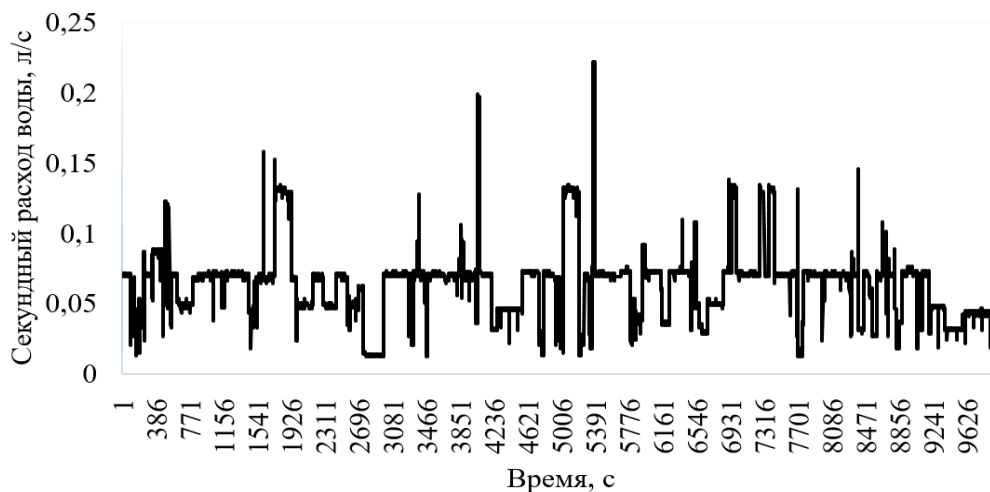


Рис. 3. Фрагмент временного ряда значений секундного расхода воды в трубопроводе холодного водоснабжения

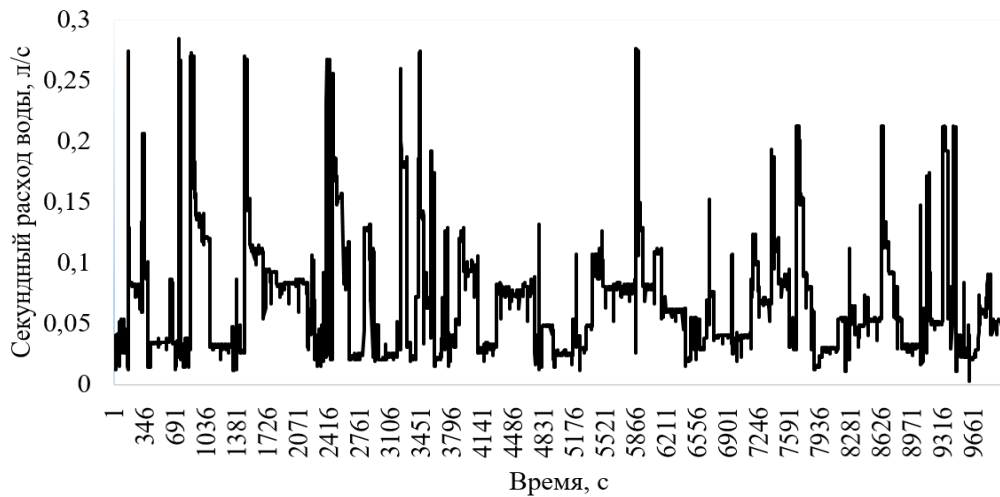


Рис. 4. Фрагмент временного ряда значений секундного расхода воды в трубопроводе горячего водоснабжения

Гистограммы и кривые эмпирической плотности распределения, построенные по сгруппированным и обработанным данным о величине расхода воды в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения рассматриваемой квартиры представлены на рисунке 5. Ось ординат соответствует значениям плотности вероятности, ось абсцисс – значениям секундного расхода воды в трубопроводе (в л/с).

Из представленных данных видно, что суммарный расход воды, формирующийся в результате использования водоразборных устройств в помещении, как для холодного, так и для горячего водоснабжения изменяется в достаточно широких пределах даже при относительно постоянном давлении. Среднее значение расхода воды составило 0,063 л/с и 0,056 л/с, а среднеквадратичное отклонение – 0,028 л/с и 0,036 л/с для холодного и горячего водоснабжения соответственно.

Гипотеза о принадлежности полученных выборок нормальному закону распределения была отклонена, поскольку были выявлены статистически значимые отклонения.

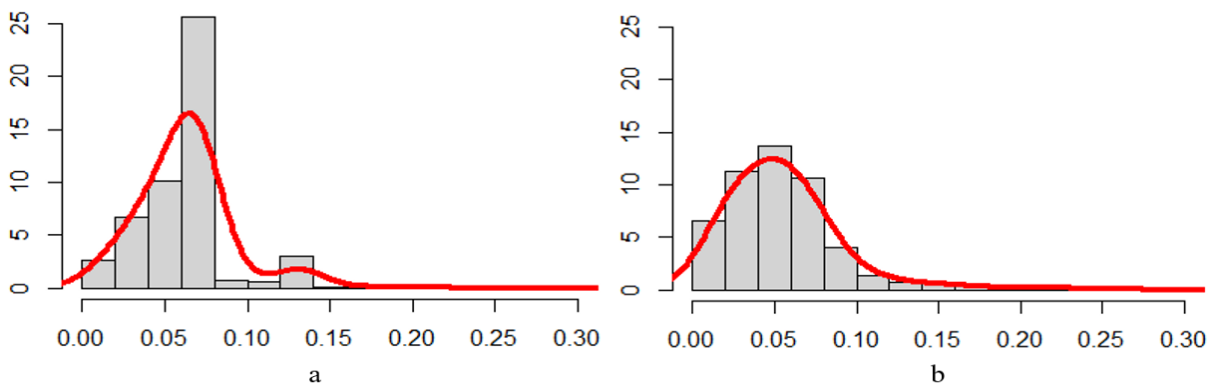


Рис. 5. Гистограммы и кривые плотности распределения эмпирических значений суммарного секундного расхода воды в трубопроводах систем водоснабжения (а – для системы ХВС, б – для системы ГВС)

Заключение. В ходе исследования были получены данные о секундном расходе воды во внутренних сетях горячего и холодного водоснабжения в местах их непосредственного подключения к таким водоразборным устройствам, как смесители кухонной мойки и ванны (душевой кабины), смывной бачок унитаза, посудомоечная и стиральная машины.

По полученным эмпирическим данным были построены графики (гистограммы и кривые) плотности распределения значений секундного расхода воды.

На основании анализа обработанных эмпирических данных и проверенных статистических гипотез о виде распределения предложена классификация водоразборных устройств с выделением двух групп (стохастические и условно детерминированные), а также предложен вариант математического описания интенсивности водопотребления рассматриваемых водоразборных устройств (приведено обоснование теоретических законов распределения величины секундного расхода воды).

Список источников

1. Исаев В.Н. Анализ методик определения расходов во внутреннем водопроводе / В.Н. Исаев, М.Г. Мхитарян // «АВОК» - общество инженеров: Сантехника, 2003. – № 5. – С. 6-11.
2. Карамбиров С.Н. О некоторых статистических закономерностях водопотребления в системах водоснабжения / С.Н. Карамбиров, Л.Б. Бекишева // Природообустройство, 2012. – № 4. – С. 45-48.
3. Vertommen I., Magini R., Cunha M., Guercio R. Water demand uncertainty: the scaling laws approach. Water Demand Uncertainty, Rijeka, Croatia, 2012, 160 p.
4. Mazzoni F., Alvisi S., Franchini M., Blokker M. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study. Water Resources and Industry, 2023, vol. 29, p. 100198, DOI:10.1016/j.wri.2022.100198.
5. Карамбиров, С.Н. Оценка надежности подачи воды системами водоснабжения / С.Н. Карамбиров, Д.А. Манукьян, Л.Б. Бекишева // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук, 2013. – № 6. – С. 63-65.
6. Новицкий Н.Н. Моделирование стохастики потокораспределения в гидравлических цепях / Н.Н. Новицкий, О.В. Вантеева // Известия Российской академии наук. Энергетика, 2011. – № 2. – С. 122-131.
7. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Scaling water consumption statistics. Journal of water resources planning and management, 2014, vol. 141, no. 5, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467.
8. Buchberger S.G., Wu L. Model for instantaneous residential water demands. Journal of hydraulic engineering, 1995, vol. 121, no. 3, pp. 232-246, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(232).
9. Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. Water resources management, 2003, vol. 17, pp. 197-222.
10. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Generating water demand scenarios using scaling laws. Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 1697, DOI:10.1016/j.proeng.2014.02.187.
11. Вантеева О.В. Вероятностные модели и методы анализа гидравлических режимов систем водоснабжения / О.В. Вантеева, Н.Н. Новицкий // Комунальне Господарство Міст. Технічні Науки Та Архітектура, 2011. – № 101. – С. 332-341.
12. Agarwal S., Patil J.P., Goyal V., Singh A. Assessment of water supply-demand using water evaluation and planning (WEAP) model for Ur river watershed, Madhya Pradesh, India. Journal of the Institution of engineers (India), Series A, 2019, vol. 100, pp. 21-32.
13. Cominola A., Giuliani M., Piga D. et al. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review. Environmental modelling & software, 2015, vol. 72, pp. 198-214.
14. Gharabaghi S., Stahl E., Bonakdari H. Integrated nonlinear daily water demand forecast model (case study: City of Guelph, Canada). Journal of hydrology, 2019, vol. 579, p. 124182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124182.
15. Blokker E., Vreeburg J. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model. Impacts of global climate change, 2005, pp. 1-12.
16. Подпорин А.В. К вопросу обоснования расчетов проектных расходов воды в системах водоснабжения жилых и казарменных зон военных городков / А.В. Подпорин, Е.К. Сизон // Военный инженер, 2017. – № 4 (6). – С. 18-22.
17. Вербицкий А.С. Стандарт «Внутренний водопровод и канализация зданий» / А.С. Вербицкий // СНиП 2.04.01-85, 2007. – № 1. – С. 18-21.
18. Шопенский Л.А. Исследование режимов работы водопроводов жилых зданий: Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Л.А. Шопенский. – М.: НИИ сантехники МПСМ СССР, 1968. – 34 с.
19. Buchberger S.G., Wells G.J. Intensity, duration, and frequency of residential water demands. 1996, vol. 122, no. 1, pp. 11-19, DOI: 10.1061(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11).
20. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system design. Water, 2018, vol. 10, no. 3, 307 p.

21. Поливанов Д.Е. ВМ технологии с элементами программирования при анализе режимов работы внутренних сетей водоснабжения зданий / Д.Е. Поливанов, А.А. Семенов // ВМ-моделирование в задачах строительства и архитектуры (ВМАС 2023) VI Международная научно-практическая конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 2023. – С. 81-91. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53844006> (дата обращения: 13.08.2023).
22. Sturges H.A. The choice of a class interval. Journal of the American statistical association, 1926, vol. 21, no. 153, pp. 65-66, DOI:10.1080/01621459.1926.10502161.
23. Волгин П.Н. Определение теоретического закона распределения случайных величин, используемых в имитационной модели / П.Н. Волгин, Т.Н. Масленникова // Морская радиоэлектроника, 2010. – № 3-4 (33-34). – С. 74-78.
24. Garcia V.J., Garcia-Bartual R., Cabrera E. et al. Stochastic model to evaluate residential water demands. Journal of water resources planning and management, 2004, vol. 130, no. 5, pp. 386-394.
25. Лемешко Б.Ю. К вопросу статистического анализа больших данных / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, М.А. Семенова // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика, 2018. – № 44. – С. 40-49. – DOI:10.17223/19988605/44/5.
26. Лемешко Б.Ю. Асимптотически оптимальное группирование наблюдений в критериях согласия / Б.Ю. Лемешко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 1998. – Т. 64. – № 1. – С. 56-64.
27. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика: Сб. статей / А.Н. Колмогоров. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
28. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки статистических гипотез при анализе больших выборок: проблемы и их решение / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко, И.В. Веретельникова, П.Ю. Блинов // Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения РАН, 2019. – Критерии проверки статистических гипотез при анализе больших выборок. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42409411> (дата обращения: 25.10.2023).
29. Тырсин А.Н. Метод подбора наилучшего закона распределения непрерывной случайной величины на основе обратного отображения / А.Н. Тырсин // Вестник Южно-Уральского Государственного Университета. Серия: Математика. Механика. Физика, 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 31-38. – DOI:10.14529/mmph170104.

Поливанов Дмитрий Евгеньевич. Аспирант кафедры Информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, AuthorID: 1164703, SPIN: 9742-1057, ORCID: 0000-0002-4215-1208, dmitry_polivanov@mail.ru, 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Семенов Алексей Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры Информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, AuthorID: 648893, SPIN: 9057-9882, ORCID: 0000-0001-9490-7364, sw.semenov@gmail.com, 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

Яркова Ольга Николаевна. Кандидат экономических наук, доцент кафедры Информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного архитектурно-строительного университета, AuthorID: 568918, SPIN: 3146-5581, ORCID: 0000-0002-8745-3031, yarkova_on@mail.ru, 190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4.

UDC 628.171.001.24+519.226

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.007

Mathematical modeling of the intensity of water consumption by various types of water collecting devices

Dmitry E. Polivanov, Alexey A. Semenov, Olga N. Yarkova

Saint Petersburg State University of architecture and civil engineering,
Russia, Saint Petersburg, dmitry_polivanov@mail.ru

Abstract. The article presents the results of a study of the intensity of water consumption by various types of water collection devices (kitchen sink and bath faucets (shower cabin), toilet bowl with flush tank, washing machine and dishwasher) using water from the water supply system. The evaluation of the theoretical laws of the distribution of the value of the second water flow and their parameters is carried out. The homogeneity of empirical samples of the values of the second water flow and theoretical distribution laws is estimated. The choice of the best

theoretical distribution laws is made at the significance level $\alpha = 0.05$. As a result of the study, a classification of water sampling devices was proposed according to the variability of the intensity of water consumption, as well as the theoretical distribution laws that best describe the intensity of water consumption by various types of water sampling devices were evaluated and justified.

Keywords: mathematical modeling, probabilistic model, theoretical distribution law, water supply system, stochastic character

References

1. Isaev V.N., Mkhitarayan M.G. Analiz metodik opredeleniya raskhodov vo vnutrennem vodoprovode [Analysis of methods for determining expenses in the internal water supply]. “AVOK” – obshchestvo inzhenerov, Santekhnika [“ABOK” – Society of Engineers, Plumbing], 2003, no. 5, pp. 6-11.
2. Karambirov S.N., Bekisheva L.B. O nekotorykh statisticheskikh zakonomernostyakh vodopotrebleniya v sistemah vodosnabzheniya [On some statistical patterns of water consumption in water supply systems]. Prirodoo-bustroystvo [Nature management], 2012, no. 4, pp. 45-48.
3. Vertommen I., Magini R., Cunha M., Guercio R. Water demand uncertainty: the scaling laws approach. Water Demand Uncertainty, Rijeka, Croatia, 2012, 160 p.
4. Mazzoni F., Alvisi S., Franchini M., Blokker M. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study. Water Resources and Industry, 2023, vol. 29, p. 100198, DOI:10.1016/j.wri.2022.100198.
5. Karambirov S.N., Manukyan D.A., Bekisheva L.B. Ocenka nadezhnosti podachi vody sistemami vodosnabzheniya [Assessment of reliability of water supply by water supply systems]. Doklady Rossiyskoy akademii sel'skokho-zyaystvennykh nauk [Reports of the Russian academy of agricultural sciences], 2013, no. 6.
6. Novitsky N.N., Vanteeva O.V. Modelirovanie stohastiki potokoraspredeleniya v gidravlicheskikh cepyah [Modeling of flow distribution stochastics in hydraulic circuits]. Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Energetika [Proceedings of the Russian academy of sciences. Energy], 2011, no. 2, pp. 122-131.
7. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Scaling water consumption statistics. Journal of water resources planning and management, 2014, vol. 141, no. 5, DOI:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467.
8. Buchberger S.G., Wu L. Model for instantaneous residential water demands. Journal of hydraulic engineering, 1995, vol. 121, no. 3, pp. 232-246, DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(232).
9. Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. Water resources management, 2003, vol. 17, pp. 197-222.
10. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Generating water demand scenarios using scaling laws. Procedia Engineering, 2014, vol. 70, p. 1697, DOI:10.1016/j.proeng.2014.02.187.
11. Vanteeva O.V., Novitsky N.N. Veroyatnostnye modeli i metody analiza gidravlicheskikh rezhimov sistem vodosnabzheniya [Probabilistic models and methods of analysis of hydraulic modes of water supply systems]. Komunal'ne gospodarstvo mist. Tekhnichni nauki ta arkhitektura [Komunalne gospodarstvo mist. Technical sciences that architecture], 2011, no. 101, pp. 332-341.
12. Agarwal S., Patil J.P., Goyal V., Singh A. Assessment of water supply–demand using water evaluation and planning (WEAP) model for Ur river watershed, Madhya Pradesh, India. Journal of The Institution of engineers (India), Series A, 2019, vol. 100, pp. 21-32.
13. Cominola A., Giuliani M., Piga D. et al. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review. Environmental modelling & software, 2015, vol. 72, pp. 198-214.
14. Gharabaghi S., Stahl E., Bonakdari H. Integrated nonlinear daily water demand forecast model (case study: City of Guelph, Canada). Journal of hydrology, 2019, vol. 579, p. 124182, DOI:10.1016/j.jhydrol.2019.124182.
15. Blokker E., Vreeburg J. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model. Impacts of global climate change, 2005, pp. 1-12.
16. Podporin A.V., Sizon E.K. K voprosu obosnovaniya raschetov proektnykh raskhodov vody v sistemah vodosnabzheniya zhilykh i kazarmennykh zon voennykh gorodkov [On the issue of substantiation of calculations of design water consumption in water supply systems of residential and barracks zones of military towns]. Voyennyi inzhener [Military engineer], 2017, no 4 (6), pp. 18-22.
17. Verbitsky A.S. Standart “Vnutrennij vodoprovod i kanalizaciya zdaniy” [Standard “Internal water supply and sewerage of buildings”]. SNiP 2.04.01-85, 2007, no. 1, pp. 18-21.
18. Chopensky L.A. Issledovanie rezhimov raboty vodoprovodov zhilykh zdaniy. Avtoreferat dissertatsii na soiskaniye uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk [Investigation of modes of operation of water pipes of residential buildings. Abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. M., NII santekhniki MPSM SSSR [M., Research institute of sanitary engineering of the USSR MPSM], 1968, 34 p.

19. Buchberger, S.G., Wells G.J. Intensity, duration, and frequency of residential water demands, 1996, vol. 122, no. 1, pp. 11-19, DOI: 10.1061(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11).
20. Mala-Jetmarova H., Sultanova N., Savic D. Lost in optimisation of water distribution systems? A literature review of system design. *Water*, 2018, vol. 10, no. 3, 307 p.
21. Polivanov D.E., Semenov A.A. BIM tehnologii s elementami programirovaniya pri analize rezhimov raboty vnutrennih setej vodosnabzheniya zdaniy [BIM technologies with programming elements in the analysis of operating modes of internal water supply networks of buildings]. BIM-modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury (BIMAC 2023) VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii – BIM-modelirovaniye v zadachakh stroitel'stva i arkhitektury (BIMAC 2023). [BIM-modeling in construction and architecture tasks (BIMAC 2023) VI International Scientific and Practical Conference]. St. Petersburg: SPbGASU, 2023, pp. 81-91, available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=53844006> (accessed: 08/13/2023).
22. Sturges H.A. The choice of a class interval. *Journal of the American statistical association*, 1926, vol. 21, no. 153, pp. 65-66, DOI:10.1080/01621459.1926.10502161.
23. Volgin P.N., Maslennikova T.N. Opredelenie teoreticheskogo zakona raspredeleniya sluchajnykh velichin, ispol'zuemykh v imitacionnoy modeli [Definition of the theoretical distribution law of random variables used in the simulation model]. *Morskaya radioelektronika [Marine radio electronics]*, 2010, no. 3-4 (33-34), pp. 74-78.
24. Garcia V.J., Garcia-Bartual R., Cabrera E. et al. Stochastic model to evaluate residential water demands. *Journal of water resources planning and management*, 2004, vol. 130, no. 5, pp. 386-394.
25. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Semenova M.A. K voprosu statisticheskogo analiza bol'shih dannykh [On the issue of statistical analysis of big data]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika [Bulletin of Tomsk state university. Management, computer engineering and computer science]*, 2018, no. 44, pp. 40-49, DOI:10.17223/19988605/44/5.
26. Lemeshko B.Yu. Asimptoticheski optimal'noe gruppирование nablyudenij v kriteriyah soglasiya [Asymptotically optimal grouping of observations in the criteria of agreement]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Factory laboratory. Diagnostics of materials]*, 1998, vol. 64, no. 1, pp. 56-64.
27. Kolmogorov A.N. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]*. Collection of articles. M., Nauka [Science], 1986, 535 p.
28. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Veretelnikova I.V., Blinov P.Y. Kriterii proverki statisticheskikh gipotez pri analize bol'shih vyborok: problemy i ih reshenie [Criteria for testing statistical hypotheses in the analysis of large samples: problems and their solution]. *Institut vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy geofiziki Sibirskogo otdeleniya RAN [Institute of computational mathematics and mathematical geophysics of the Siberian branch of the Russian academy of sciences]*, 2019, available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42409411> (accessed: 10/25/2023).
29. Tyrsin A.N. Metod podbora nailuchshego zakona raspredeleniya nepreryvnoj sluchajnoj velichiny na osnove obratnogo otobrazheniya [Method of selecting the best distribution law of a continuous random variable based on the inverse mapping]. *Vestnik Yuzhno-ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika. Mekhanika. Fizika [Bulletin of the South Ural state university. Mathematics. Mechanics. Physics]*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 31-38, DOI:10.14529/mmph170104.

Polivanov Dmitry Evgen'evich. Postgraduate student of the department of Information systems and technologies of St. Petersburg State University of architecture and civil engineering, AuthorID: 1164703, SPIN: 9742-1057, ORCID: 0000-0002-4215-1208, dmitry_polivanov@mail.ru, 190005, Russia, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str.4.

Semenov Alexey Alexandrovich. Candidate of technical sciences, Associate Professor of the department of Information systems and technologies of St. Petersburg State University of architecture and civil engineering, AuthorID: 648893, SPIN: 9057-9882, ORCID: 0000-0001-9490-7364, sw.semenov@gmail.com, 190005, Russia, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str.4.

Yarkova Olga Nikolaevna. Candidate of economic sciences, Associate Professor of the department of Information systems and technologies of St. Petersburg State University of architecture and civil engineering, AuthorID: 568918, SPIN: 3146-5581, ORCID: 0000-0002-8745-3031, yarkova_on@mail.ru, 190005, Russia, Saint Petersburg, 2nd Krasnoarmeyskaya str.4.

Статья поступила в редакцию 23.11.2023; одобрена после рецензирования 29.02.2024; принята к публикации 05.03.2024.

The article was submitted 11/23/2023; approved after reviewing 02/29/2024; accepted for publication 03/05/2024.

УДК 330.322.1

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.008

Модель стратегически ориентированного проектирования элемента инновационной инфраструктуры на примере предприятия ООО НПП «Авиатрон»

Туктарова Полина Андреевна¹, Мансурова Юлия Талгатовна²,
Хамидуллина Диана Ильвировна²

¹Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского,
Иркутская область, Иркутский район, поселок Молодежный, *ptuktarova@gmail.com*

²Уфимский университет науки и технологий, Россия, Уфа

Аннотация. В статье представлена оценка привлекательности инвестиционного проекта, которая может значительно повлиять на модель стратегически ориентированного проектирования инновационной инфраструктуры предприятия ООО НПП «Авиатрон». Была проведена оценка инвестиционного проекта по продаже Радиомодулей Мега12-PM2400 в рамках договорных отношений с компанией ООО «Байтекс». В результате оценки инвестиционного проекта было выявлено, что модель может быть нацелена на максимизацию инвестиций в данный проект. Таким образом, оценка привлекательности инвестиционного проекта играет важную роль в формировании модели стратегически ориентированного проектирования инновационной инфраструктуры предприятия, определяя приоритеты, цели и методы управления финансовыми ресурсами.

Ключевые слова: анализ чувствительности, оценка привлекательности, ставка дисконтирования, эффективность инвестиционного проекта, конкурентоспособность

Цитирование: Туктарова П.А. Модель стратегически ориентированного проектирования элемента инновационной инфраструктуры на примере предприятия ООО НПП «Авиатрон» / П.А. Туктарова, Ю.Т. Мансурова, Д.И. Хамидуллина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 93-102. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.008.

Введение. В современном бизнесе стратегически ориентированное проектирование инновационной инфраструктуры предприятия играет ключевую роль в обеспечении его конкурентоспособности и устойчивого развития. Эта модель позволяет предприятию создать эффективную инновационную среду, способствующую поиску и внедрению новых идей, технологий и подходов, а также улучшению процессов и продуктов.

Оценка привлекательности инвестиционного проекта может значительно влиять на модель стратегически ориентированного проектирования инновационной инфраструктуры предприятия. Если инвестиционный проект оценивается как высоко привлекательный, то модель может быть нацелена на максимизацию инвестиций в этот проект, разработку инновационных подходов к управлению финансами и создание системы мониторинга и контроля за расходованием средств, направленных на реализацию данного проекта. С другой стороны, если инвестиционный проект оценивается как непривлекательный или рискованный, то модель может быть нацелена на минимизацию расходов на данный проект, перераспределение ресурсов на более перспективные направления и разработку альтернативных стратегий управления финансами. Таким образом, оценка привлекательности инвестиционного проекта играет важную роль в формировании модели стратегически ориентированного проектирования инновационной инфраструктуры предприятия, определяя приоритеты, цели и методы управления финансовыми ресурсами.

В данной статье мы рассмотрим оценку привлекательности инвестиционного проекта, которая связана с моделью стратегически ориентированного проектирования инновационной инфраструктуры предприятия. Рассмотрим инвестиционный проект по продаже Радиомодулей Мега12-PM2400 в рамках договорных отношений с компанией ООО «Байтекс». Согласно доходным контрактам, ООО НПП Авиатрон запланировано реализовать несколько радиомодулей по цене за каждую единицу оборудования по 180 тыс. рублей.

Проведем анализ данного бизнес-проекта на основе методики ключевых показателей проекта:

- 1) проведем анализ прогноза выручки на 2025-2027 гг.;
- 2) рассчитаем себестоимость продукции (радиомодуля Mega12-PM2400);
- 3) проведем расчеты капитальных вложений и финансирования;
- 4) составим бюджет доходов и расходов проекта;
- 5) рассчитаем ставку дисконтирования WACC;
- 6) рассчитаем показатели эффективности инвестиционного проекта: чистая приведенная стоимость (Net Present Value – NPV), внутренняя норма рентабельности (Internal Rate of Return – IRR), дисконтированный срок окупаемости (Pay-Back Period – PBP);
- 7) проанализируем чувствительность чистой приведенной стоимости;
- 8) и в результате проведем анализ сценариев.

Расчет ставки дисконтирования производится по методу средневзвешенной стоимости капитала (Weighted Average Cost of Capital – WACC). Применение данного метода целесообразно, поскольку в проекте присутствует и собственный, и заемный капитал [1].

Расчет по методу средневзвешенной стоимости капитала произведем по следующей формуле 1:

$$WACC = Re \times E V + Rd \times D V. \quad (1)$$

Для определения стоимости собственного капитала воспользуемся моделью оценки долгосрочных активов (САРМ). Согласно данной модели, ставка доходности собственного капитала рассчитывается по следующей формуле (2):

$$Re = Rf + \beta(Rm - Rf) + g1 + g2 + C. \quad (2)$$

Ставка доходности инвестиций в безрисковые активы (Rf) принимается на уровне ставки рефинансирования и составляет 7,5 %. Коэффициент β отражает чувствительность показателей доходности ценных бумаг к изменению рыночного риска.

С целью анализа рисков исследуемого предприятия после определения ключевых показателей проекта целесообразно провести анализ чувствительности и анализ сценариев. Анализ чувствительности – сравнительный анализ влияния различных факторов проекта на ключевой показатель эффективности предприятия.

Последовательность проведения анализа чувствительности [2]:

- 1) Выбор ключевого показателя эффективности.

В качестве данного показателя было выбрано значение NPV, рассчитанное по формуле (3):

$$NPV = CF_0 + \frac{CF_1}{(1+k)^1} + \frac{CF_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+k)^n}. \quad (3)$$

Где CF – денежный поток;

k – ставка дисконтирования.

Также рассмотрим формулы расчета IRR, PBP, формулы (4), (5) [1].

$$IRR = k_1 + \frac{NPV_{k1}}{NPV_{k1} - NPV_{k2}} \times (k_2 - k_1). \quad (4)$$

Где k_1 – значение ставки дисконтирования, при котором $NPV_{k1} > 0$;

k_2 – значение ставки дисконтирования, при котором $NPV_{k2} < 0$.

$$PBP = \frac{\sum k_t}{\sum NPV_t}. \quad (5)$$

- 2) Выбор факторов, влияющих на результат проекта.

Были выбраны следующие факторы:

- цена продукции;
- себестоимость;
- ставка дисконтирования;

– капитальные затраты.

3) Установление предельных значений изменения факторов. Данные пределы были установлены в рамках от -30 % до + 30 %;

4) Расчет ключевого показателя для всех выбранных предельных значений факторов.

В целях исследования период реализации проекта предполагается как четырехлетний, т.к. в ближайшей перспективе планируется пролонгация договорных отношений с ООО «Байтекс» на дополнительные 3 года, начиная с 2025 года. Соответственно, приводятся расчеты на трехлетнюю перспективу проекта. Стоит сказать, что данный срок также подтверждает необходимость внедрения на каждом производственном предприятии из сектора крупного бизнеса инструментов прогнозирования, что и обеспечивает бизнес-планирование. На основе описанного проекта в работе будет рассчитан финансовый план его реализации, проведен анализ чувствительности и сценариев [3, 4].

1. Пути решения описываемой проблемы. В рамках текущих договорных отношений цена представленного оборудования составляет 180 тысяч рублей с учетом покрытия части накладных расходов и обеспечения маржинальности. Формированием непосредственного бюджета проекта занимается финансовый отдел, а предложенная ранее рабочая группа формирует полностью реализуемый план [5, 6]. В таблице 1 представлен прогнозируемый объем продаж.

Таблица 1. Динамика объема продаж по контракту с ООО «Байтекс» за 2025-2027 гг.

ед.изм.	1 кв. 2025	2 кв. 2025	3 кв. 2025	4 кв. 2025	1 кв. 2026	2 кв. 2026	3 кв. 2026	4 кв. 2026	1 кв. 2027	2 кв. 2027	3 кв. 2027	4 кв. 2027
РАСЧЕТ ВЫРУЧКИ												
Объем продаж шт.												
Радиомодуль	20	20	20	20	20	20	20	20	25	25	25	25
Цена руб. без НДС												
Радиомодуль	180 000	180 000	180 000	180 000	194 400	194 400	194 400	194 400	209 952	209 952	209 952	209 952
Выручка тыс.руб. без НДС	3 600	3 600	3 600	3 600	3 888	3 888	3 888	3 888	5 249	5 249	5 249	5 249

Таким образом, в общем предполагается наращивание объемов продаж, прогнозные данные по годовой выручке представлены в таблице 2.

Таблица 2. Прогноз объема выручки по контракту с ООО «Байтекс», тыс. руб.

Показатель \ Год	2025	2026	2027
Выручка руб.	14 400	15 552	20 995

При расчетах предполагается, что рост выручки будет вызван в первую и основную очередь количеством проданных товаров [7].

Себестоимость реализации оборудования определяется путем суммирования затрат на сырье и материалы, а также затрат на оплату труда ОПП и части АУП (табл. 3).

Бюджет доходов и расходов проекта представлен в таблице 6. К коммерческим расходам относятся: упаковка, погрузка и транспортировка товара. К управленческим расходам относятся: амортизация здания, затраты на содержание помещения.

Таблица 3. Детализированный прогноз себестоимости проекта, тыс. руб.

	1 кв. 2025	2 кв. 2025	3 кв. 2025	4 кв. 2025	1 кв. 2026	2 кв. 2026	3 кв. 2026	4 кв. 2026	1 кв. 2027	2 кв. 2027	3 кв. 2027	4 кв. 2027
Персонал												
Производственный отдел, чел.	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5
Зароботная плата												
Производственный отдел, руб. без НДС	40 000	40 000	40 000	40 000	43 200	43 200	43 200	43 200	46 656	46 656	46 656	46 656
Итого затраты на оплату труда	480	480	480	480	518	518	518	518	700	700	700	700
Производственный отдел, тыс. руб. без НДС	480	480	480	480	518	518	518	518	700	700	700	700
Отчисления, тыс. руб. без НДС	137	137	137	137	148	148	148	148	199	199	199	199
Итого затраты на оплату труда с отчислениями, тыс. руб. без НДС	617	617	617	617	666	666	666	666	899	899	899	899
Итого СЕБЕСТОИМОСТЬ, тыс. руб. без НДС	717	717	717	717	774	774	774	774	1 045	1 045	1 045	1 045
Прочие расходы												
Аренда помещений, тыс.руб. без НДС	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Аренда оборудования, тыс.руб. без НДС	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Транспортные расходы, тыс.руб. без НДС	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Коммерческие расходы, тыс.руб. без НДС	40	0	0	0	40	0	0	0	40	0	0	0
Маркетинговые исследования, тыс.руб. без НДС	40				40				40			
Оплата труда управленческого персонала, тыс.руб. без НДС	100	100	100	100	108	108	108	108	117	117	117	117
Налоги, относимые на себестоимость												
Налог на имущество, руб.	1 046				945				854			

Так, прогнозируется ежегодное увеличение чистой прибыли. Данный рост, в основном, вызван преобладающим ростом выручки над ростом расходных статей: себестоимости и прочих расходов.

Среднерыночная ставка доходности (Rm) рассчитывается на основе изменения биржевых индексов по отраслям, что составляет 11,21 %. Премия за риск от размера предприятия составляет 4,01 %. Рыночная премия за риск инвестирования (страновой риск) принимается в размере 3,8 % [8,9].

Далее в таблице 4 представлен прогноз себестоимости проекта.

Таблица 4. Прогноз себестоимости проекта, тыс. руб.

Год	2025	2026	2027
Показатель			
Себестоимость, руб.	2 867	3 097	4 180

Также в таблице 5 представлены капитальные вложения и финансирования проекта по продаже радиомодулей.

Таблица 5. Капитальные вложения и финансирования проекта

Капитальные затраты	Ед. измерения	1 кв. 2024	2 кв. 2024	3 кв. 2024	4 кв. 2024
Преинвестиционные затраты	тыс. руб. с НДС	50	50		
Подготовка рабочего места	тыс. руб. с НДС	0	50 000	20 000	0
Работа 1	тыс. руб. с НДС		30 000		
Работа 2	тыс. руб. с НДС		20 000	20 000	
Закупка комплектующих	тыс. руб. с НДС	0	0	5 000	10 000
Вид 1	тыс. руб. с НДС			5 000	
Вид 2	тыс. руб. с НДС				10 000
ИТОГО капитальные затраты	тыс. руб. с НДС	50	50 050	25 000	10 000

Далее рассмотрим в таблице 6 бюджет доходов и расходов проекта.

Таблица 6. Бюджет доходов и расходов проекта, тыс. руб.

РАСЧЕТ	2025		2025		2025		2026		2026		2027		2027	
	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	1 кв.	2 кв.	3 кв.	4 кв.	1 кв.	4 кв.
Доходы	3 780	3 780	3 780	3 780	4 082	4 082	4 082	4 082	5 511	5 511	5 511	5 511	5 511	5 511
Доходы от реализации продукции	3 600	3 600	3 600	3 600	3 888	3 888	3 888	3 888	5 249	5 249	5 249	5 249	5 249	5 249
Прочие операционные доходы	180	180	180	180	194	194	194	194	262	262	262	262	262	262
Себестоимость	717	717	717	717	774	774	774	774	1 045	1 045	1 045	1 045	1 045	1 045
Прямые материальные затраты	100	100	100	100	108	108	108	108	146	146	146	146	146	146
Затраты на оплату труда с отчислениями	617	617	617	617	666	666	666	666	899	899	899	899	899	899
Валовая прибыль	3 063	3 063	3 063	3 063	3 308	3 308	3 308	3 308	4 466	4 466	4 466	4 466	4 466	4 466
Коммерческие расходы	40	0	0	0	40	0	0	0	40	0	0	0	0	0
Управленческие расходы	100	100	100	100	108	108	108	108	117	117	117	117	117	117
Прочие прямые расходы	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Амортизация	4 816	1 130	1 101	1 074	1 047	1 021	995	970	946	922	899	877	899	877
Операционная прибыль	-1 972	1 754	1 782	1 809	2 033	2 099	2 125	2 150	3 283	3 347	3 370	3 393	3 370	3 393
Операционные налоги	1 046	0	0	0	945	0	0	0	854	0	0	0	0	0
Прочие доходы	378	378	378	378	408	408	408	408	551	551	551	551	551	551
Прочие расходы	72	72	72	72	77	77	77	77	105	105	105	105	105	105
Прибыль до налогообложения	-1 666	2 060	2 088	2 116	2 364	2 430	2 456	2 481	3 730	3 794	3 817	3 839	3 817	3 839
Налог на прибыль	0	412	418	423	473	486	491	496	746	759	763	768	763	768
Чистая прибыль	-1 666	1 648	1 671	1 693	1 891	1 944	1 965	1 985	2 984	3 035	3 053	3 071	3 053	3 071

На основе вышеперечисленных параметров рассчитана ставка дисконтирования для проекта, составив 18,57 % (табл. 7).

Таблица 7. Расчет ставки дисконтирования

Показатель	Значение
Безрисковая ставка	7,50%
Ср.рын. доходность	11,21%
Бета с учетом долга	0,890
Премия за размер предприятия	4,01%
Пр. несист. Риски	3,80%
Рыночная премия за риск инвестирования (страновой риск)	3,50%
Вес ЗС	0,500
Вес СС	0,500
Ст-ть ЗС	15,03%
Ст-ть СС	22,11%
WACC	18,57%

Данные об эффективности инвестиций представлены в таблице 8, а именно: основные показатели, характеризующие экономическую целесообразность проекта, учитывающие затраты и результаты внедрения инвестиционного проекта.

Таблица 8. Показатели эффективности инвестиционного проекта

NPV	11233,44	тыс. руб.
PBP	1,04	лет.
IRR	20,84	%

Таким образом, поскольку значение чистого приведенного дохода (NPV) является положительным (11 233,44 тыс. руб.>0), а IRR превышает WACC, то принятие данного проекта является целесообразным. Также, как мы видим, срок окупаемости проекта равен 1,04 лет, следовательно, это означает, что 1,04 лет потребуется для того, чтобы окупить сумму инвестиций в проект.

Проект имеет приемлемые значения NPV и IRR, характеризующие экономическую целесообразность проекта и учитывающие затраты внедрения инвестиционного проекта. Далее произведем необходимые расчеты и проанализируем чувствительность чистой приведенной стоимости к изменению показателей проекта (табл. 9).

Таблица 9. Анализ чувствительности чистой приведенной стоимости к изменению показателей проекта

Анализ чувствительности NPV	Изменение параметра, %						
	Значение NPV, тыс. руб.	-30%	-20%	-10%	0%	10%	20%
цена готовой продукции;	61	2 296	6 765	11 233	15 702	20 171	24 640
себестоимость	11556	11 448	11 341	11 233	11 126	11 018	10 911
стоимость капзатрат	34263	26 587	18 910	11 233	3 557	-4 120	-11 796
ставка дисконтирования	20218	17 044	14 053	11 233	8 576	6 070	3 709
цена готовой продукции;	-99%	-80%	-40%	0%	40%	80%	119%
себестоимость	3%	2%	1%	0%	-1%	-2%	-3%
стоимость капзатрат	205%	137%	68%	0%	-68%	-137%	-205%
ставка дисконтирования	80%	52%	25%	0%	-24%	-46%	-67%

Далее проиллюстрируем в графическом виде полученные данные о чувствительности NPV к изменению параметров (рис. 1).

По итогам проведенного анализа чувствительности параметров наблюдается положительное изменение ключевого показателя (NPV) при увеличении себестоимости услуг на 20 % и 30 %.

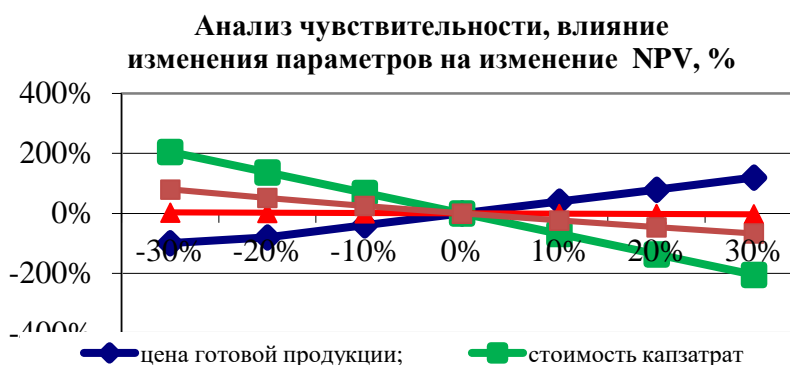


Рис.1. График чувствительности проекта

Далее проводится анализ сценариев. Необходимо рассмотреть несколько сценариев развития проекта (табл. 10).

Таблица 10. Анализ сценариев развития проекта

Показатель	Изменение параметра, %		
	Пессимистич- ный сценарий	Реалистичный сценарий	Оптимистичный сце- нарий
Цена готовой продукции	-10%	0	10%
Себестоимость	10%	0	-10%
стоим кап затрат	10%	0	-10%
Ставка дисконтирования	10%	0	-10%
NPV, тыс. руб.	3825,4	11233,436	26581,577

При данном сценарии Радиомодули Mega12-PM2400 занимают устойчивую конкурентную позицию на рынке, вследствие чего прогнозируется рост объема продаж до максимальной потребности заказчика.

При оптимистичном сценарии чистая приведенная стоимость проекта составит 26 581,577 тыс. руб., при этом себестоимость уменьшится за счет наращивания объемов реализации, а цена увеличится за счет высокого качества поставляемых Радиомодулей Mega12-PM2400.

Пессимистичный вариант прогноза предполагает, что на рынке есть конкурирующие продукты – радиомодули, также ориентированные на реализацию для ООО «Байтекс». При пессимистичном сценарии NPV проекта составит 3 825,4 тыс. руб., но реализация проекта все равно останется целесообразной, поскольку значение NPV положительное.

Реалистичный прогноз предполагает реализацию проекта по базовому сценарию, при котором NPV составит 11 233,436 тыс. руб. Подробно реалистичный сценарий был рассмотрен ранее.

Заключение. Таким образом, по результатам решения задачи необходимо сделать следующие основные выводы:

- ключевые показатели проекта с ООО «Байтекс» позволяют принять положительное решение о его реализации;
- наиболее вероятная чистая приведенная стоимость проекта составит 11 233,436 тыс. руб.;
- даже при пессимистичном варианте развития данный проект является эффективным;
- для максимизации эффективности проекта необходимо обеспечивать высочайшее качество поставляемых радиомодулей, что впоследствии станет мощным аргументом для контрактных менеджеров ООО НПП «Авиатрон» при переговорах с представителями ООО «Байтекс» об условиях пролонгации договорных отношений.

В результате оценки привлекательности инвестиционного проекта для ООО НПП «Авиатрон» и формирования модели стратегически ориентированного проектирования инновационной инфраструктуры предприятия, мы получаем оптимизацию использования финансовых ресурсов, управления рисками и максимизацию потенциальной прибыли. Это позволяет предприятию эффективно выстраивать свою инвестиционную стратегию, адаптироваться к изменениям внешней среды и обеспечивать устойчивое развитие.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-28-00395.

Список источников

1. Мансурова Ю.Т. Эконометрика: курс лекций: учебное пособие / Ю.Т. Мансурова, П.А. Туктарова. – Уфа: УГАТУ, 2022. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-173.pdf (дата обращения: 20.11.23).
2. Шушакова А.Г. Методические рекомендации к выполнению курсовой работы по дисциплине «Инвестиции» / А.Г. Шушакова, К.А. Семенова, Э.Р. Фаттахова. – Уфа: УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-71.pdf (дата обращения: 20.11.23).
3. Обухова Е.А. Многокритериальный подход к оценке инвестиционной привлекательности инновационных проектов / Е.А. Обухова // Мир экономики и управления, 2021. – №4. – С. 103-123.
4. Абрашин Д.К. Инвестиционная привлекательность как один из критериев оценки инновационных проектов в высшей школе / Д.К. Абрашин // Дневник науки, 2022. – № 3 (63). – С. 1-10.
5. Сагадеев Р.А. Прогнозирование денежных потоков методом трансформации аннуитетов / Р.А. Сагадеев // Финансовый менеджмент, 2020. – № 2. – С. 3-15.
6. Степнов И.М. Инвестиционная оценка современных бизнес-моделей / И.М. Степнов, Ю.А. Ковальчук // Учет. Анализ. Аудит, 2021. – № 8(2):12-23. – DOI:10.26794/2408-9303-2021-8-2-12-23.
7. Дамодаран А. Инвестиционная оценка: инструменты и методы оценки любых активов / А. Дамодаран. – 11-е изд. – Москва: Альпина Паблишер, 2020. – 1320 с.
8. Воронина Н.В. Ставка дисконтирования при расчете инвестиционных проектов / Н.В. Воронина, В.Г. Зарецкая // Вестник ТОГУ, 2020. – №1 (56). – С. 99-108.
9. Аргунов Ю.Р. Развитие методов оценки инвестиционных проектов на основе использования дисконтированного денежного потока / Ю.Р. Аргунов // Экономика и предпринимательство, 2020. – № 7(120). – С. 667-670.

Хамидуллина Диана Ильвировна. Ассистент кафедры экономики предпринимательства Уфимский университет науки и технологий, AuthorID (RSCI): 1204681, SPIN: 8811-4946, ORCID: 0009-0007-4430-5657, diana.khamidullina.2016@mail.ru, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса 12.

Мансурова Юлия Талгатовна. Кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики предпринимательства Уфимский университет науки и технологий, AuthorID (RSCI): 1005445, SPIN: 4596-9811, ORCID: 0000-0001-7373-0344, mansurova.j@mail.ru, Россия, Республика Башкортостан, Уфа, ул. Карла Маркса 12.

Туктарова Полина Андреевна. Кандидат экономических наук, доцент кафедры информатики и математического моделирования Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежеского, AuthorID (RSCI): 944221, SPIN: 7889-8580, ORCID: 0000-0003-0773-3138, ptuktarova@gmail.com, Россия, Иркутская область, поселок Молодежный 1/1.

UDC 330.322.1

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.008

Model of strategically oriented design of an element of innovative infrastructure using the example of the enterprise Aviatron

Polina A. Tuktarova¹, Yulia T. Mansurova², Diana I. Khamidullina²

¹Irkutsk state agrarian university named after A.A. Ezhevsky, Irkutsk region, Irkutsk district, Molodezhny village, ptuktarova@gmail.com

²Ufa university of science and technology, Russia, Ufa

Abstract. The article presents an assessment of the attractiveness of an investment project, which can significantly influence the model of strategically oriented design of innovative infrastructure of the enterprise LLC NPP Aviatron. An assessment of the investment project for the sale of Mega12-RM2400 Radio Modules was carried out within the framework of contractual relations with the company Byteks LLC. As a result of the assessment of the investment project, it was revealed that the model can be aimed at maximizing investments in this project. Thus, assessing the attractiveness of an investment project plays an important role in forming a model for strategically oriented design of an enterprise's innovative infrastructure, defining priorities, goals and methods for managing financial resources.

Keywords: sensitivity analysis, attractiveness assessment, discount rate, investment project efficiency, competitiveness

Acknowledgements: The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 23-28-00395.

References

1. Mansurova Yu.T., Tuktarova P.A. *Ekonometrika: kurs lektsiy: uchebnoye posobiye* [Econometrics: course of lectures: textbook.]. – Ufa: UGATU, 2022, available at: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2022-173.pdf (accessed: 11/20/23).
2. Shushakova A.G., Semenova K.A., Fattakhova E.R. *Metodicheskiye rekomendatsii k vypolneniyu kursovoy raboty po distsipline "Investitsii"* [Methodological recommendations for completing course work in the discipline "Investments"]. Ufa: UGATU, 2021, available at: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/EI_izd/2021-71.pdf (accessed: 11/20/23).
3. Obukhova E.A. *Mnogokriterial'nyj podhod k ocenke investitsionnoj privlekatel'nosti innovatsionnykh proektov*. [Multi-criteria approach to assessing the investment attractiveness of innovative projects]. *Mir ekonomiki i upravleniya* [World of economics and management], 2021, no. 4, pp. 103-123.
4. Abrashin D.K. *Investitsionnaya privlekatel'nost' kak odin iz kriteriyev otsenki innovatsionnykh proektov v vysshey shkole* [Investment attractiveness as one of the criteria for evaluating innovative projects in higher education]. *Dnevnik nauki* [Science Diary], 2022, no. 3 (63), pp. 1-10.
5. Sagadeev R.A. *Prognozirovaniye denezhnykh potokov metodom transformatsii annuitetov* [Forecasting cash flows using the method of transformation of annuities]. *Finansovyy menedzhment* [Financial management], 2020, no 2, pp. 3-15.
6. Stepnov I.M., Kovalchuk Yu.A. *Investitsionnaya otsenka sovremennykh biznes-modeley* [Investment valuation of modern business models]. *Uchet. Analiz. Audit.* [Accounting. Analysis. Auditing], 2021, vol. 8, no. 2, pp. 12-23.
7. Damodaran A. *Investitsionnaya otsenka: instrumenty i metody otsenki lyubykh aktivov* [Investment valuation. Tools and techniques for determining the value of any asset]. Moscow: Alpina Publisher, 1320 p.
8. Voronina N.V., Zaretskaya V.G. *Stavka diskontirovaniya pri raschete investitsionnykh proektov* [Discount rate when calculating investment projects]. *Vestnik TOGU* [Bulletin of PNU], 2020, no.1 (56), pp. 99-108.
9. Argunov Y.R. *Razvitiye metodov otsenki investitsionnykh proektov na osnove ispol'zovaniya diskontirovanogo de-nezhnogo potoka* [Development of methods for evaluating investment projects based on the use of discounted cash flow]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo* [Economics and entrepreneurship], 2020, no. 7 (120), pp. 667-670.

Khamidullina Diana Ilvirovna. Assistant of the department of economics of entrepreneurship, Ufa university of sciences and technologies, AuthorID (RSCI): 1204681, SPIN: 8811-4946, ORCID: 0009-0007-4430-5657, diana.khamidullina.2016@mail.ru, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Karl Marx 12.

Mansurova Yulia Talgatovna. PhD in economics of the department of economics of entrepreneurship, Ufa university of sciences and technologies, mansurova.j@mail.ru, AuthorID (RSCI): 1005445, SPIN: 4596-9811, ORCID: 0000-0001-7373-0344, Russia, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Karl Marx 12.

Tuktarova Polina Andreevna. PhD in economics of the department of computer science and mathematical research, Irkutsk state agrarian university named after A.A. Ezhevsky, AuthorID (RSCI): 944221, SPIN: 7889-8580, ORCID: 0000-0003-0773-3138, ptuktarova@gmail.com, Irkutsk region, Molodezhny village 1/1.

Статья поступила в редакцию 28.11.2023; одобрена после рецензирования 29.11.2023; принята к публикации 01.03.2024.

The article was submitted 11/28/2023; approved after reviewing 11/29/2023; accepted for publication 03/01/2024.

Интеллектуальные и математические технологии в энергетике

УДК 004.822: (338.51+338.57)

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.009

Семантический анализ взаимосвязей системы моделей для оценки межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию

Ворожцова Татьяна Николаевна, Гальперова Елена Васильевна,

Гальперов Василий Ильич

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

Россия, Иркутск, tnn@isem.irk.ru

Аннотация. В работе рассмотрены возможности использования семантического подхода, а именно онтологического представления входных и выходных данных компьютерных моделей, предназначенных для выполнения научных исследований. Методический подход для оценки межотраслевой составляющей коэффициентов ценовой эластичности спроса на электроэнергию предполагает использование группы разработанных разными специалистами моделей, каждая из которых решает одну или несколько конкретных задач. Использование семантических технологий при решении поставленной задачи обеспечивает согласование понятий, интеграцию моделей, а также структурирование знаний и данных. Выполнен семантический анализ информационных потоков между моделями. Приведены примеры разработанных графических онтологий. Применение семантических технологий в научных исследованиях расширяет возможности структурирования знаний, обмена данными между процессами, приложениями, специалистами и способствует получению новых знаний.

Ключевые слова: семантический подход, онтологии, ценовая эластичность, интеграция моделей, знания

Цитирование: Ворожцова Т.Н. Семантический анализ взаимосвязей системы моделей для оценки межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию / Т.Н. Ворожцова, Е.В. Гальперова, В.И. Гальперов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 103-111. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.009.

Введение. Термин «семантический» связан со смысловым значением сущностей, описывающих предметную область. Наибольшее распространение получило использование понятия «семантический анализ текстов» в компьютерной лингвистике [1, 2], вместе с тем, семантические технологии уже имеют широкое применение в области обработки информации и приложений на предприятиях. Например, в рамках подхода ЕИ (Enterprise Information Integration) [3, 4] они используются для интеграции различных видов информации на предприятии с целью обеспечения взаимодействия людей, процессов, систем и технологий. Семантическая интеграция основывается на знании содержательного смысла используемых данных.

Авторы предлагают применить семантический анализ для описания массивов входных и выходных данных, в разработанных разными специалистами компьютерных моделях, предназначенных для выполнения научных исследований. Семантические технологии являются одним из перспективных направлений в области формализации знаний, а онтологические модели являются инструментом перехода от работы с данными к работе со знаниями и позволяют наглядно отобразить сущности предметной области, их свойства и взаимосвязи [5, 6]. Целью данной статьи является демонстрация возможностей применения онтологий (как одного из направлений семантического подхода) для описания, структурирования и наглядного представления информационных потоков процесса решения задач, который позволит специалистам в разных научных областях лучше понимать друг друга и обмениваться знаниями.

1. Решаемая задача и методический подход для оценки межотраслевой составляющей коэффициентов ценовой эластичности спроса на электроэнергию. В настоящее время возрастающий интерес к способам оценки и учету взаимосвязей спроса и цен на энергоносители вызван необходимостью определения последствий принятия тех или иных решений в области экономической и/или экологической политики.

На рис. 1 в общем виде показана реакция потребителей на изменение стоимости энергоносителей и примерный временной период для реализации мероприятий, приведенных в [7]. Эта реакция может быть охарактеризована коэффициентом эластичности, который показывает, на сколько процентов изменится спрос на данный энергоноситель при изменении его стоимости на 1 %.



Рис. 1. Временная шкала и степень влияния стоимости энергоносителей на динамику их спроса, энергоемкость отдельных отраслей и экономики в целом

Методической основой исследований ценовой эластичности спроса на энергию является применение разного вида эконометрических моделей [8-10]. Важно отметить, что эти модели используют в качестве исходной информации ряды статистических (отчетных) данных по потреблению и стоимости энергоносителей. Очевидно, что полученные на их основе оценки отражают существовавшие в прошлом факторы и взаимосвязи. Для прогнозных исследований необходимо имитировать будущие условия, в том числе возможные межотраслевые трансформации, происходящие в долгосрочной перспективе под влиянием удорожания энергоносителей.

Для оценки межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию предлагается алгоритм расчетов, показанный на рис. 2. Для учета перспективы развития экономики и энергетики принимается некий базовый сценарий, характеризующийся определенной динамикой изменения валового внутреннего продукта (ВВП), валовой продукции отраслей (X_i), конечного потребления (Y_i), цен на энергоносители, удельных показателей, энергопотребления и проч. Для выбранного для исследования года и принятой для него потребности в электроэнергии (W) определяется удовлетворяющая ее структура мощностей в электроэнергетике и соответствующая ей стоимость электроэнергии.

Если расчетная стоимость электроэнергии не совпадает с принятой в базовом варианте, то это изменение (I_3) является исходной информацией для оценки изменения цен продукции отраслей (I_{pi}) под влиянием удорожания стоимости электроэнергии. Это изменение (I_{pi}), в свою очередь, влияет на доходы отраслей, населения и бюджета, которые формируют новое значение конечного потребления (Y_i^1) для исследуемого года, отражающее влияние изменения стоимости электроэнергии. Далее, под это значение определяются новые объемы валовой продукции отраслей (X_i^1) и соответствующее им новое электропотребление (W^1). Процентное отношение разности объемов потребления электроэнергии до и после изменения стоимости электроэнергии к процентному изменению ее стоимости позволяет вычислить перспективную межотраслевую составляющую ценовой эластичности спроса на электроэнергию.

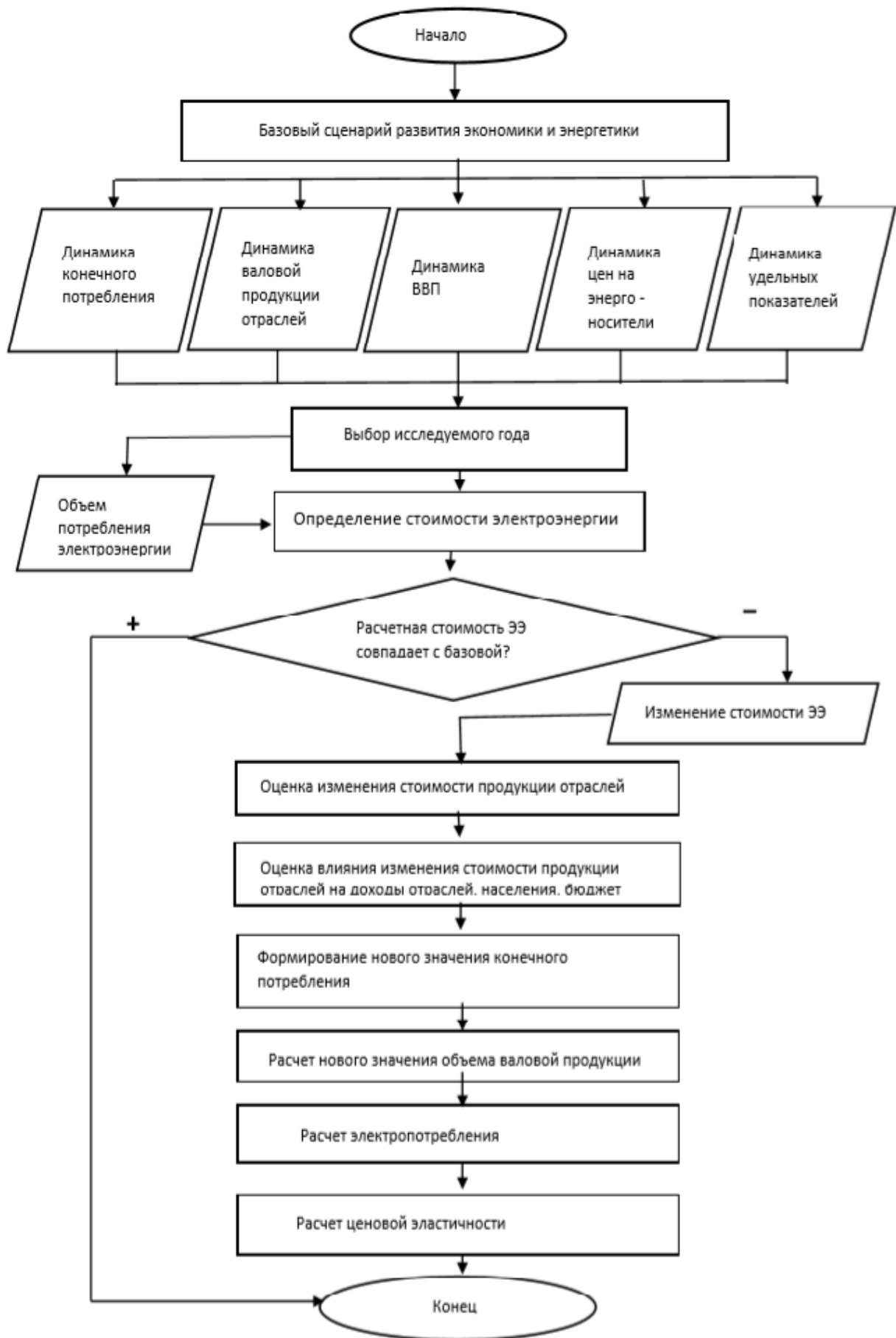


Рис. 2. Алгоритм расчета межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию

2. Краткое описание используемых моделей. Для определения межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию предлагается использовать ряд моделей из имеющегося в ИСЭМ СО РАН стенда моделей, предназначенного для оценки возможного влияния государственной ценовой и налоговой политики на развитие ТЭК [11, 12]. Этот стенд состоит из набора отдельных моделей, каждая из которых решает одну или несколько конкретных задач. Для указанной выше задачи выбираются несколько моделей из комплекса, решения на которых дополняют друг друга:

- МИДЛ – Макроэкономическая Имитационная Динамическая с распределенными Лагами оптимизационная модель предназначена для приближенной оценки возможного влияния изменений в ТЭК страны на развитие экономики. Критерий – максимум конечного потребления товаров и услуг за рассматриваемый период с учетом задаваемых условий и ограничений.
- ИНФЛЯЦИЯ – оптимизационная межотраслевая модель, определяет изменения цен в отраслях народного хозяйства при изменении стоимости энергоносителей. Критерий – минимум стоимости производства продукции отраслей.
- ОГРАН – балансовая модель, определяет изменения жизненного уровня населения, доходов и расходов бюджета, ресурсов и инвестиций при изменении стоимости энергоносителей.
- ЭНЕРДЕМ – имитационная модель, определяет потребности народного хозяйства в электроэнергии, тепле, топливе.
- МИСС-ЭЛ – Модель Имитационная Стохастическая Статическая, предназначена для приближенной оценки конкурентоспособности разных электростанций и разных способов обеспечения потребности в электроэнергии. Критерий – минимум стоимости производства и передачи электроэнергии

Для успешного исследования необходимо осуществить качественный обмен входными и выходными данными моделей. Как правило, передача данных из одной модели в другую требует их согласования и анализа с участием экспертов-исследователей. Для облегчения понимания этого процесса предлагается использовать семантические технологии.

3. Семантический анализ взаимосвязей системы моделей. Применение семантических технологий при решении поставленной задачи обеспечивает согласование понятий, интеграцию моделей, а также структурирование данных и знаний. Для визуализации и анализа межмодельных информационных потоков были использованы онтологическое моделирование и фрактальный подход при разработке самих онтологий [13, 14]. Это позволило определить основные потоки информации между всеми выбранными для решения задачи моделями. Схема информационных потоков представлена на рис. 3.

Онтологии позволяют создавать модели, отражающие определенный фрагмент предметной области, более точно соответствующий реальности, чем другие способы классификации [15-17]. Онтологическое моделирование начинается с анализа терминов. Терминология этих исследований связана со множеством разнородных понятий – отрасль, продукция, инвестиции, затраты, производство, потребление, трудоемкость и др. С учетом решаемой задачи для согласования обмена данными между моделями построена метаонтология базовых понятий, отражающих информационные взаимосвязи (рис. 4).

Каждое из базовых понятий уточняется на следующем уровне на основе фрактального подхода, предусматривающего дальнейшую детализацию метапонятий. В качестве примера на рис. 5 показана онтология понятия «Показатель», детализирующая его, в том числе, по производственным и экономическим составляющим.

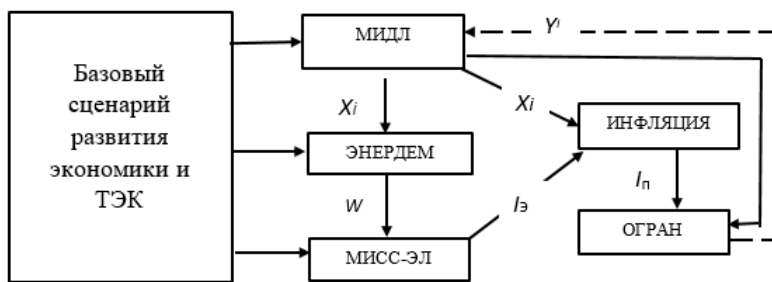


Рис. 3. Состав моделей и потоки информации для оценки межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию

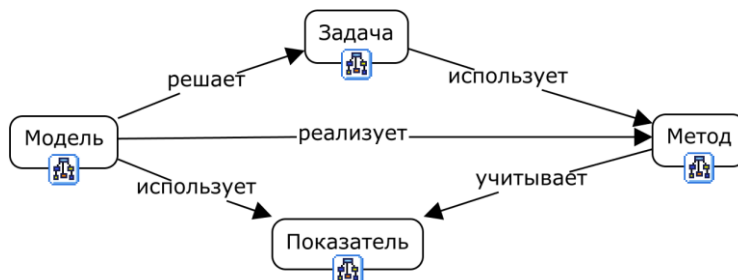


Рис. 4. Базовые понятия метаонтологии

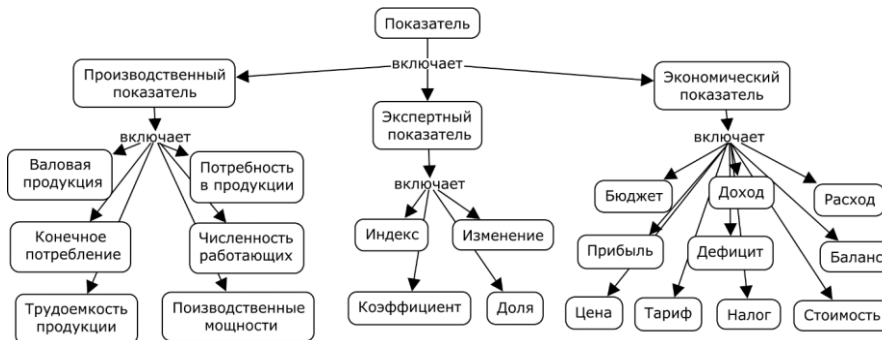


Рис. 5. Онтология понятия «Показатель»

В зависимости от «Задачи» и используемой «Модели» понятие «Показатель» включает набор компонентов, которые могут иметь разные наименования и разные свойства, требующие согласования при обмене данными между моделями, например, единицы измерения. На рис. 6 демонстрируется пример онтологии модели «ИНФЛЯЦИЯ», отражающей набор входных и выходных параметров этой модели. В процессе семантического анализа были описаны входные и выходные данные всех компьютерных моделей, нужных для решения задачи оценки межотраслевой составляющей коэффициентов ценовой эластичности спроса на электроэнергию.

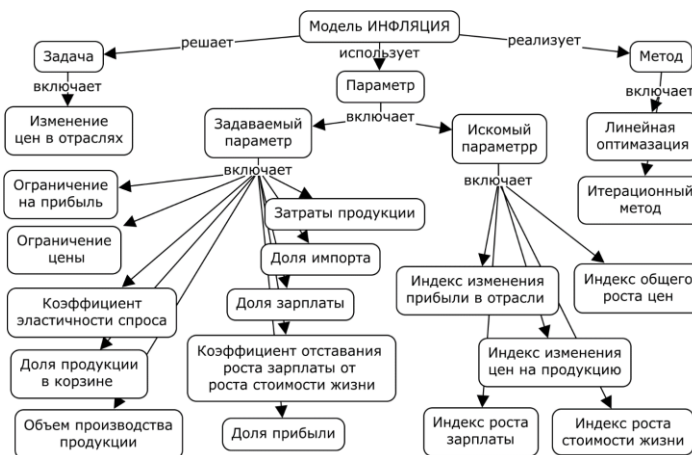


Рис. 6. Онтология модели «ИНФЛЯЦИЯ»

Проведенный семантический анализ и разработанные онтологические модели позволили систематизировать и структурировать основные понятия, необходимые для решения поставленной задачи. Результат семантического (онтологического) анализа представлен на рис. 7, отражающем наиболее важные потоки информации и показатели. При необходимости возможен и более детальный их анализ.

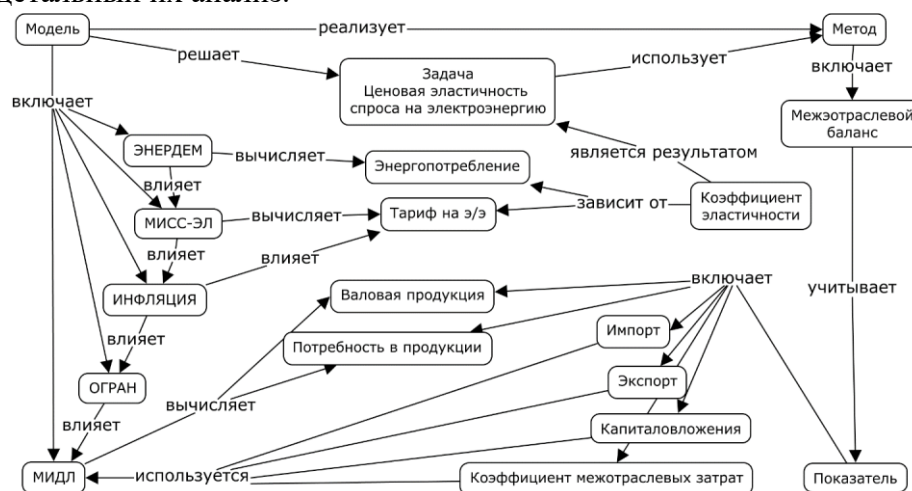


Рис. 7. Онтология основных взаимосвязей моделей и показателей

Графическое представление онтологий обеспечивает визуализацию словаря терминов соответствующей области исследования и соотношение понятий между собой, их наглядность и возможность согласования терминологии между специалистами разных областей знаний. Подобная интерпретация задачи позволяет эксперту быстрее и качественнее проводить исследования, а также обеспечивает передачу знаний в более доступной форме.

Заключение. Семантические технологии расширяют возможности обмена данными между процессами, приложениями, специалистами и способствуют получению новых знаний. Выполненный семантический анализ информационных потоков и разработанная система онтологий, на примере решения задачи оценки межотраслевой составляющей ценовой эластичности спроса на электроэнергию с применением группы компьютерных моделей, позволяет использовать эти модели не только их разработчикам, но и более широкому кругу исследователей. Онтологическое моделирование обеспечило структурирование информации и более наглядное представление знаний экспертов, работающих с описанными моделями.

В связи с тем, что данный комплекс моделей относится к категории унаследованных программных систем, но имеет важное значение для выполнения научных исследований, возможно, в дальнейшем потребуются его реинжиниринг [18]. Онтологическое моделирование информационного обмена данными является одним из первых этапов анализа и инвентаризации рассматриваемой системы моделей с точки зрения возможности реинжиниринга этого программного обеспечения.

Благодарности. Работа выполнена в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0007 рег. № AAAA-A21-121012090007-7) и проекта государственного задания № FWEU-2021-0003 (рег. № AAAA-A21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг.

Список источников

1. Батура Т.В. Семантический анализ и способы представления смысла текста в компьютерной лингвистике / Т.В. Батура // Программные продукты и системы, 2016. – № 4(116). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/semanticheskij-analiz-i-sposoby-predstavleniya-smysla-teksta-v-kompyuternoy-lingvistike>.
2. Загоруйко Ю.А Семантический подход к анализу документов на основе онтологии предметной области / Ю.А. Загоруйко, И.С. Кононенко, Е.А. Сидорова // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии. Труды Международной конференции "Диалог 2006". – Российский государственный гуманитарный университет, 2006.

3. Черняк Л. На пути к технологиям работы с информацией / Л. Черняк // Открытые системы. СУБД, 2008. – №2.
4. Черняк Л. Интеграция данных: синтаксис и семантика / Л. Черняк // Открытые системы. СУБД, 2009. – №10.
5. Тузовский А.Ф. Система интеграции информации и знаний с использованием семантических технологий / А.Ф. Тузовский, А.В. Черный // Известия Томского политехнического университета, 2009. – Т. 315. – № 5. – С. 127–132.
6. Рубашкин В.Ш. Онтологическая семантика: Знания. Онтологии. Онтологически ориентированные методы информационного анализа текстов / В.Ш. Рубашкин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 346 с.
7. Кононов Ю.Д. Влияние энергетических стратегий на энергопотребление. – Иркутск: СЭИ, 1985, 106 с.
8. Reinhard Madlener, Ronald Bernstein, Miguel Ángel Alva González Econometric estimation of energy demand elasticities. - E.ON Energy research center series, vol. 3, iss. 8, Aachen, October 2011, Germany, p. 59, ISSN: 1868-7415.
9. Xavier Labandeira, José M. Labeaga, Xiral López-Otero. Estimation of elasticity price of electricity with incomplete information. Energy Economics, 2012, no. 34, pp. 627-633.
10. M.G. Lijesen. The real-time price elasticity of electricity. Energy Economics, 2007, no. 29, pp. 249-258.
11. Кононов Ю.Д. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю.Д. Кононов, Е.В. Гальперова, Д.Ю. Кононов и др. – Новосибирск: Наука, 2009. – 178 с.
12. Гальперова Е.В. Использование стенда моделей для долгосрочного прогнозирования рыночного спроса на энергоносители / Е.В. Гальперова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2016. – № 4-2. – с. 17-27.
13. Ворожцова Т.Н. Семантическое моделирование в исследованиях устойчивости энергетических и социо-экологических систем / Т.Н. Ворожцова, Д.В. Пестерев, В.Р. Кузьмин // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – №4(24). – С. 31-43. – DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.003.
14. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л.В. Массель // Онтология проектирования, 2016. – Т. 6. – № 2(20). – С. 149-161. – DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
15. Хорошевский В.Ф. Семантические технологии: ожидания и тренды / В.Ф. Хорошевский // II Международная научно-техническая конференция «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS - 2012)». – Минск, 2012
16. Массель Л.В. Семантические технологии на основе интеграции онтологического, когнитивного и событийного моделирования / Л.В. Массель, А.Г. Массель // III междунар. научно-технич. конф. Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. Минск Белоруссия, 2013. – С.247-250.
17. Массель Л.В. Когнитивная графика и семантическое моделирование для геопространственных решений в энергетике / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Р.А. Иванов // Тр. 21-й междунар. конф. Интеркарто/ИнтерГИС «Устойчивое развитие территорий: картографо-геоинформационное обеспечение», Краснодар-Фиджи, 2015, – С.496-502.
18. Массель А.Г. Адаптация методики реинжиниринга унаследованных программных систем / А.Г. Массель, Т.Р. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – №4(24). – С. 88-99. – DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.009.

Ворожцова Татьяна Николаевна. Кандидат технических наук, ведущий инженер отдела систем искусственного интеллекта в энергетике Института систем энергетики им. ЛА. Мелентьева. Научные интересы: семантические технологии, онтологии и онтологические системы, когнитивное моделирование, представление знаний. AuthorID: 11040, SPIN: 4372-0299, ORCID: 0000-0002-4022-8937, tnn@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Гальперова Елена Васильевна. Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института систем энергетики им. ЛА. Мелентьева. Основные научные интересы: исследование и долгосрочное прогнозирование динамики и структуры энергопотребления, конъюнктуры региональных энергетических рынков с учетом научно-технологического прогресса, качества жизни населения, ценовых и экологических показателей и ограничений. AuthorID: 73970, SPIN: 5744-2377, ORCID: 0000-0001-6749-8630, galper@isem.irk.ru, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова 130.

Гальперов Василий Ильич. Кандидат технических наук, младший научный сотрудник Института систем энергетики им. ЛА. Мелентьева. Основные научные интересы: проектирование и разработка многоагентных систем для исследования перспектив развития энергетики. AuthorID: 991603, SPIN: 8567-0618, ORCID: 0000-0003-4691-3713, galperov@gmail.com, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова 130.

UDC 004.822: (338.51+338.57)

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.009

Semantic analysis of interrelationships within a system of models for evaluating the price elasticity of demand for electricity

Tatyana N. Vorozhtsova, Elena V. Galperova, Vasily I. Galperov

Melentiev Energy Systems Institute,

Russia, Irkutsk, *tnn@isem.irk.ru*

Abstract. The paper examines the possibilities of using a semantic approach, namely an ontological representation of information used in computer models designed to carry out research. The proposed methodological approach for assessing the cross-industry component of the coefficients of price elasticity of demand for electricity involves the use of a group of computer models developed by different specialists, each of which solves one or more specific problems. The use of semantic technologies in solving a given problem ensures the coordination of concepts, the integration of models and applications, as well as the structuring of knowledge and information. A semantic analysis of information flows between models was performed. Examples of developed graphic ontologies are given. Semantic technologies expand the possibilities of structuring information, exchanging data between processes, applications, specialists, and obtaining new knowledge.

Keywords: semantic approach, ontologies, price elasticity, integration of models, knowledge

Acknowledgements: The study was carried out under State Assignment Project № FWEU-2021-0007 per. № AAAA-A21-121012090007-7 (. № AAAA-A21-121012090007-7) and State Assignment Project no. FWEU-2021-0003 (reg. no AAAA-A21-121012090014-5) of the Fundamental Research Program of Russian Federation 2021-2030, some results were obtained with partial funded by RFBR project no 20-010-00204.

References

1. Batura T.V. Semanticheskij analiz i sposoby predstavleniya smysla teksta v komp'yuternoj lingvistike [Semantic analysis and ways of representing the meaning of a text in computational linguistics]. Programmnyye produkty i sistemy [Software products and systems], 2016, no 4(116), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/semanticheskij-analiz-i-sposoby-predstavleniya-smysla-teksta-v-kompyuternoy-lingvistike>.
2. Zagorulko Yu.A., Kononenko I.S., Sidorova E.A. Semanticheskij podhod k analizu dokumentov na osnove ontologii predmetnoj oblasti [Semantic approach to document analysis based on domain ontology]. Komp'yuternaya lingvistika i intellektual'nyye tekhnologii. Trudy Mezhdunarodnoy konferentsii "Dialog 2006" [Computational linguistics and intellectual technologies. Proceedings of the International Conference "Dialogue 2006"], Rossiyskiy gosudarstvennyy gumanitarnyy universitet [Russian State University for the Humanities], 2006.
3. Chernyak L. Na puti k tekhnologiyam raboty s informaciej [On the way to technologies of working with information]. Otkrytye sistemy, SUBD [Open systems, DBMS], 2008, no. 2.
4. Chernyak L. Integraciya dannyh: sintaksis i semantika [Data integration: Syntax and semantics]. Otkrytye sistemy, SUBD [Open systems, DBMS], 2009, no. 10.
5. Tuzovsky A.F. Sistema integracii informacii i znaniy s ispol'zovaniem semanticheskikh tekhnologij [System of integration of information and knowledge using semantic technologies]. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Tomsk polytechnic university], 2009, vol. 315, no 5, pp. 127-132
6. Rubashkin V.S. Ontologicheskaya semantika. Znaniya. Ontologii. Ontologicheski orientirovannyye metody informacionnogo analiza tekstov [Ontological semantics. Knowledge. Ontologies. Ontologically oriented methods of information analysis of texts]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012, 346 p.
7. Kononov Yu.D. Vliyanie energeticheskikh strategij na energopotreblenie [Impact of energy policies on energy consumption]. Irkutsk, SEI, 1985, 106 p.
8. Reinhard Madlener, Ronald Bernstein, Miguel Ángel Alva González Econometric estimation of energy demand elasticities. - E.ON Energy research center series, vol. 3, iss. 8, Aachen, October 2011, Germany, p. 59, ISSN: 1868-7415.
9. Xavier Labandeira, José M. Labeaga, Xiral López-Otero. Estimation of elasticity price of electricity with incomplete information. Energy Economics, 2012, no. 34, pp. 627-633.
10. M.G. Lijesen. The real-time price elasticity of electricity. Energy Economics, 2007, no. 29, pp. 249-258.
11. Kononov Yu.D., Galperova E.V., Kononov D.Yu. et al. Metody i modeli prognoznyh vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki [Methods and models for projections of energy-economy interactions]. Novosibirsk, Nauka [Science], 2009, 178 p.
12. Galperova E.V. Ispol'zovanie stenda modelej dlya dolgosrochnogo prognozirovaniya rynochnogo sprosa na energositoliteli [Set of models for long-term forecasting of market energy demand]. Informacionnye i matematicheskie

- tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2016, no. 4-2, pp. 17-27.
13. Vorozhova T.N., Pesterev D.V., Kuz'min V.R. Semanticheskoe modelirovanie v issledovaniyah ustojchivosti energeticheskikh i socio-ekologicheskikh system [Semantic modeling in sustainability studies of energy and socio-ecological systems]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. (24), pp. 31-43, DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.003.
 14. Massel' L.V. Fraktal'nyj podhod k strukturirovaniyu znaniy i primery ego primeneniya [Fractal approach to structuring knowledge and examples of its application]. Ontologiya proektirovaniya [Design Ontology], 2016, vol.6, no. 2(20), pp. 149-161, DOI:10.18287/2223-9537-2016-6-2-149-161.
 15. Khoroshevsky V.F. Semanticheskie tehnologii: ozhidaniya i trendy [Semantic technologies: expectations and trends]. Trudy II Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem [Proc. of II International Scientific and Technical Conference "Open Semantic technologies for designing Intelligent systems (OSTIS - 2012)"]», Minsk, 2012.
 16. Massel' L.V., Massel' A.G. Semanticheskie tehnologii na osnove integracii ontologicheskogo, kognitivnogo i sobytijnogo modelirovaniya [Semantic technologies based on the integration of ontological, cognitive and event modeling]. III mezhdunar. nauchno-tehnich. konf. Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovaniya intellektual'nyh sistem [III international scientific and technical conf. Open semantic technologies for designing intelligent systems], Minsk, Belarus, 2013, pp.247-250.
 17. Massel' L.V., Massel' A.G., Ivanov R.A. Kognitivnaya grafika i semanticheskoe modelirovanie dlya geopros-transtvennyh reshenij v energetike [Cognitive graphics and semantic modeling for geospatial solutions in the energy sector]. Tr. 21-j mezhdunar.konf. Interkarto/InterGIS “Ustojchivoe razvitie territorij: kartografo-geoinfor-macionnoe obespechenie” [Proc. 21st International Conf. Interkarto/InterGIS “Sustainable development of terri-tories: cartographic and geoinformation support”], Krasnodar-Fiji, 2015, pp.496-502.
 18. Massel' A.G., Mamedov T.R. Adaptaciya metodiki reinzhiniringa unasledovannyh programmnyh sistem [Adapta-tion of techniques for reengineering legacy software systems]. Informacionnye i matematicheskie tehnologii v nauke i upravlenii [Information and mathematical technologies in science and management], 2021, no. 4(24), pp. 88-99, DOI: 10.38028/ESI.2021.24.4.009.

Vorozhtsova Tatyana Nikolaevna. PhD in technics, leading engineer of the department of artificial intelligence systems in Melentiev energy systems institute. Research interests: semantic technologies, ontologies and ontological systems, cognitive modeling, knowledge representation. AuthorID: 11040, SPIN: 4372-0299, ORCID: 0000-0002-4022-8937, tnn@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontova 130.

Galperova Elena Vasilievna. PhD in technics, associate professor, senior researcher at the Melentiev energy systems institute. Main scientific interests: research and long-term forecasting of the dynamics and structure of energy consumption, conditions of regional energy markets, taking into account scientific and technological progress, quality of life of the population, price and environmental indicators and restrictions. AuthorID: 73970, SPIN: 5744-2377, ORCID: 0000-0001-6749-8630, galper@isem.irk.ru, 664033, Irkutsk, st. Lermontova 130.

Galperov Vasily Ilyich. PhD in technics, junior researcher at the Melentiev energy systems institute. Main scientific interests: design and development of multi-agent systems for studying the prospects for energy development; AuthorID: 991603, SPIN: 8567-0618, ORCID: 0000-0003-4691-3713, galperov@gmail.com, 664033, Irkutsk, st. Lermontova 130.

Статья поступила в редакцию 17.11.2023; одобрена после рецензирования 16.02.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 11/17/2023; approved after reviewing 02/16/2024; accepted for publication 03/11/2024.

УДК 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010

Анализ уязвимости автономных микросетей

Еделев Алексей Владимирович¹, Карамов Дмитрий Николаевич²,
Башарина Ольга Юрьевна^{3,4}

¹Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
Россия, Иркутск, *flower@isem.irk.ru*

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, Россия, Иркутск

³Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,
Россия, Иркутск

⁴Уральский государственный экономический университет, Россия, Екатеринбург

Аннотация. Статья является заключительной из цикла, посвященного исследованию живучести изолированных энергетических комплексов локального уровня или автономных микросетей, с помощью ранее разработанной технологии цифрового двойника сложной технической системы. Под живучестью понимается свойство этих энергетических комплексов адаптироваться к крупным возмущениям и восстанавливать свое исходное состояние после их воздействия. Исследование живучести этих энергетических комплексов локального уровня обычно строится на многовариантных вычислительных экспериментах, однако при существовании обратной связи цифрового двойника с микросетью или испытательным стендом можно также использовать натурные опыты. Двухстороннюю связь цифрового двойника с микросетью обеспечивает специализированная предметно-ориентированная среда. В статье демонстрируется применение ранее описанной методики оценки живучести автономной микросети на анализе уязвимости системы энергоснабжения гипотетического туристического лагеря, условно расположенного на побережье озера Байкал и не имеющего связей с внешними системами энергетики. В частности, был проведен поиск критических с точки зрения живучести элементов этой микросети, состоящей из фотоэлектрических преобразователей, аккумуляторных батарей и дизель-генераторной установки. Проведенные вычислительные эксперименты показали, что критическими элементами заданной микросети являются дизель-генераторная установка и аккумуляторные батареи. Дальнейшее развитие данной работы видится в совершенствовании методов и инструментальных средств конструирования цифровых двойников автономных микросетей.

Ключевые слова: микросеть, живучесть, уязвимость, энергетический хаб, предметно-ориентированная среда, испытательный стенд

Цитирование: Еделев А.В. Анализ уязвимости автономных микросетей / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 112-121. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010.

Введение. Автономные системы энергоснабжения являются разновидностью энергетических комплексов локального уровня (микросетей), в которых совместное использование возобновляемых источников энергии с традиционными энергетическими установками и накопителями электрической энергии является экономически эффективным способом энергоснабжения потребителей [1, 2]. Особую значимость и большое распространение возобновляемые источники энергии получили при электрификации труднодоступных территорий, не имеющих связи с традиционными топливно-энергетическими комплексами [3].

Изолированность автономных микросетей повышает значимость исследования их функционирования в экстремальных условиях [4]. Способность противостоять экстремальным условиям, не допуская каскадного развития аварий с массовым нарушением режима энергоснабжения потребителей, и восстанавливать исходное состояние или близкое к нему характеризует одно из свойств энергетических комплексов – живучесть [5-7].

Исследование живучести начинается с анализа одной из её составляющих – уязвимости, которая в литературе имеет две взаимодополняющие интерпретации [8]. В глобальном контексте уязвимость отражает «пассивную» реакцию системы в виде падения производительности

сти на возникновение экстремальных условий. В локальном контексте уязвимость характеризует восприимчивость элементов системы к отдельным классам крупных возмущений. Элементы, отказ которых приводит к масштабным негативным последствиям для потребителей энергоресурсов, являются ключевыми с точки зрения живучести и называются критическими. Между интерпретациями существует тесная связь, объясняемая тем, что уязвимость системы в целом определяется степенью защищённости критических элементов.

Традиционно исследование живучести строится на проведении масштабных вычислительных экспериментов, в ходе которых разыгрывается множество сценариев крупных возмущений с применением математических моделей [9]. В работе [10] обсуждается возможность применения цифрового двойника для исследования живучести микросетей. В работе [11] представлена архитектура предметно-ориентированной среды, в которой функционирует цифровой двойник микросети, и разработана методика оценки живучести автономной микросети с помощью цифрового двойника. Цель данной статьи заключается в апробации разработанной методики оценки живучести на анализе уязвимости системы энергоснабжения туристического лагеря.

Анализ уязвимости автономной микросети. Как было сказано во введении, уязвимость энергетического комплекса имеет две взаимодополняющие интерпретации: глобальную и локальную. Вследствие этого различные виды анализа уязвимости обычно лежат между глобальным анализом уязвимости и поиском критических элементов.

Глобальный анализ уязвимости проводится путём воздействия на энергетический комплекс возмущений с возрастающей амплитудой. По мере увеличения силы воздействия возмущений производительность комплекса снижается. По скорости снижения производительности можно судить об уязвимости энергетического комплекса как его системном свойстве.

Цель поиска критических элементов заключается в том, чтобы определить те системные элементы или их группы, отказ которых несёт наихудшие последствия для энергетического комплекса [8].

Рассмотрим далее поиск критических элементов для системы энергоснабжения туристического лагеря, рассчитанного на 100 человек, условно расположенного в бухте Мандархан озера Байкал (Ольхонский район Иркутской области). Энергоснабжение лагеря осуществляется автономной микросетью, состоящей из следующих компонентов: фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), сетевой инвертор (СИН), аккумуляторные батареи (АБ), батарейный инвертор (БИН) и дизель-генераторная установка (ДГУ). На рис. 1 показана конфигурация микросети лагеря в виде одного энергетического хаба [12-14].

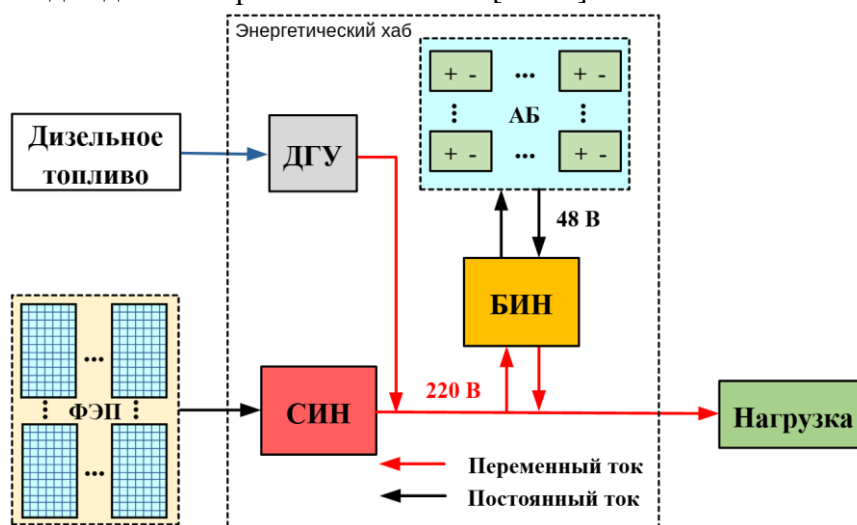


Рис. 1. Конфигурация автономной микросети лагеря

Предполагается, что электроснабжение лагеря контролируется цифровым двойником автономной микросети, который подчиняется следующим правилам [15]:

- если генерация ФЭП превышает уровень нагрузки, то выполняется прямое снабжение потребителя и аккумулярование энергии в АБ;
- если генерации от ФЭП недостаточно, то необходимый объем энергии поступает из АБ;
- если АБ не полностью заряжены, то для зарядки АБ при необходимости включается резервный источник питания (ДГУ).

Характеристики оборудования микросети лагеря приведены в табл. 1. Почасовой годичный график электрической нагрузки лагеря, извлечённый из циклической базы данных мониторинга, показан на рис. 2.

Таблица 1. Характеристики оборудования микросети лагеря

Название параметра, ед. измерения	Значение
Ёмкость АБ, кВт*ч	144
Мощность БИН, кВт	48
Мощность ФЭП, кВт	50
Мощность СИН, кВт	50
Мощность ДГУ, кВт	25
Удельный расход топлива ДГУ, кг/кВт	0,375
Запас дизельного топлива, кг	1000

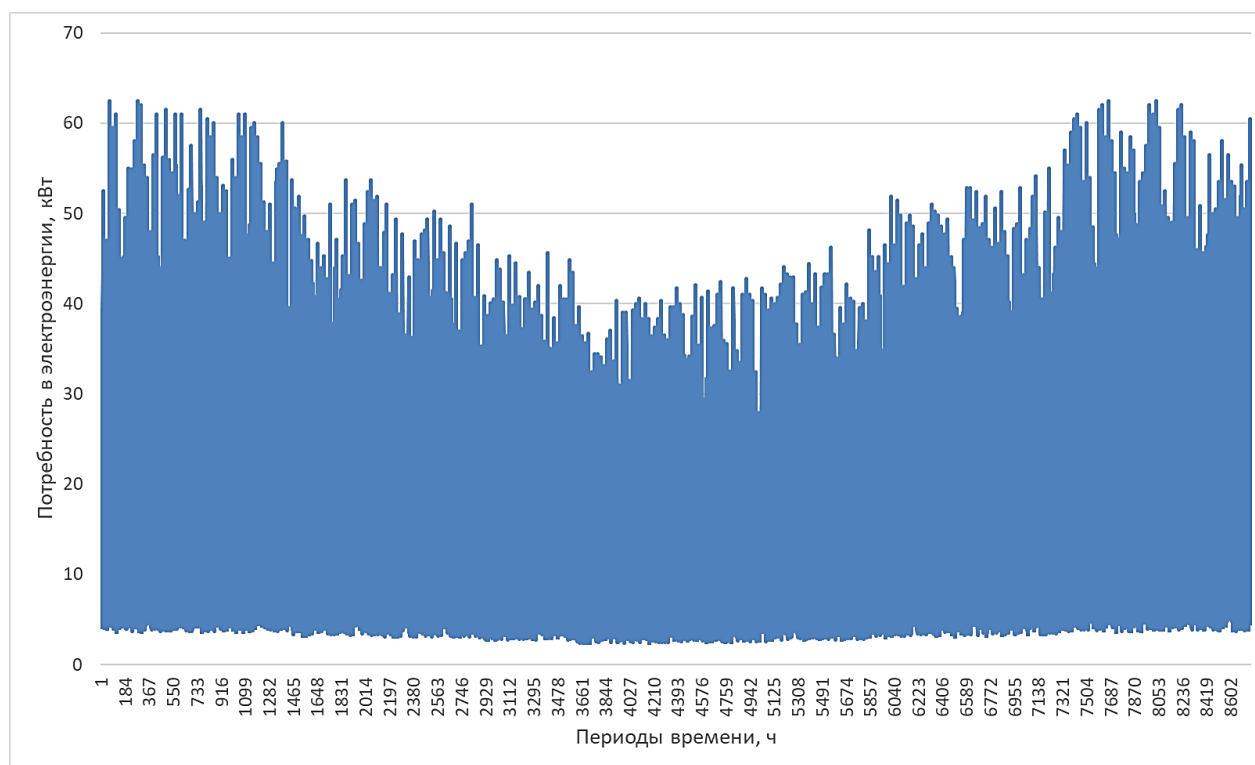


Рис. 2. Почасовой годичный график электрической нагрузки лагеря

Для поиска критических элементов необходимо провести оценку живучести заданной автономной микросети в соответствии с этапами методики оценки живучести [11]:

- 1 этап. Формирование множества сценариев возмущений.
- 2 этап. Генерация последовательностей состояний микросети с помощью цифрового двойника.
- 3 этап. Расчет, нормализация показателей.
- 4 этап. Построение кривых живучести.

На первом этапе, исходя из графика энергетической нагрузки лагеря (рис. 2), выберем в качестве экстремальных условий функционирования для сценариев крупных возмущений одни из суток января, когда генерации основного источника электроэнергии (ФЭП) явно недостаточно для покрытия нагрузки. Покрытие почасовой потребности в электроэнергии от каждого источника микросети в выбранные январские сутки приводится в табл. 2.

Таблица 2. Потребление и генерация электроэнергии в лагере

Час	Потребление, кВт	ДГУ, кВт	ФЭП, кВт	Поток разряда АБ, кВт
1	4,15	0,00	0,00	4,15
2	4,15	0,00	0,00	4,15
3	5,45	0,00	0,00	5,45
4	5,20	0,00	0,00	5,20
5	5,15	25,00	0,00	0,00
6	18,60	22,15	0,00	0,00
7	32,10	25,00	0,00	7,10
8	36,40	22,06	0,00	14,34
9	20,20	25,00	0,00	0,00
10	17,85	25,00	0,00	0,00
11	18,75	25,00	1,75	0,00
12	35,10	0,00	4,53	30,57
13	23,00	25,00	8,02	0,00
14	16,95	25,00	10,61	0,00
15	18,30	25,00	7,38	0,00
16	27,25	25,00	3,75	0,00
17	39,60	25,00	0,78	13,82
18	44,50	25,00	0,00	19,50
19	52,50	25,00	0,00	27,50
20	41,40	25,00	0,00	16,40
21	43,05	16,59	0,00	26,46
22	24,25	25,00	0,00	0,00
23	18,60	25,00	0,00	0,00
24	5,45	25,00	0,00	0,00

На рис. 3 для выбранных январских суток показана почасовая генерация ФЭП, ДГУ, поток и заряд АБ. Пунктирной линией показан график нагрузки. Отрицательные значения мощности по оси ординат обозначают поток заряда АБ, который создаёт ДГУ, например, с 9 до 11 и с 22 до 24 часов.

Множество сценариев крупных возмущений для заданной микросети составляют отказы источников электроэнергии: АБ, ФЭП и ДГУ.

На втором этапе методики оценки живучести для каждого сценария из множества крупных возмущений программным модулем для расчёта потокораспределения энергоресурсов [10] генерируются последовательности состояний исследуемой автономной микросети.

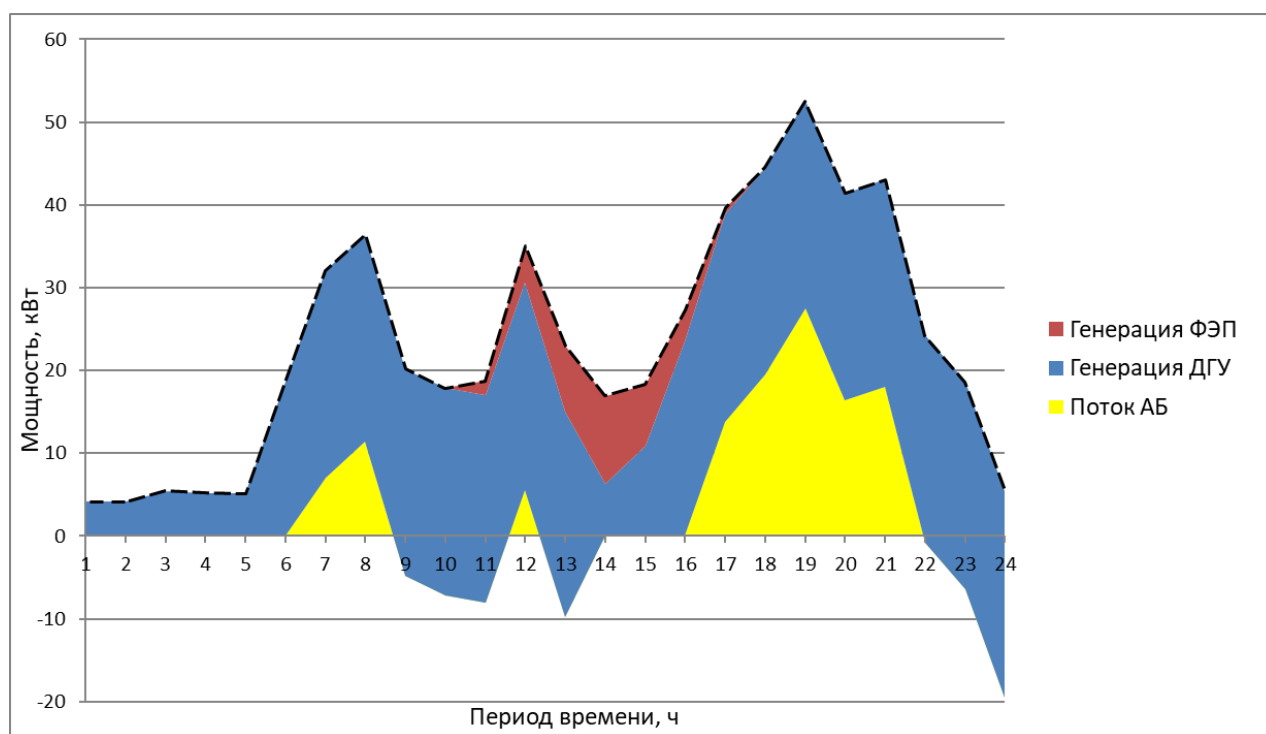


Рис. 3. Покрытие электрической нагрузки лагеря с помощью ФЭП, ДГУ и АБ

На следующем этапе происходят расчет и нормализация показателей производительности и сводных показателей. Для заданной автономной микросети естественным показателем производительности является величина покрытой нагрузки. Этот единственный показатель в данном примере не требует нормализации. В качестве сводного показателя можно принять суммарную величину недопоставки электроэнергии. Значения выбранного сводного показателя для заданного множества сценариев возмущений приводятся в табл. 3.

Таблица 3. Суточные недопоставки электроэнергии

Сценарий возмущения	Суточная недопоставка электроэнергии, кВт*ч
Отказ АБ	119,3
Отказ ФЭП	0,3
Отказ ДГУ	417,5

Последствия отказов АБ, ФЭП и ДГУ в виде недопоставки электроэнергии, выделенные чёрным цветом, показаны соответственно на рис. 4, 5 и 6. Как и на рис. 3, отрицательные значения мощности по оси ординат обозначают поток заряда АБ.

На заключительном этапе оценки живучести необходимо построить кривые живучести. Такими кривыми на рис. 4, 5 и 6 будут ломаные пунктирные линии, проходящие под чёрными областями и характеризующими покрытую потребность лагеря в электроэнергии.

Анализ полученных значений показателя недопоставки электроэнергии (табл. 3) и графиков покрытия электрической нагрузки при различных сценариях возмущений показывает, что критическими элементами исследуемой автономной микросети являются ДГУ и АБ.

В результате проведённого анализа уязвимости заданной автономной микросети с точки зрения надёжного энергоснабжения можно предложить собственникам лагеря установку дополнительного ДГУ и ещё одной секции ёмкости АБ. Однако, учитывая, что лагерь находится на природоохранной территории, вместо второго резервного ДГУ лучше рассмотреть возможность использования ветрогенератора как дополнительного основного источника электроэнергии.

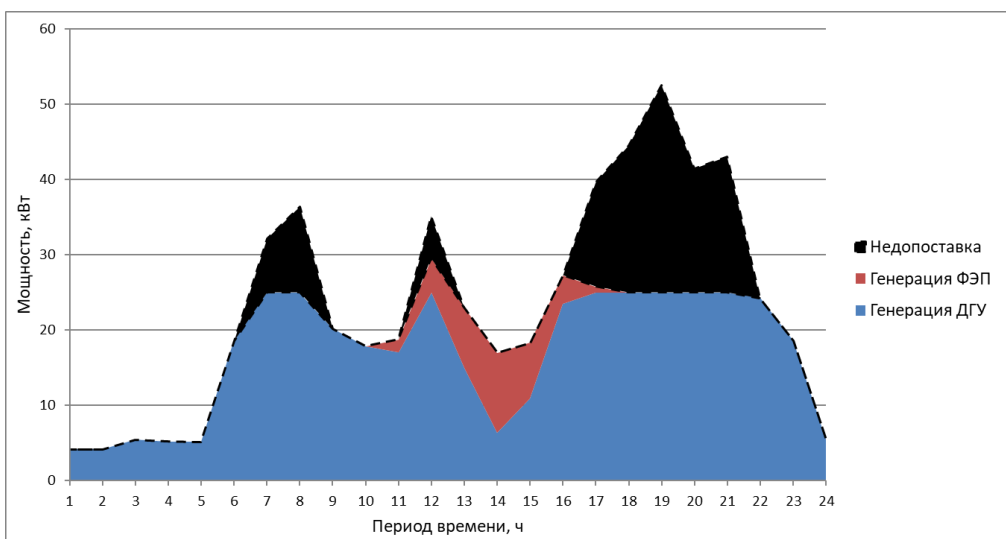


Рис. 4. Покрывание электрической нагрузки лагеря с помощью ФЭП и ДГУ при отказе АБ

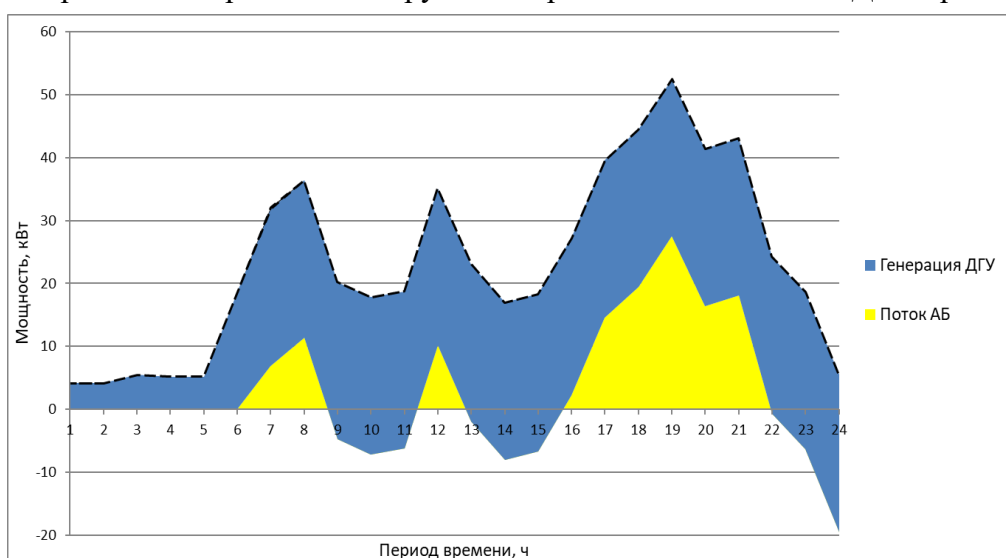


Рис. 5. Покрывание электрической нагрузки лагеря с помощью ДГУ и АБ при отказе ФЭП

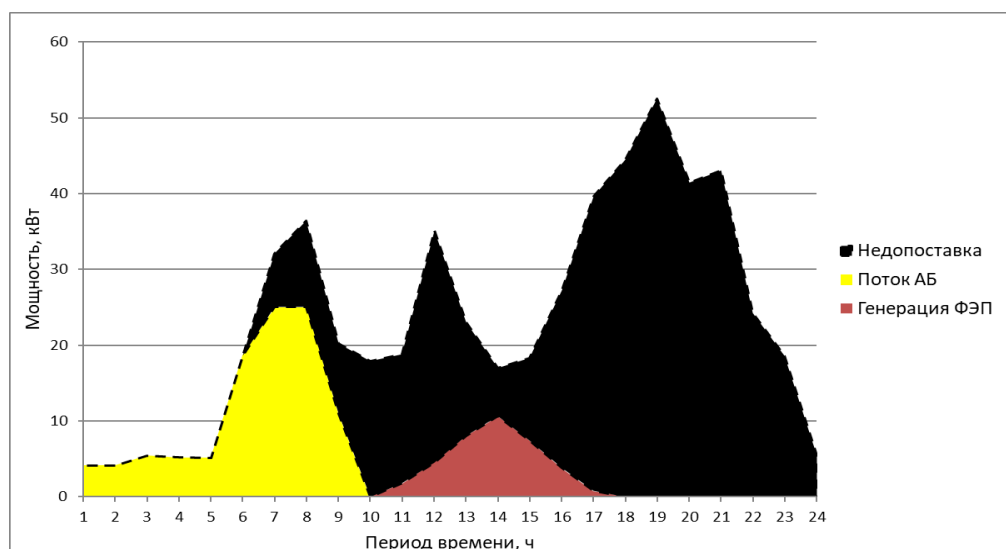


Рис. 6. Покрывание электрической нагрузки лагеря с помощью ФЭП и АБ при отказе ДГУ

Заключение. Анализ уязвимости энергетического комплекса нацелен на формирование представительного множества наихудших крупных возмущений, которые причиняют максимальный ущерб исследуемой системе. В анализе уязвимости акцент делается не на природе

крупных возмущений, а на величине и масштабе последствий отказа элементов системы по причине воздействия на них некоторого возмущения. Вследствие этого сценарий каждого из указанных возмущений моделирует отказ группы критических элементов. Определение состава и задание размера этих групп являются отдельными задачами анализа уязвимости энергетического комплекса. В данной работе рассмотрено решение первой из них, а именно поиск критических элементов на примере системы энергоснабжения гипотетического туристического лагеря, который не имеет соединений с внешними системами энергоснабжения.

Особенностью представленного в статье подхода к анализу уязвимости является его направленность на использование цифрового двойника, который имеет двухстороннюю связь с испытательным стендом. С одной стороны, это позволяет при исследовании поведения энергетических комплексов применять не только вычислительные эксперименты, но и натурные опыты. Также цифровой двойник по сравнению математической моделью имеет обратную связь с объектом исследования, что позволяет в динамике влиять на поведение микросети, исходя из разницы между прогнозируемыми и реальными значениями технологических параметров оборудования. С другой стороны, эта особенность и моделирование микросети на основе концепции энергетического хаба ограничивают применимость представленного подхода энергетическими комплексами локального уровня, которые в силу экстремальных условий потеряли соединение с внешними системами энергетики, либо осуществляют энергоснабжение отдаленных или труднодоступных территорий.

Дальнейшее развитие данной работы видится в совершенствовании методов и инструментальных средств конструирования цифровых двойников, через которые осуществляется взаимодействие предметно-ориентированной среды для исследования живучести с силовым оборудованием и автоматикой реальных микросетей или испытательных стендов, имитирующих их работу.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FWEW-2021-0005 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах» с использованием ресурсов центров публичного доступа «Иркутский суперкомпьютерный центр СО РАН» (<http://hpc.icc.ru>) и «Сибирский суперкомпьютерный центр СО РАН» (<http://www.sccc.icmmg.nsc.ru>).

Список источников

1. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models, *Energy*, 2014, v. 65, pp.1-17, DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041.
2. Mancò G., Tesio U., Guelpa E., Verda V. A review on multi energy systems modelling and optimization. *Applied Thermal Engineering*, 2023, p.121871, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121871.
3. Карамов Д.Н. Интеграция процесса категоризации электрохимических накопителей энергии в задачу оптимизации состава оборудования автономных энергетических комплексов, использующих возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2019. – Т. 330. – № 5. – С. 113-130. – DOI:10.18799/24131830/2019/5/262.
4. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy*, 2019, v. 240, pp. 56-72, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.055.
5. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х томах. Т. 1. Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 480 с.
6. Воропай Н.И. Живучесть ЭЭС: методические основы и методы исследований / Н.И. Воропай // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1991. – № 6. – С. 52-59.
7. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, v. 217, 01018, DOI: 10.1051/epjconf/201921701018.
8. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part O: Journal of risk and reliability*, 2008, v. 222, no. 2, pp. 235-243.

9. Feoktistov A., Edelev A., Tchernykh F. et al. An approach to implementing high-performance computing for problem solving in workflow-based energy infrastructure resilience studies. *Computation*, 2023, v. 11, no. 12, p. 243, DOI: 10.3390/computation11120243.
10. Еделев А.В. Моделирование автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 3(31). – С.74-85. – DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
11. Еделев А.В. Методика оценки живучести автономной микросети / А.В. Еделев, Д.Н. Карамов, О.Ю. Башарина // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2023. – № 4(32). – С.117-126. – DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.010.
12. Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P. et al. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 2007, v. 5, no. 1, pp. 24-30.
13. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-Ivatloo B., Yousefi H. Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, v. 80, pp. 1512-1527, DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030.
14. Воропай Н.И. Методика управления спросом на электро- и теплоэнергию в интегрированной энергосистеме с активными потребителями / Н.И. Воропай, В.А. Стенников, Е.А. Барахтенко, О.Н. Войтов // Известия РАН. Энергетика, 2020. – №. 4. – С. 11-23. – DOI: 10.31857/S0002331020040081.
15. Карамов Д.Н. Моделирование энергоснабжения объектов охраняемой Байкальской природной территории на основе возобновляемых источников энергии / Д.Н. Карамов, А.В. Еделев, А.Г. Феокистов // Международный технико-экономический журнал, 2020. – № 5. – С. 7–24. – DOI: 10.34286/1995-4646-2020-74-5-7-24.

Еделев Алексей Владимирович. К.т.н., старший научный сотрудник Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. Область научных интересов – живучесть энергетических комплексов, математическое моделирование, распределенные вычисления. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, flower@isem.irk.ru.

Карамов Дмитрий Николаевич. К.т.н., доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, Байкальский институт БРИКС. Область научных интересов – энергетические системы и комплексы, возобновляемые источники энергии, математическое моделирование. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru.

Башарина Ольга Юрьевна. К.т.н., доцент, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, доцент Уральского государственного экономического университета. Область научных интересов – системный анализ и моделирование сложных систем. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, basharinaolga@mail.ru.

UDC 519.873+621.311

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.010

Vulnerability analysis of autonomous microgrids

Alexey V. Edelev¹, Dmitriy N. Karamov², Olga Yu. Basharina^{3,4}

¹Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Russia, Irkutsk, flower@isem.irk.ru

²National Research Irkutsk State Technical University, Russia, Irkutsk

³Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory of SB RAS, Russia, Irkutsk

⁴Ural State University of Economics, Russia, Yekaterinburg

Abstract. This paper is the final article in the series devoted to the study of resilience of isolated local-level energy complexes or autonomous microgrids using the previously developed technology of a digital twin of a complex technical system. By resilience we mean the property of these energy complexes to adapt to large perturbations and restore their initial state after their impact. The study of resilience of these energy complexes of local level is usually based on multivariate computational experiments, however, if there is feedback of the digital twin with a microgrid or test bench, it is possible to use field experiments. The two-way communication between the digital twin and the microgrid is provided by a specialised subject-oriented environment. The paper demonstrates the application of the previously described methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid by analysing the vulnerability of the power supply system of a hypothetical tourist camp conditionally located on the

shore of Lake Baikal and having no connections with external power systems. In particular, we searched for critical elements of this microgrid, consisting of photovoltaic converters, accumulator batteries and a diesel-generator set from the point of view of resilience. The computational experiments carried out showed that the critical elements of a given microgrid are the diesel generator set and the batteries. Further development of this work is seen in the improvement of methods and tools for the design of digital doubles of autonomous microgrids.

Keywords: microgrid, resilience, vulnerability, energy hub, subject-oriented environment, testbed

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. № FWEW-2021-0005 «Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments».

References

1. Mancarella P. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models, *Energy*, 2014, v. 65, pp.1-17, DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041.
2. Mancò G., Tesio U., Guelpa E., Verda V. A review on multi energy systems modelling and optimization, *Applied Thermal Engineering*, 2023, p.121871, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121871.
3. Karamov D.N. Integratsiya protsessy kategorizatsii elektrokhimicheskikh istochnikov energii v unikal'nom sostave oborudovaniya avtonomnykh energeticheskikh kompleksov, ispol'zuyushchikh istochniki energii [Integration of the storage battery categorization process into the task of optimizing the equipment of stand-alone energy systems with renewable energy sources]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo assets engineering], 2019, v. 330, no. 5, pp. 113-130, DOI: 10.18799/24131830/2019/5/262.
4. Hussain A., Bui V.H., Kim H.M. Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience. *Applied energy*, 2019, v. 240, pp. 56-72, DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.02.055.
5. Nadezhnost' sistem energetiki i ikh oborudovaniya [Reliability of energy systems and their equipment], vol. 1, ed. Rudenko Yu.N., Moscow, Energoatomizdat, 1994, 480 p.
6. Voropay N.I Zhivuchest' EES: metodicheskiye osnovy i metody issledovaniy [Vitality of EPS: methodological foundations and research methods]. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* [Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Energy and transport], 1991, no. 6, pp. 52-59.
7. Voropai N., Rehtanz C. Flexibility and resiliency of electric power systems: analysis of definitions and content. *EPJ Web of Conferences*, 2019, v. 217, 01018, DOI: 10.1051/epjconf/201921701018.
8. Jonsson H., Johansson J., Johansson H. Identifying critical components in technical infrastructure networks. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part O: Journal of risk and reliability*, 2008, v. 222, no. 2, pp. 235-243.
9. Feoktistov A., Edelev A., Tchernykh F. et al. An approach to implementing high-performance computing for problem solving in workflow-based energy infrastructure resilience studies. *Computation*, 2023, v. 11, no. 12, p. 243, DOI: 10.3390/computation11120243.
10. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O.Yu. Modelirovaniye avtonomnoy mikroseti [Modelling autonomous microgrids]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 3(31), pp.74-85, DOI:10.25729/ESI.2023.31.3.007.
11. Edelev A.V., Karamov D.N., Basharina O. Yu. Metodika otsenki zhivuchesti avtonomnoy mikroseti [Methodology for assessing the resilience of an autonomous microgrid]. *Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and mathematical technologies in science and management], 2023, no. 4(32), pp.117-126, DOI: 10.25729/ESI.2023.32.4.010.
12. Geidl M., Koepfel G., Favre-Perrod P. et al. Energy hubs for the future. *IEEE power and energy magazine*, 2007, v. 5, no. 1, pp. 24-30.
13. Mohammadi M., Noorollahi Y., Mohammadi-Ivatloo B., Yousefi H. Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2017, v. 80, pp. 1512-1527, DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030.
14. Voropay N.I., Stennikov V.A., Barakhtenko E.A., Voytov O.N. Metodika upravleniya sprosom na elektro- i teploenergiyu vo vstroyennoy energosisteme s aktivnymi pol'zovatelyami [Demand management technique for electricity and heat in an integrated energy system with active consumers]. *Izvestiya RA. Energetika* [Izvestiya RAS. Energy], 2020, v. 4, pp. 11-23, DOI: 10.31857/S0002331020040081.
15. Karamov D.N., Edelev A.V., Feoktistov A.G. Modelirovaniye energosnabzheniya ob'yektov, okhranyayemykh Baykal'skoy prirodnoy territoriyey na osnove prirodnykh istochnikov energii [Modeling of energy supply for objects of the protected Baikal natural territory based on renewable energy sources]. *Mezhdunarodnyy tekhniko-ekonomicheskii zhurnal* [International technical and economic journal], 2020, no. 5, pp. 7-24, DOI: 10.34286/1995-4646-2020-74-5-7-24.

Edelev Alexey Vladimirovich. Candidate of technical sciences, researcher, Melentiev energy systems institute. The main direction of research – resilience of energy systems, mathematical modeling, distributed computing. AuthorID: 710350, SPIN: 8447-9522, ORCID: 0000-0003-2219-9754, flower@isem.irk.ru.

Karamov Dmitriy Nikolaevich. Candidate of technical sciences, associate professor, national research Irkutsk state technical university, Baikal school of BRICS. The main direction of research - energy systems and power engineering complexes, renewable energy sources, mathematical modelling. AuthorID: 905773, SPIN: 9977-1303, ORCID: 0000-0001-5360-4826, dmitriy.karamov@mail.ru.

Basharina Olga Yurievna. Candidate of technical sciences, associate professor, researcher at the Matrosov institute for system dynamics and control theory of SB RAS, associate professor, ural state university of economics. The main direction of research - system analysis and modeling of complex systems. AuthorID: 702499, SPIN: 2612-2891, ORCID: 0000-0002-7151-782X, basharinaolga@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 11.01.2024; одобрена после рецензирования 01.03.2024; принята к публикации 11.03.2024.

The article was submitted 01/11/2024; approved after reviewing 03/01/2024; accepted for publication 03/11/2024.

УДК 004.77, 621.039.6

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.011

Реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента в области управляемого термоядерного синтеза

Ежова Злата Владиславовна, Семенов Олег Игоревич, Миронова Екатерина Юрьевна, Портоне Сергей Сергеевич

Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»
«Проектный центр ИТЭР», Россия, Москва, z.ezhova@iterrf.ru

Аннотация. В статье рассмотрен реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента в области управляемого термоядерного синтеза на базе аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства FusionSpace. Выполнено моделирование бизнес-процессов работы с научными данными участников научных экспериментальных исследований в области термоядерной энергетики на микро- и макроуровне AS IS, целевого состояния TO BE. На основе выявленных в результате моделирования особенностей сформулированы требования к разработке программного обеспечения анализа и отображения экспериментальных данных, информационного взаимодействия между узлами прототипа платформы. Статья представляет интерес для специалистов, занимающихся исследованием бизнес-процессов в рамках разработки программного обеспечения и реинжинирингом бизнес-процессов, а также для физиков, участвующих в территориально-распределённых исследованиях.

Ключевые слова: реинжиниринг бизнес-процессов, цифровизация, технологии удалённого участия, разработка программного обеспечения

Цитирование: Ежова З.В. Реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента в области управляемого термоядерного синтеза / З.В. Ежова, О.И. Семенов, Е.Ю. Миронова, С.С. Портоне // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 122-132. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.011.

Введение. Человечество находится в поиске чистого и мощного источника энергии. Предпосылками поиска такого ресурса является предполагаемая исчерпаемость мировых топливных ресурсов (а именно газа и нефти) во второй половине XXI века [1], вопросы экологичности и безопасности, необходимость использования электроэнергии в труднодоступных районах.

Управляемый термоядерный синтез (УТС) – это управляемый процесс синтеза легких ядер в более тяжелые с целью получения энергии. В силу энергетической эффективности для УТС открыты перспективы энергетики будущего. Основные достоинства УТС – это отсутствие ограничений по топливу, экологическая, радиационная безопасность и безопасность относительно террористических угроз [2].

В настоящее время в России активно ведутся исследования в области УТС [3] (в качестве примера можно привести крупнейшую международную термоядерную установку ИТЭР, токамаки JET, DIII-D, KSTAR, EAST, в России – T15-МД, Глобус-М2 и прочие). В большинстве случаев исследования по данной тематике требуют организации совместной работы между различными научно-исследовательскими центрами в силу наукоемкости и трудоёмкости задач, стоящих перед исследователями. Технологической базой для проведения таких работ должны служить системы дистанционного участия в экспериментах.

Системы дистанционного участия в экспериментах представляют собой совокупность программно-аппаратного обеспечения и подходов к организации удалённого эксперимента на его основе. Проведение территориально-распределённых исследований на основе технологий дистанционного участия имеет ряд преимуществ в сравнении с очным способом ведения совместной научно-исследовательской деятельности:

- возможность удалённого участия в эксперименте и доступа к его результатам из любой точки мира;
- возможность привлечения гораздо большего числа экспертов;

- дистанционная подготовка научных кадров на физических установках или их цифровых двойниках;
- сокращение финансовых, административных и временных издержек на организацию эксперимента и др.

Разработка систем дистанционного участия в экспериментах осложнена, с одной стороны, необходимостью интеграции бизнес-процессов проведения физического эксперимента для участия различных предприятий – пользователей системы, с другой стороны, необходимостью унификации входной и выходной информации.

В настоящей работе выполнен анализ бизнес-процессов проведения физического эксперимента AS IS в российских научных центрах, занимающихся исследованием УТС, проведено моделирование целевого бизнес-процесса TO BE, сформулированы требования к программному обеспечению, обеспечивающему реинжиниринг процессов. Технологической базой для исследуемых изменений служит аппаратно-инфраструктурная платформа (АИП) информационно-коммуникационного пространства (ИКП) в области УТС (АИП ИКП, или FusionSpace [4]) – территориально-распределённая научно-исследовательская инфраструктура для организации единого информационного пространства термоядерных исследований в России.

1. АИП ИКП как технологическая база реинжиниринга бизнес-процесса проведения физического эксперимента в области УТС. АИП ИКП предназначена для планирования и участия в дистанционных экспериментах, информационного взаимодействия, централизованного хранения экспериментальных, проектных и прочих данных и инструментария работы с ними в рамках экспериментальных программ в области УТС [5].

АИП ИКП – это централизованная система, имеющая следующие типовые узлы:

- Центральный узел, представляющий собой расчетно-вычислительную инфраструктуру на базе конвергентного и гиперконвергентного кластеров с системой хранения. Центральный узел обеспечивает как функционирование АИП ИКП в целом, так и работоспособность отдельных сервисов. Информационная безопасность АИП ИКП обеспечена средствами криптографической защиты информации.
- Совместные лаборатории, которые создаются вокруг источника научных данных (установки или стенда) для получения разрешенных научных данных. Совместные лаборатории включают специализированные рабочие места для использования сервисов АИП ИКП, а также транзитный сервер для передачи разрешенных данных от источника в АИП ИКП.
- Центры дистанционного участия, используемые для предоставления совместного доступа к данным АИП ИКП средствами коллективного пользования (видеостена и средства видеоконференцсвязи). Центры дистанционного участия также оборудованы специализированными рабочими местами для индивидуальных профильных участников эксперимента.

Программная часть АИП ИКП представляет собой совокупность инфраструктурного программного обеспечения (ПО) и ПО, обеспечивающего функциональность платформы, а именно портала информационного обмена FusionSpace.ru, являющегося интерфейсом доступа к сервисам АИП ИКП, ПО анализа и отображения экспериментальных данных и ПО информационного взаимодействия между узлами прототипа АИП ИКП, средствами ВКС-связи.

Первые результаты проекта по разработке и созданию АИП ИКП были получены в 2021 году. На первом этапе работ были апробированы выбранные технические решения в рамках тестовой площадки, представляющей собой набор связанных типовых узлов. Далее на базе

опытного образца центрального узла системы было развернуто инфраструктурное ПО и выполнена автоматизация ряда процессов работы с данными, а именно: обеспечены безопасная межузловая передача данных, их хранение и доступ к ним.

В настоящее время АИП ИКП объединяет предприятия Государственной корпорации «Росатом», институты Российской академии наук, занимающиеся исследованиями физики плазмы, а также ВУЗы, имеющие профильные образовательные программы. На этапе 2023 года важной задачей стала разработка ПО анализа и отображения экспериментальных данных и ПО информационного взаимодействия между узлами прототипа АИП ИКП для комплексной работы с научными данными. В 2024 году будет разработан и создан полнофункциональный опытный образец АИП ИКП, который по результатам испытаний планируется ввести в опытную эксплуатацию.

Основные задачи разработки и создания АИП ИКП по этапам работ представлены на рисунке 1.

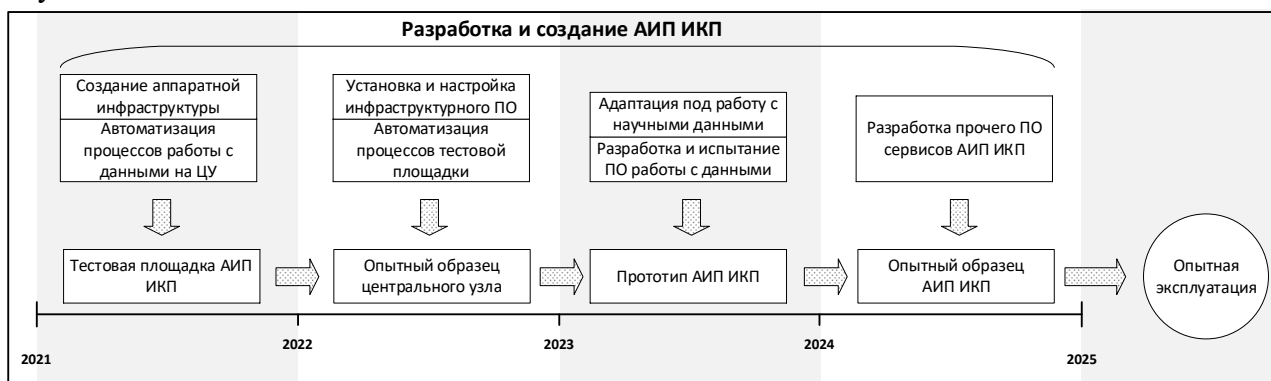


Рис. 1. Основные задачи разработки и создания АИП ИКП

Для обеспечения разработки ПО на текущем этапе работ выполнено моделирование реинжиниринга бизнес-процесса проведения физического эксперимента на основе АИП ИКП.

2. Реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента на основе АИП ИКП. В рамках разработки ПО анализа и отображения и ПО информационного взаимодействия между узлами возникла необходимость в моделировании изменений в бизнес-процессе проведения физического эксперимента в области УТС. Предварительное моделирование позволяет повысить управляемость и целостность изменений, оптимизировать выстраиваемые с помощью разрабатываемого ПО процессы.

Для достижения этих целей были предприняты следующие шаги:

Шаг 1. Моделирование бизнес-процессов участников проекта AS IS на макро- и микроуровне.

Шаг 2. Моделирование целевого состояния TO BE.

Шаг 3. Выявление особенностей функционирования ПО, обеспечивающего реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента.

Для моделирования бизнес-процессов выбран унифицированный язык моделирования UML [6]. UML используется для визуализации, проектирования, документирования программных продуктов, их элементов, организационных структур, бизнес-процессов. В контексте данной работы важными преимуществами выбранного языка моделирования являются применимость для объектно-ориентированного анализа и проектирования. В качестве среды моделирования выбрано ПО Enterprise Architect – инструмент моделирования полного жизненного цикла на основе UML [7].

2.1. Шаг 1. На шаге 1 были проведены: моделирование бизнес-процесса проведения физического эксперимента AS IS на макроуровне, моделирование бизнес-процессов обработки и

визуализации данных AS IS для каждого участника проекта на микроуровне. Если на микроуровне бизнес-процессы работы с данными каждого участника принципиально отличаются от других смоделированных процессов, то на макроуровне процесс проведения физического эксперимента содержит одни и те же типовые шаги: после организации эксперимента и получения данных от установки или стенда происходит обработка и визуализация данных с использованием ПО собственной разработки и (или) готовых программных решений. Запись об эксперименте заносится в журнал по прошествии эксперимента и может корректироваться после работы с данными (рисунок 2).

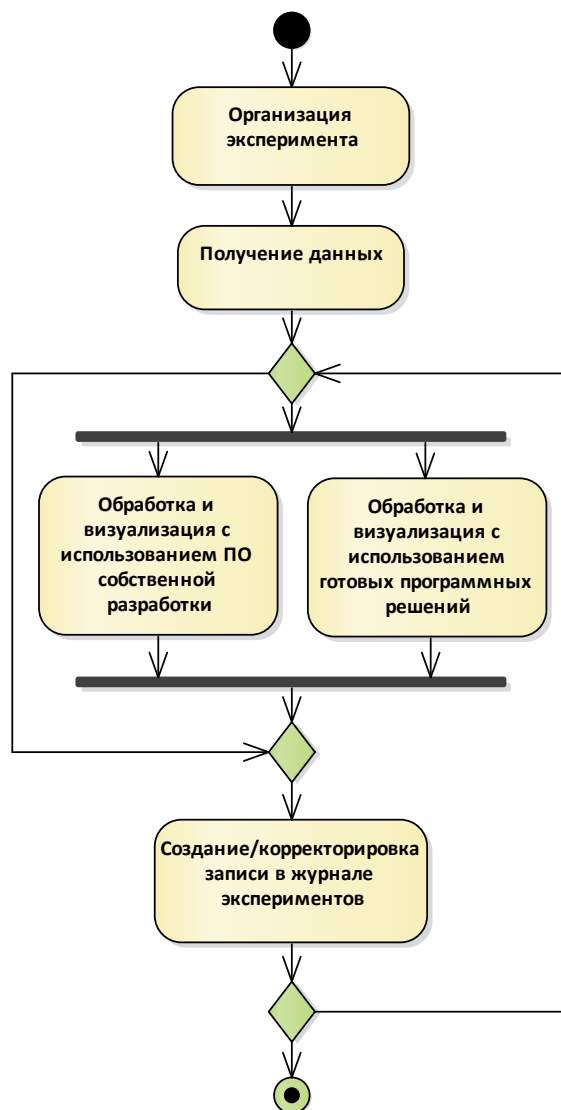


Рис. 2. Макроуровень процесса проведения физического эксперимента AS IS

В целях выявления исходной информации для разработки ПО, а именно определения алгоритмов работы (обработки и визуализации) с полученными в результате экспериментов данными проведено моделирование бизнес-процессов работы с данными участников проекта на микроуровне. Для создания моделей определены субъекты процесса, их действия, входная и выходная информация, необходимая для совершения действия,

Для того, чтобы проиллюстрировать основные выводы, полученные в результате исследования процессов, далее приведены Диаграммы активности (Activity Diagram) бизнес-процессов работы с результатами экспериментов некоторых участников проекта (рисунки 3-5).

Участник проекта №1 хранит данные, полученные в результате эксперимента, в единой базе данных. Исторический объём такой базы может достигать нескольких Тб информации. Обработка исходных научных данных в бинарном формате первоначально производится в ПО собственной разработки. В случае необходимости дополнительной обработки используются уникальные пользовательские коды, первичными данными для которых являются данные ПО собственной разработки. Записи об импульсах и их результатах хранятся в бумажном журнале, информация из которого частично доступна в электронном виде (рисунок 3).

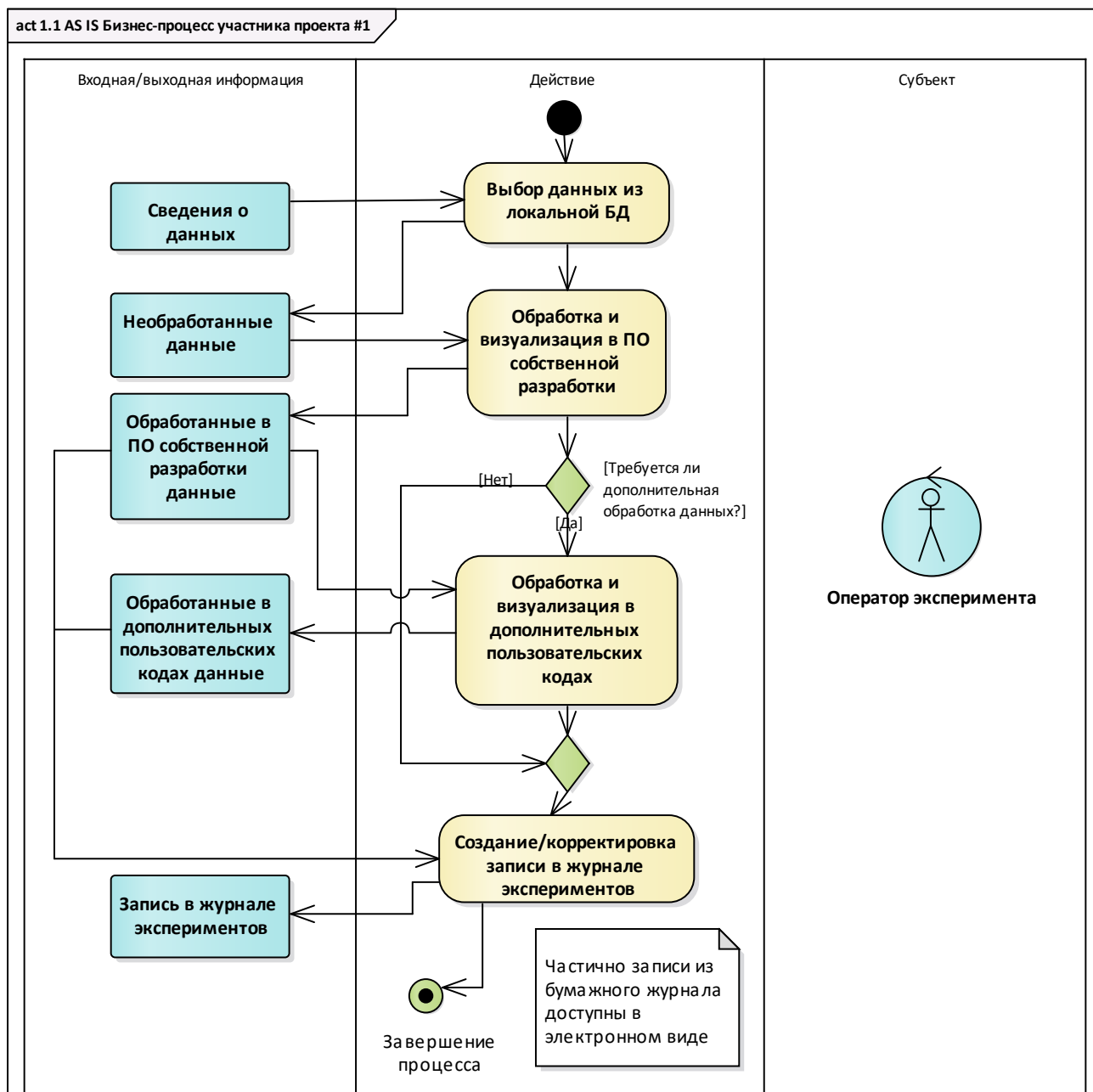


Рис. 3. Бизнес-процесс участника проекта №1

Участник проекта №2 может получить доступ к базе данных экспериментов через специализированное ПО, использующееся для работы с данными установки. Объём базы данных достигает нескольких Тб информации. Данные хранятся преимущественно как flat-file (плоские файлы). При такой системе хранение организовано в виде таблицы, где каждая строка представляет собой одну запись, а столбцы – атрибуты данных [8].

Типовые преобразования (например, Фурье), вычисления по формулам при помощи арифметических и некоторых специальных операторов проводятся в программе визуализации собственной разработки. Обработка научных данных также может проводиться в дополнительных пользовательских кодах. Имеется рукописный журнал, где хранятся основные сведения об импульсах. Частично эта информация доступна и в программе визуализации собственной разработки. В данном ПО оператор экспериментатора оставляет технические комментарии и фиксирует основные параметры эксперимента (рисунок 4).

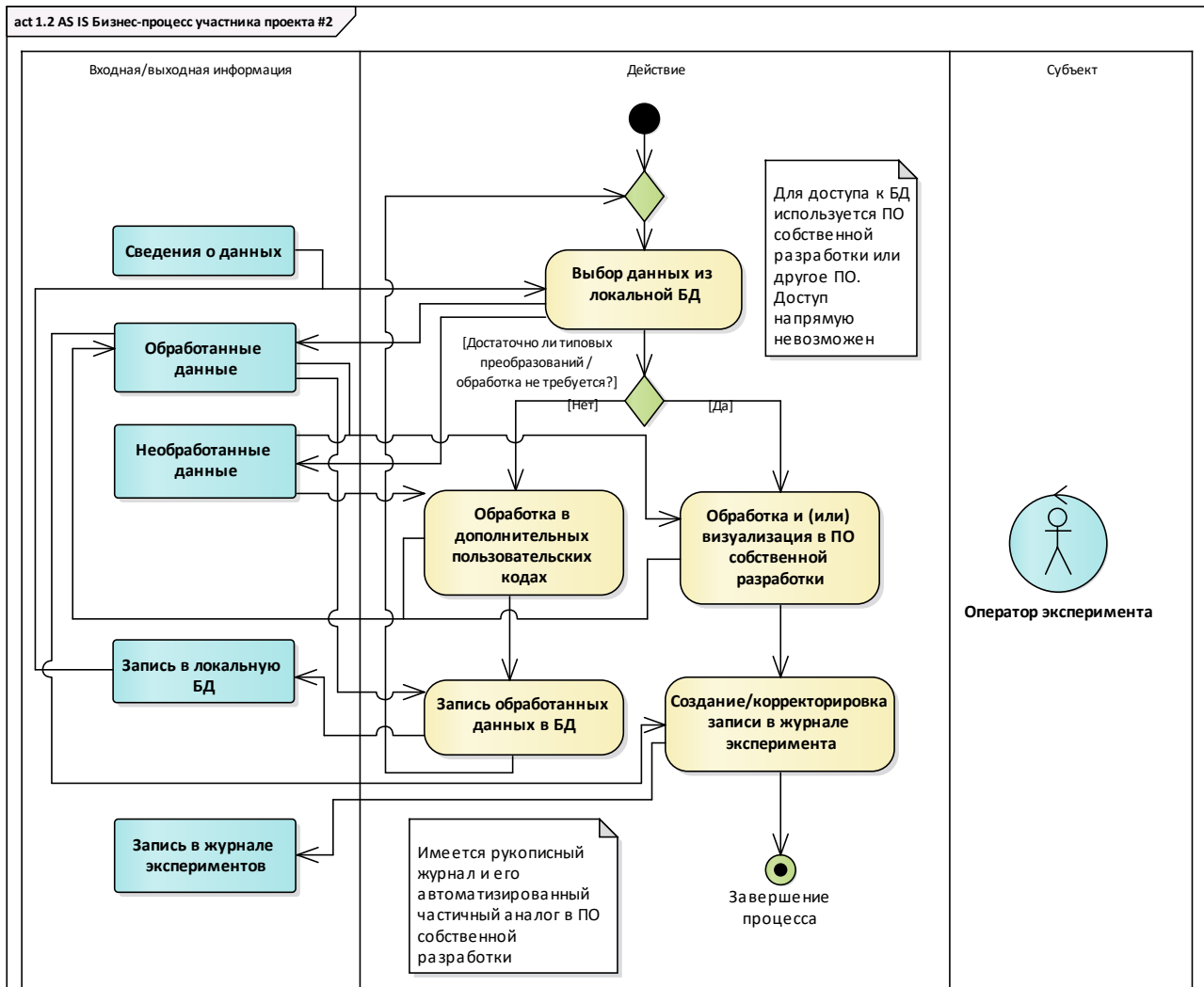


Рис. 4. Бизнес-процесс участника проекта №2

Участник проекта №3 имеет разнообразный программный инструментарий для обработки данных в зависимости от их типа, а также несколько режимов работы клиента обработки и предоставления данных: автоматический и ручной. Автоматический клиент автономно обновляет графики, наглядно иллюстрирующие полученные результаты, на мониторах рабочих мест лаборатории после каждого пуска установки. Ручной режим подразумевает самостоятельный выбор экспериментальных данных и ПО для их обработки. Имеется бумажный журнал экспериментов, который дополняется БД Microsoft Access (рисунок 5).

На шаге 1 были дополнительно построены ещё несколько моделей бизнес-процессов участников проекта, также значительно отличающихся друг от друга.

По итогу моделирования бизнес-процессов работы с данными участников проекта сделаны следующие выводы:

- так как физические установки и стенды участников проекта уникальны, уникальны и форматы данных, генерируемые в результате экспериментов;

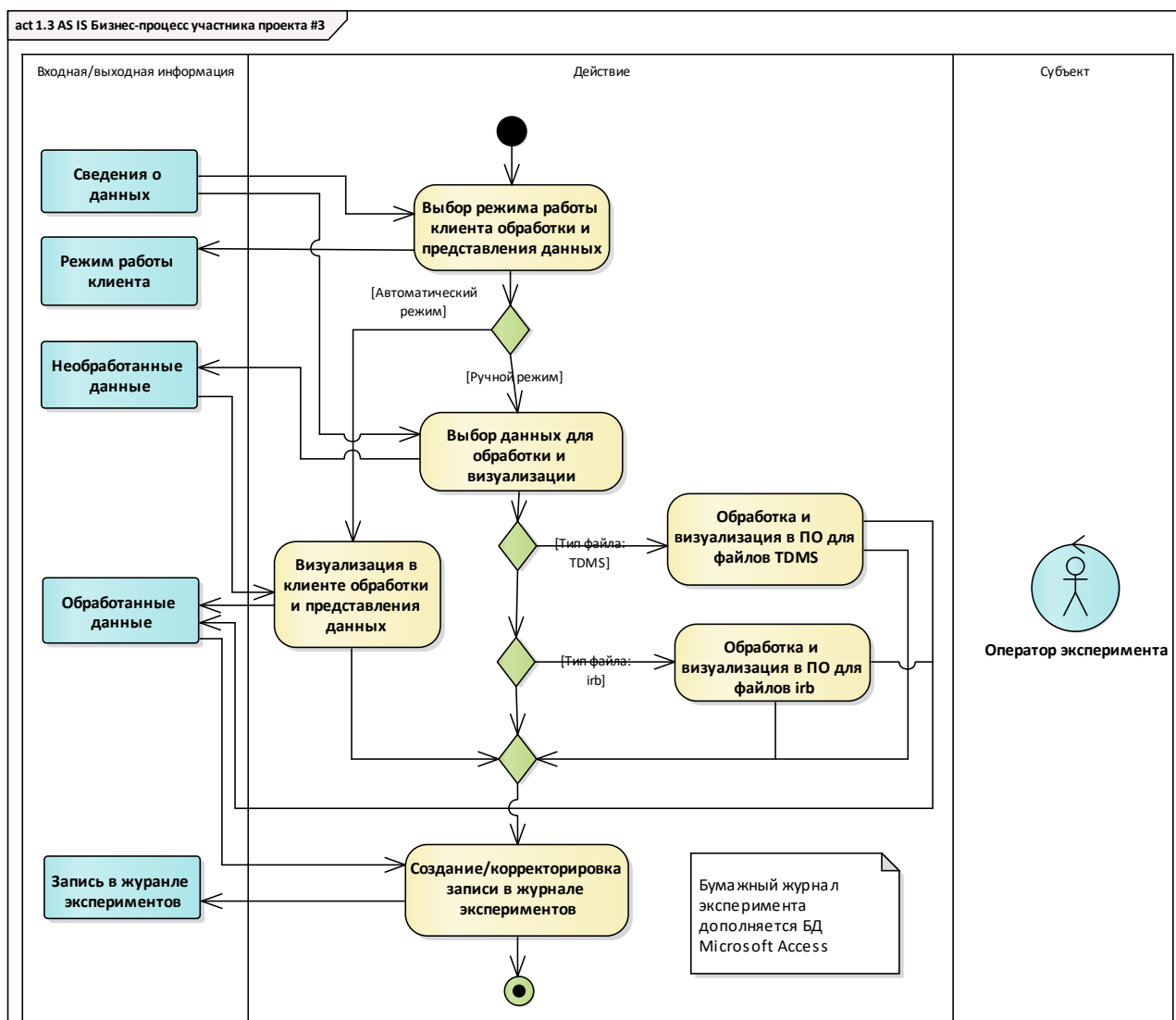


Рис. 5. Бизнес-процесс участника проекта №3

- участники процесса используют ряд узкоспециализированного ПО, пригодного для работы лишь с конкретным типом файлов/выполнения определённых операций, или самописные коды, что усложняет совместную работу между участниками проекта;
- участники проекта имеют особые процедуры обработки и визуализации экспериментальных данных, что также усложняет совместную работу;
- для обработки экспериментальных данных может использоваться иностранное ПО, что не соответствует требованиям импортозамещения;
- каждый участник имеет рукописный журнал, который содержит уникальную информацию о проведенных экспериментах, что делает невозможным доступ для удалённых участников к ряду важной для анализа результатов экспериментов информации.

2.2. Шаг 2. Задача второго шага – определение места разрабатываемого ПО в процессе проведения физического эксперимента в области УТС на макроуровне с учётом выявленных особенностей для каждого участника проекта путём моделирования процесса ТО ВЕ по итогу внедрения разрабатываемого ПО. В силу уникальности бизнес-процессов на микроуровне целью реинжиниринга становится обеспечение возможности параллельной оптимизированной работы с централизованными данными термоядерных исследований. Параллельность в данном случае означает сохранение алгоритма работы с локальными экспериментальными дан-

ными в привычном порядке, то есть внедрение разрабатываемого ПО не должно изменить рабочие процессы на установке. Оптимизация подразумевает ряд существенных улучшений бизнес-процесса, достигаемых в силу:

1. Сокращения количества используемого участниками проекта ПО за счёт создания ПО АИП ИКП, реализующего весь необходимый функционал и отвечающий научным задачам участников проекта.
2. Использование унифицированного формата данных АИП ИКП, доступного для обработки в ПО АИП ИКП.
3. Внедрения единого, понятного участникам проекта процесса совместной работы с централизованными научными данными.

Целевое состояние процесса ТО ВЕ после внедрения разрабатываемого ПО представлено на рисунке 6.

2.3 Шаг 3. Для достижения целевого состояния ТО ВЕ необходимо разработать и внедрить ПО, обеспечивающее реинжиниринг процесса проведения физического эксперимента на основе АИП ИКП, а именно ПО информационного взаимодействия между узлами прототипа АИП ИКП и ПО анализа и отображения экспериментальных данных.

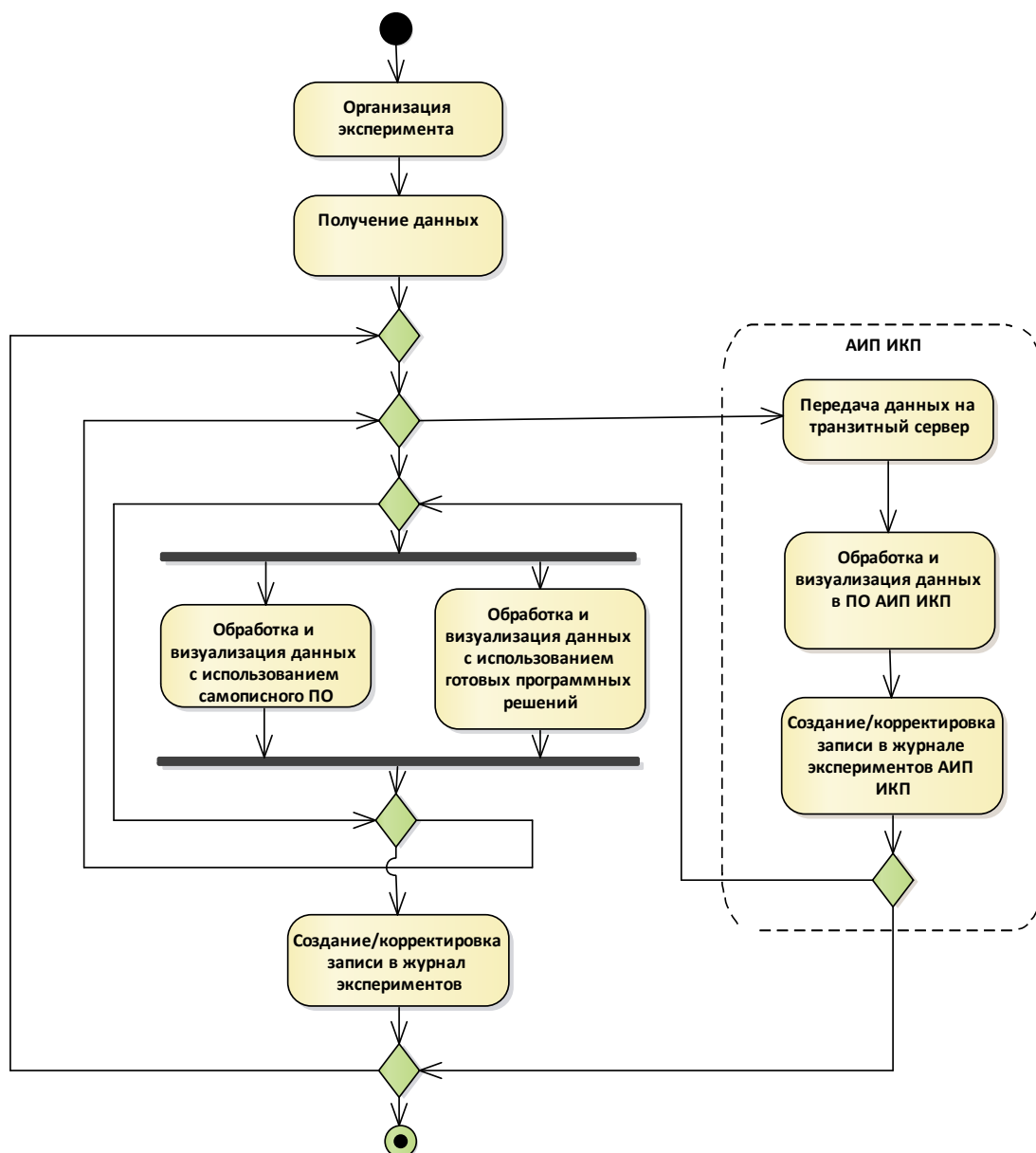


Рис. 6. Макроуровень процесса ТО ВЕ

Основной задачей ПО информационного взаимодействия между узлами является обеспечение возможности сбора, обработки, загрузки и хранения экспериментальных данных в центральном узле АИП ИКП для последующего их использования участниками проекта. Для этого экстракторы (специализированное ПО для получения данных) на транзитном сервере совместной лаборатории АИП ИКП должны осуществлять извлечение данных от источника (установки или стенда). Далее на сервере запускается процесс подготовки данных к переводу в унифицированные структуры, которые переносятся в центральный узел для дальнейшего хранения.

В качестве унифицированного формата данных АИП ИКП выбраны форматы HDF5/Parquet [9]. Файлы HDF5 имеют иерархическую структуру, Parquet имеет колоночно-ориентированное представление. HDF5/Parquet ориентированы под работу с файлами большого объёма, имеющими внутреннюю структуру, а также доступен пользователям, работающим с использованием Python, Matlab и других средств математической обработки, что соответствует задачам АИП ИКП. Пользователями в данном случае считаются верифицированные сотрудники организаций-участниц проекта, имеющие доступ к описываемым сервисам.

Экспериментальные данные, подготовленные и размещённые в централизованном хранилище, должны стать доступными для ПО анализа и отображения соответственно ролевой модели и разграничению прав доступа пользователей ПО. Пользователи должны иметь возможность осуществления ручного поиска экспериментальных данных или поиска с использованием фильтров, например, поиска данных за определённый период, данных конкретной установки или стенда, поиска по диагностике и так далее.

Найденный массив данных размещается на панели визуализации, при этом задаются необходимые для анализа результатов эксперимента параметры отображения и вычислительные сценарии. Возможно использование встроенных математических операторов или их создание с использованием интерактивной среды разработки на базе языка программирования Python внутри ПО анализа и отображения. Полученные результаты подлежат сохранению и могут быть доступны другим пользователям при наличии соответствующих прав, или могут быть экспортированы на локальное рабочее место.

Таким образом, комплекс разрабатываемого в целях реинжиниринга ПО должен иметь функциональность, не менее привычную пользователям, обеспечивать работу с разнородными данными УТС установок и стендов в единой среде с возможностью применения сторонних средств обработки данных, в результате будет достигнуто соответствие описанным ранее принципам параллельности и оптимизации.

Заключение. Современные тренды проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) предполагают высокий уровень цифровизации и интеграции рабочих процессов. В настоящей работе исследован реинжиниринг бизнес-процесса проведения физического эксперимента на базе разрабатываемого ПО единого информационного пространства УТС исследований – АИП ИКП (FusionSpace). Реинжиниринг бизнес-процесса направлен на создание удобного, унифицированного инструментария для совместной работы с экспериментальными данными, отвечающего актуальным задачам УТС исследований на российских стендах и установках.

Преимущество разработанной модели реинжиниринга состоит в возможности оптимизации совместных рабочих процессов за счёт сокращения количества используемого ПО (в т.ч. иностранного, что особенно важно в условиях импортозамещения), использования адаптированного хранения и унифицированного формата экспорта данных HDF5/Parquet, пригодного для работы с данными любой подключенной к платформе установки/стенда, создания единой

информационно-коммуникационной научной среды, предполагающей единообразный порядок работы с экспериментальными данными, гибкости и адаптивности к подключению новых научных установок и стендов.

Предлагаемый в рамках реинжиниринга подход не ограничивает участников проекта в реализации процесса AS IS, в то же время каждый участник АИП ИКП может воспользоваться предлагаемым инструментарием в степени, определяемой его возможностью загружать результаты экспериментов на централизованные защищенные ресурсы, а также правами доступа к данным, хранящимся на платформе. Полученные в ходе настоящей работы результаты использованы для разработки ПО АИП ИКП и дальнейшего развития единого информационного пространства отечественных УТС исследований.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного контракта с Госкорпорацией «Росатом» от 22.03.2023 №Н.4к.241.09.23.1036 «Разработка и создание аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства в области термоядерных исследований в Российской Федерации. Этап 2023 - 2024 годов».

Список источников

1. Алексеенко С.В. Перспективные технологии возобновляемой энергетики – URL: https://www.eriras.ru/files/alekseenko_sovet_vie_2018_presentation.pdf (дата обращения: 25.04.2023).
2. Ильгисонис В.И. Классические задачи физики горячей плазмы: курс лекций / В. И. Ильгисонис – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 326 с.
3. Гришина И.А. Основные тенденции и результаты в области физики плазмы в России (по материалам XVIII международной (звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС, март 2020 г.) / И. А. Гришина, В.А. Иванов // Физика плазмы, 2022. – Т. 48, вып. 1. – С. 79-94.
4. Портал информационного обмена в области управляемого термоядерного синтеза. – URL: <https://fusionspace.ru> (дата обращения 25.04.2023).
5. Портоне С.С. Развитие аппаратно-инфраструктурной платформы информационно-коммуникационного пространства как инструмента интеграции исследований в области УТС / С.С. Портоне, Миронова Е.Ю., Семенов О.И. и др. // ВАНТ. Серия Термоядерный синтез, 2022. – Т. 45, вып. 4. – С. 34-44.
6. Фаулер М., Скотт К. UML. Основы. – СПб: Символ-Плюс, 2002. – 192 с.
7. Sparx Systems: Enterprise Architect. – URL: <https://sparxsystems.com> (дата обращения: 25.04.2023).
8. IBM Business Automation Workflow. Available at: <https://www.ibm.com/docs/en/baw/23.x?topic=files-overview> (accessed: 25/04/2023).
9. Edgar Gabriel. Data Formats. HDF5 and Parquet files. Available at: http://cs.uh.edu/~gabriel/courses/cosc6339_f18/BDA_16_DataFormats.pdf (accessed: 04/25/2023).

Ежова Злата Владиславовна. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», специалист сектора информационных систем ИТЭР (ИС ИТЭР), AuthorID: 1210524, SPIN: 2609-0332, Z.Ezhova@iterrf.ru.

Семенов Олег Игоревич. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», начальник сектора аппаратно-инфраструктурных систем (АИС), AuthorID: 1210980, SPIN: 2927-9492, O.Semenov@iterrf.ru.

Миронова Екатерина Юрьевна. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», старший научный сотрудник, сектор автоматизированных систем управления ИТЭР (АСУ ИТЭР), AuthorID: 1210527, SPIN: 9146-0089, E.Mironova@iterrf.ru.

Портоне Сергей Сергеевич. Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», начальник отдела систем управления ИТЭР (ОСУ ИТЭР), AuthorID: 1187370, SPIN: 9069-2696, S.Portone@iterrf.ru.

UDC 004.77, 621.039.6

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.011

Business process reengineering in conducting a fusion experiment

Zlata V. Ezhova, Oleg I. Semenov, Ekaterina Y. Mironova, Sergey S. Portone

Institution “Project Center ITER”, a private institution of the State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, Russia, Moscow, z.ezhova@iterrf.ru

Abstract. The article considers business process reengineering in conducting a fusion experiment based on infrastructural hardware platform of the common IT space for fusion research (FusionSpace). The paper is concerned with modeling business processes of work with fusion experimental data of participants at the micro- and macro-level AS IS, modeling the target state TO BE. Based on the features identified as a result of modeling, the requirements for the development of software for the analysis and visualisation of experimental data, interaction between the nodes of the prototype platform are formulated. The article is of interest to specialists engaged in the study of business processes in the framework of software development and reengineering of business processes, as well as to physicists involved in geographically distributed research.

Keywords: business process reengineering, digitalization, remote participation technologies, software development

Acknowledgements: This work was performed in the frame of a contract with The State Atomic Corporation ROSATOM no. H.4k.241.09.23.1036 from 03/22/2023.

References

1. Alkseenko S.V. Perspektivnyye tekhnologii vozobnovlyayemoy energetiki [Promising renewable energy technologies], available at: https://www.eriras.ru/files/alkseenko_sovet_vie_2018_presentation.pdf (accessed: 04/25/2023).
2. Ilgisonis V.I. Klassicheskiye zadachi fiziki goryachego okhlazhdeniya: kurs lektsiy [Classical problems of hot cooling physics: a course of lectures]. Izdatel'skiy dom MEI [MPEI Publishing House], Moscow, 2015, 326 p.
3. Grishina I.A., Ivanov V.A. Osnovnyye tendentsii i rezul'taty v oblasti fiziki plazmy v Rossii (po materialam XVIII mezhdunarodnoy (zvenigorodskoy) konferentsii po fizike plazmy i UTS, mart 2020 g. [Main trends and results in the field of plasma physics in Russia (based on the materials of L Zvenigorod international conference on plasma physics and controlled fusion, march 2020)]. Fizika plazmy [Plasma Physics], Moscow, vol. 48, iss. 1, p. 79-94.
4. Portal informatsionnogo obmena v oblasti upravlyayemogo termoyadernogo sinteza [Information exchange portal in the field of controlled thermonuclear fusion]. Available at: <https://fusionspace.ru> (accessed: 04/25/2023).
5. Portone S.S., Mironova E.Yu., Semenov O.I. [et al.]. Razvitiye apparatno-infrastrukturnoy platformy informatsionno-kommunikatsionnogo prostranstva kak instrumenta integratsii issledovaniy v oblasti UTS [Infrastructural hardware platform of the common IT space for fusion research (FusionSpace.ru)]. VANT. Seriya Termoyadernyy sintez [VANT. Series Fusion], vol. 45, iss. 4, p. 34-44.
6. Fawler M., Scott K. UML. Osnovy [UML. Basics]. SPb: Simvol-Plyus [SPb: Symbol-Plus], 1997, 208 p.
7. Sparx Systems: Enterprise Architect. Available at: <https://sparxsystems.com> (accessed: 04/25/2023).
8. IBM Business Automation Workflow. Available at: <https://www.ibm.com/docs/en/baw/23.x?topic=files-overview> (accessed: 04/25/2023).
9. Edgar Gabriel. Data Formats. HDF5 and Parquet files, available at: http://cs.uh.edu/~gabriel/courses/cosc6339_f18/BDA_16_DataFormats.pdf (accessed: 04/25/2023).

Ezhova Zlata Vladislavovna. Institution “Project Center ITER”, a private institution of the State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, specialist, Sector of ITER Information Systems. AuthorID: 1210524, SPIN: 2609-0332. Z.Ezhova@iterrf.ru.

Semenov Oleg Igorevich. Institution “Project Center ITER”, a private institution of the State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, Head of Hardware and Infrastructure Systems Sector AuthorID: 1210980, SPIN: 2927-9492. O.Semenov@iterrf.ru.

Mironova Ekaterina Yurievna. Institution “Project Center ITER”, a private institution of the State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, senior researcher, Sector of Automated Control Systems ITER. AuthorID: 1210527, SPIN: 9146-0089. E.Mironova@iterrf.ru.

Portone Sergey Sergeevich. Institution “Project Center ITER”, a private institution of the State Atomic Energy Corporation “Rosatom”, Head of ITER Control Systems Department. AuthorID: 1187370, SPIN: 9069-2696. S.Portone@iterrf.ru.

Статья поступила в редакцию 04.09.2023; одобрена после рецензирования 08.11.2023; принята к публикации 05.03.2024.

The article was submitted 09/04/2023; approved after reviewing 11/08/2023; accepted for publication 03/05/2024.

УДК 621.6:629.124

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.012

Анализ развития трубопроводного и морского транспорта природного газа из Арктического региона

Боровинский Даниил Игоревич

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

Россия, Иркутск, *BorovinskyDI@irkutsk-dobycha.gazprom.ru*

Аннотация. В статье рассмотрены логистические транспортные маршруты поставки природного газа с Арктических месторождений, расположенных на шельфе северных морей и полуострове Ямал. Приведено описание развития транспортной сети с результатами сравнительного расчета удельной стоимости транспортировки газа в различном фазовом состоянии по разным транспортным маршрутам. Целью исследования является рассмотрение возможных вариантов доставки углеводородного сырья потребителю с наименьшими транспортными затратами. Рассмотренные транспортные маршруты и полученные предварительные данные применимы при решении задач линейного программирования. Схематично показаны поставки природного газа потребителям с северных месторождений по трубопроводной системе в сжиженном состоянии и морским транспортом в сжиженном виде. Месторождения западной части полуострова Ямал и Надым-Пур-Тазовского региона входят в Единую систему газоснабжения, месторождения восточной части полуострова Ямала, шельфа и западной части Гыданского полуострова удалены от существующей газовой инфраструктуры, что существенно усложняет монетизацию готовой продукции. Ввиду тесной связи Арктических регионов с акваторией Северного ледовитого океана доставка морским транспортом становится неотъемлемой частью развития морских и прибрежных месторождений. Климатические условия и слаборазвитая инфраструктура требуют детальной проработки возможных транспортных маршрутов с учетом надежности работы оборудования, задействованного в транспортных цепочках, и финансовой составляющей соответствующих инвестиционных проектов. С целью выявления оптимальных с экономической точки зрения направлений поставок газа рассмотрены различные варианты маршрутов, в том числе с изменением фазового состояния энергоносителя. Автором рассмотрен интегрированный маршрут доставки газа потребителю, объединяющий морской и трубопроводный транспорт газа, предложены новые маршруты поставок, показана методика подготовки исходной информации, выполнены расчеты по существующим, проектным и возможным транспортным направлениям.

Ключевые слова: поставка газа потребителю, транспортные маршруты, Северный морской путь, ледокольный флот, перевозки СПГ, математическое моделирование

Цитирование: Боровинский Д.И. Анализ развития трубопроводного и морского транспорта природного газа из Арктического региона / Д.И. Боровинский // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 133-145. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.012.

Введение. Развитие Арктических регионов России (на рисунке 1 выделено пунктирной линией) в значительной степени зависит от полномасштабной разработки нефтегазовых месторождений Ямало-Ненецкого автономного округа на Обской губе и шельфе Баренцева и Карского морей.

Значительными запасами и ресурсами природного газа располагают Баренцево и Карское моря – около 70% начальных суммарных запасов газа шельфов России. Углеводородные месторождения шельфовых акваторий этих двух морей являются стратегическим резервом нефтегазового комплекса Российской Федерации на перспективу [1].

В целом, изученность арктического шельфа невысока и неравномерна, характеризуется крайне низкой степенью геологических изысканий. Плотность покрытия сейсмическими работами в наиболее перспективных акваториях арктических морей (за исключением Баренцева моря) не превышает 0,15 км на 1 км², а для восточных морей – менее 0,1 км на 1 км² [2].

Владельцами лицензий крупнейших Арктических месторождений является компания ПАО «Новатэк» с суммарными запасами лицензионных участков категории С1 + С2 – около 5 трлн м³, ПАО «Роснефть» по оценкам существующих ресурсов лицензионных участков Карского моря, севера Красноярского края и Ямало-Ненецкого автономного округа – более 4 трлн

м³ и ПАО «Газпром» с суммарными запасами Тамбейского и Штокмановского месторождений – 9,5 трлн м³.



Рис. 1. Арктическая зона Российской Федерации

Мощности действующих и проектных заводов по производству сжиженного природного газа (СПГ) Арктических месторождений в разрезе 2025 – 2035 годов [3] составляют более 200 млн тонн (таблица 1).

Таблица 1. Мощности реализуемых проектов СПГ в Арктическом регионе

Проект Годы реализации	Проектная мощность, млн тонн		
	2025	2030	2035
Ямал СПГ	16,5		
Ямал СПГ (4 линия)	0,9		
Арктик СПГ-2	19,8		
Обский СПГ		5,5	
Арктик СПГ-1		19,8	
Арктик СПГ-3		19,8	
СПГ на Тамбейском			20
Кара-СПГ			30
Таймыр-СПГ			50
Штокман			30
Итого:	37,2	45,1	130
Всего:	212,3		

В средне- и долгосрочной перспективе доля российского СПГ на мировом рынке сжиженного газа будет расти. Совокупная мощность российских СПГ-терминалов без учета Дальневосточного региона составляет 38 млрд м³ в год, и еще более 40 млрд м³ в год находятся в стадии строительства. При сохранении данных темпов по вводу мощностей Россия в 2030 году может закрепиться в четверке крупнейших экспортеров сжиженного газа после США, Катара и Австралии.

Постепенный ввод заводов по производству СПГ с увеличением мощностей производства к 2035 году в три раза от текущих значений дает возможность подготовить соответствующую транспортную инфраструктуру при нарастающих объемах производств в Арктическом регионе.

Одним из экономически перспективных и концептуальных направлений развития Арктики является создание особой экономической зоны с целью внедрения научного потенциала и апробации отечественных технологий нового поколения в промышленности, машиностроении, цифровизации.

В то же время освоение северных районов невозможно без экономически выгодных логистических цепочек движения грузовых потоков с учетом сложных климатических условий. Транспортный коридор Северного морского пути (СМП) является приоритетным потенциалом Арктической зоны [4]. Круглогодичная навигация по данному маршруту существенно сокращает время транспортировки грузов в Азиатско-Тихоокеанский регион (АТР) по сравнению с Южным маршрутом. Основные грузовые потоки перевозок по СМП составляют СПГ, нефть, нефтепродукты, уголь, минеральные удобрения, небольшую долю в перевозках занимают строительные материалы и различное промышленное оборудование [5]. Таким образом, развитая инфраструктура прибрежной зоны северных районов является важным фактором обеспечения стабильности поставок энергоносителей на внутренние и внешние рынки.

Ключевым условием движения грузов в акватории СМП является наличие ледокольного, грузового и вспомогательного флота соответствующего класса для обеспечения безопасной навигации [6]. Одним из критериев для движения судов по СМП является ледовый класс судна. Для освоения Арктической зоны России и увеличения грузооборота был разработан ряд ключевых решений. В частности, сформирован перечень мероприятий по развитию судостроительной отрасли с учетом индикативных показателей освоения Арктики и СМП в целом на период до 2035 года [7].

Для круглогодичной навигации в акватории СМП необходим флот из ледоколов с ледовым классом не ниже Arc 7¹ для плавания под проводкой ледокола в зимне-весенний период с 1 декабря по 30 июня в определенных районах СМП с тяжелыми ледовыми условиями и самостоятельного плавания в период с 1 июля по 30 ноября вне зависимости от районов акватории СМП.

Крупнейшие судостроительные и проектные организации России получили заказы для приоритетной постройки газозовов, включая танкеры ледового класса под СПГ проекты Ямала [8]. На сегодняшний день, с учетом выполнения контрактных обязательств на судостроительных верфях, общее количество танкеров-газовозов в России к 2025 году должно составить 55 единиц (рис. 2), из них 21 газозов конвенционного типа (Conventional type), одно плавучее хранилище сжиженного природного газа, оснащенное судовой регазификационной установкой (FSRU)² и 33 ледокола класса Arc 7, приспособленных к плаванию в северных районах с минимальным ограничением по ледовым условиям [9]. Динамика строительства в предстоящие годы позволяет дать оценку развитию морских транспортных направлений в России как положительную, так, на конец 2023 года прирост судов-газовозов к общему количеству увеличен на 21,8 %, в 2024 – 2025 годах планируется увеличение на 23,6 %. Количество

¹ Arc7 (ЛУ7) – самостоятельное плавание в сплоченных 1-летних арктических льдах при их толщине до 1,4 м в зимне-весеннюю навигацию и до 1,7 м в летне-осеннюю при эпизодическом преодолении ледяных перемычек набегами. Плавание в канале за ледоколом в 1-летних арктических льдах толщиной до 2,0 м в зимне-весеннюю и до 3,2 м в летне-осеннюю навигацию.

² FSRU (Floating Storage Regasification Unit) – стационарный объект регазификации и хранения, стоящий на рейде или у причала и соединенный газопроводом с берегом.

судов ледокольного класса Arc 7 за период 2023-2025 годы увеличится на 120 % к общему количеству имеющихся судов данного типа.

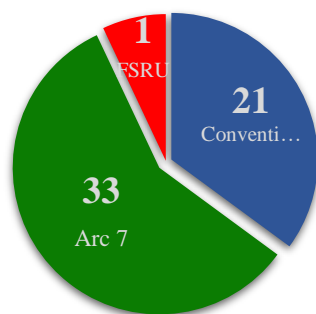


Рис. 2. Классификация и общее количество газозовов к 2025 году

Развитие СМП способствует формированию потребительского спроса Северных районов страны на экологически чистые энергоносители, развитию хозяйственной деятельности удаленных районов, строительству перевалочных портов, снижению транспортных расходов по доставке груза, открытию новых и увеличению существующих транспортных маршрутов по доставке СПГ в страны АТР.

1. Потребность в природном газе в Азиатско-тихоокеанском регионе. Суммарный объем чистого импорта природного газа поставленный в 2021 году в страны АТР составляет 446 млрд м³, в том числе 371,8 млрд м³ поставляется в виде СПГ. На рынок АТР поставляется 72% мирового импорта СПГ. При этом регион обладает высоким потенциалом к увеличению спроса на внешние поставки энергоносителя.

По данным отчета World LNG Report за 2022 год [10] крупнейшей страной – импортером природного газа в мире – стал Китай, закупающий на международном рынке 110 млрд м³, второй крупнейший импортер газа в АТР – Япония, импорт составил 101 млрд м³ (рис. 3).

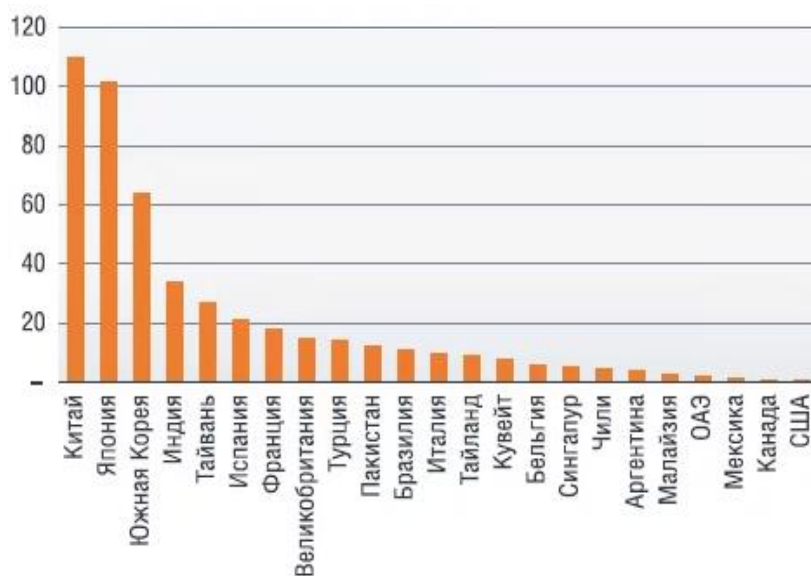


Рис. 3. Крупнейшие страны – импортеры природного газа, млрд м³

Южная Корея закупила на международном рынке 64 млрд м³ газа в виде СПГ. Основные поставщики СПГ в Южную Корею – Катар (25%), Австралия (20%), США (19%) и Малайзия (8%). Крупнейшими поставщиками СПГ в Японию является Австралия (36%), Малайзия (14%), Катар (12%) и Россия (7%). Поставки СПГ в Китай схожи с Японией, основные экспортеры в страну – Австралия (40%), Малайзия (11%), Катар (11%), на индонезийский и российский СПГ приходится только 6%.

Поставки газа в Японию и Южную Корею осуществляются только в форме СПГ, в то же время импортные поставки газа в Китай диверсифицированы как по направлениям поставок, так и по способам транспортировки – морской и газопроводный транспорт.

Правительство Китая ежегодно вводит ряд стимулирующих мер для компаний по улучшению качества воздуха, в том числе поощряя переход промышленных предприятий с угля на газ, тем самым импортные поставки газа в Китай будут неуклонно увеличиваться и, по предварительным прогнозам, составят:

- 160-170 млрд м³ к 2025 году;
- 220-240 млрд м³ к 2030 году;
- около 300 млрд м³ к 2035 году.

При растущем спросе на природный газ и существующими ограничениями по пропускной способности наземных газопроводов основной прирост поставок газа придется на СПГ. Понимая это, Китай ведет расширение действующей инфраструктуры по увеличению терминалов регазификации и приемных парков хранения СПГ. Так, в 2021 году прирост регазификационных мощностей в портах Китая составил 23 млрд м³ за счет расширения пяти и ввода в эксплуатацию двух новых терминалов по приему СПГ [11]. Совокупная мощность строящихся регазификационных терминалов в Китае составляет 63 млрд м³. Таким образом, в средне- и долгосрочной перспективе Китай будет выступать главным фактором роста рынка СПГ в АТР и в мире в целом.

При растущем спросе на газ со стороны АТР и Китая в частности Россия может войти в состав крупных импортеров СПГ Азиатского региона через поставки газа по СМП и плановом увеличении мощностей по производству СПГ.

2. Инфраструктура приемных терминалов стран-потребителей. В 2021 году в мире действовали около 142 терминалов по регазификации, из них 112 наземных и 30 морских терминалов [12]. Совокупная мощность по регазификации в мире составляла 901,9 млн тонн (1271,6 млрд м³) СПГ, увеличившись за год на 49,8 млн тонн (70,2 млрд м³). Среди существующих рынков СПГ новые терминалы начали функционировать в Индонезии, Кувейте и Мексике, в то время как Китай и Япония способствовали росту мощностей по регазификации и хранению.

Более половины мощностей и действующих терминалов СПГ находятся в странах АТР, так, на Японию приходится 39 терминалов общей мощностью 300 млн тонн в год, Южная Корея обладает 6-ю крупными терминалами мощностью 148,2 млн тонн, Китай – 21-м терминалом мощностью 131,9 млн тонн, Индия – 6-ю терминалами мощностью 47,5 млн тонн.

Крупнейшие терминалы регазификации с совокупной производительностью обратной газификации более 40 млн тонн (56,4 млрд м³) в год и резервуарным парком для хранения СПГ объемом 3436 млн тонн (4844,7 млрд м³) в эквиваленте природного газа находятся в Южной Корее (Pyeong-Taek LNG Terminal, Incheon LNG Terminal) и Японии (TEPCO Sodegaura LNG Terminal).

С целью выбора оптимального логистического маршрута поставки газа потребителю и сравнения стоимости трубопроводного и морского транспорта взята методика [13, 14] обоснования экономического преимущества доставки газа в Турцию, Китай и страны Европы. В приведенной методике рассматриваются один трубопроводный и один морской маршрут до каждой конечной точки. Автором предлагается расширить количество возможных маршрутов как наземным, так и морским транспортом в одном направлении для более объективного сопоставления полученных результатов, а также дополнить методику расчетом, объединяющую морской и наземный транспорт в единую цепочку поставки газа.

3. Методика расчета затрат на транспортировку газа. Для проведения сравнительного анализа различных транспортных маршрутов, а также консолидации маршрутов доставки энергоносителя предлагается сравнить трубопроводный транспорт компримированного природного газа (КПГ), морской транспорт СПГ по СМП, а также смешанный (комбинированный) вариант доставки энергоносителя с промежуточным изменением фазового состояния по пути следования. Расчеты сделаны на основании трех различных вариантов транспортировки газа в различных фазовых состояниях – КПГ, СПГ и СПГ-КПГ.

Конечным пунктом транспортного маршрута является Азиатско-тихоокеанский регион. По пути следования проложенных транспортных маршрутов предполагается подключение промышленных центров и газификация удаленных районов страны экспортера. С целью корректных расчетов транспортных цепочек экспорт газа осуществляется до существующих товарных приемо-сдаточных узлов Китайской народной республики, конечным пунктом является сухопутная граница страны импортера или морской порт, способный принять весь объем грузового танкера.

Методика расчета (1) себестоимости транспортировки природного газа основана на произведении удельной себестоимости прокачки газа и протяженности трубопровода:

$$E_{\text{pipe}} = \frac{R_{\text{pipe}}}{100} * C_{\text{pipe}}, \quad (1)$$

где E_{pipe} – стоимость затрат транспортировки по газопроводу; R_{pipe} – протяженность газопровода, км; C_{pipe} – затраты на прокачку по газопроводу, долл. за 1 тыс. м³ на 100 км.

В методике расчета (2) транспортировки 1 тыс. м³ газа по СМП судном арктического класса не учитываются потери СПГ при испарении из танков газовоза, движение газовоза рассматривается как дискретное событие, во избежание усложнения расчета показатель исключен:

$$E_{\text{lng}_1} = Lc + \frac{\left(\frac{R_{\text{lng}} * 2}{S} / 24 + 1\right) D_{\text{fr}}}{V}, \quad (2)$$

где E_{lng_1} – стоимость затрат транспортировки морским путем, долл.; Lc – затраты на сжижение 1 тыс. м³ природного газа, долл.; R_{lng} – протяженность морского пути, морская миля; S – скорость движения газовоза, морская миля в час; D_{fr} – суточная ставка фрахта газовоза, долл.; V – вместимость газовоза по объему СПГ, тыс. м³.

Стоимость регазификации не учитывается при сквозном движении судна в конечный пункт доставки, расчет отображает доставку СПГ с учетом сдачи груза в приемный парк хранения импортера в сжиженном состоянии.

В затратах на доставку СПГ газовозом учитывается возврат порожнего судна в порт отправления, включая сутки на погрузку и разгрузку, а при перевалке СПГ на судно конвенционного типа учитываются сутки перевалки на каждое судно.

Расчет с учетом перевалки СПГ с судна Arc 7 на судно класса Conventional выполняется по методике (3):

$$E_{\text{lng}_2} = Lc + \frac{\left(\frac{R_{\text{lng}}(\text{arc}7) * 2}{S} / 24 + 1\right) D_{\text{fr}}}{V} + Tr + \frac{\left(\frac{R_{\text{lng}}(\text{conv}) * 2}{S} / 24 + 1\right) D_{\text{fr}}}{V}, \quad (3)$$

где E_{lng_2} – затраты на транспортировку морским путем (с учетом перевалки), долл.; Lc – затраты на сжижение 1 тыс. м³ природного газа, долл.; R_{lng} – протяженность морского пути, морская миля; S – скорость движения газовоза, морская миля в час; D_{fr} – суточная ставка фрахта газовоза, долл.; V – вместимость газовоза по объему СПГ, тыс. м³; Tr – стоимость перевалки 1 тыс. м³ СПГ с газовоза ледового класса на газовоз конвенционного типа, долл.

Для оценки затрат на транспортировку при изменении фазового состояния газа СПГ-КПГ (морской транспорт – трубопроводный) по пути следования к потребителю автором предлагается методика расчета, учитывающая загрузку (товарного) экспортного газа в сжиженном

виде в танки газовоза с последующей регазификацией в порту приема и далее компримированием газа перед подачей в магистральный газопровод для транспортировки потребителю. Тем самым рассматривается объединение различных способов доставки в единый маршрут с изменением агрегатного состояния энергоносителя по пути следования:

$$El/p = Lc + \frac{(R_{lng} \cdot 2 / 24 + 1) D_{fr}}{V} + Gr + \left(P_c + \frac{R_{pipe} \cdot C_{pipe}}{100} \right), \quad (4)$$

где El/p – транспортные затраты с изменением фазового состояния по пути следования, долл./тыс. м³; Lc – стоимость сжижения за 1 тыс. м³ природного газа, долл.; R_{lng} – протяженность морского пути, морская миля; S – скорость движения газовоза, морская миля в час; D_{fr} – суточная ставка фрахта газовоза, долл.; V – вместимость газовоза по объему СПГ, тыс. м³; Gr – затраты на регазификацию, долл./тыс. м³; P_c – стоимость компримирования за 1 тыс. м³ природного газа, долл.; R_{pipe} – протяженность газопровода, км; C_{pipe} – стоимость прокачки по газопроводу, долл. за 1 тыс. м³ на 100 км.

В расчетах используются следующие коэффициенты для перевода единиц измерения: 1 тонна СПГ – 2,44 м³ СПГ – 1,41 тыс. м³ природного газа в свободном виде; 1 м³ СПГ – 600 м³ исходного газа; 35,08 ММВТЕ – 1 тыс. м³ газа; 1 морская миля 1,85 км [15].

В расчетах использованы следующие исходные данные: стоимость прокачки газа по газопроводам единой системы газоснабжения (ЕСГ) России составляет 5,5 долл. за 1 тыс. м³ на 100 км; стоимость прокачки 1 тыс. м³ природного газа на 100 км по трубопроводу «Сила Сибири» составляет порядка 6,3 долл. Расчет себестоимости транспортировки газа выполнен для Ямало-Ненецкого автономного округа: по трубопроводам – от Уренгойского НГКМ (УНГКМ); морским путем в виде СПГ – от месторождения Южно-Тамбейское ГКМ (ЮТГКМ).

Себестоимость сжижения 1 ММВту природного газа составляет 2,85 долл., 1 тыс. м³ – 99,97 долл. Себестоимость регазификации 1 ММВту составляет 0,44 долл., 1 тыс. м³ – 15,75 долл. Для доставки СПГ напрямую в страны АТР по Северному морскому пути используются газовозы арктического класса Arc7. Также рассмотрена перевалка СПГ с газовозов Arc7 на газовозы типа Conventional в портах страны-экспортера, или, при технической возможности, перевалка с судна на судно. Скорость движения газовоза Arc7 во льдах составляет 10 узлов, скорость движения газовозов обоих типов по чистой воде (в свободных от льда) – 18 узлов. Смешанное движение газовоза море-река принято в 10 узлов.

Вместимость газовоза Arc7 по объему СПГ составляет 172,6 тыс. м³ СПГ или 103,5 млн. м³ природного газа в свободном виде, вместимость газовоза Conventional – 145 тыс. м³ СПГ или 87 млн. м³ газа. Так как в расчетах приведена конечная себестоимость 1 тыс. м³, то при перегрузке с судна на судно не учитывается разность по тоннажу вместимости и остатки в танкерах судна, необходимые для поддержания работы хранилища танка от охлаждения, а также потери от 0,15% в сутки от объема, перевозимого СПГ, данные считаются как погрешность.

Суточная средняя ставка фрахта газовоза Arc7 составляет 140 тыс. долл., газовоза Conventional – 63,5 тыс. долл. [16, 17]. Стоимость перевалки 1 тыс. м³ природного газа в порту взята 5,2 долл. В расчетах не учитывается проводка ледоколом в период тяжелых ледовых условий на основании критерия допуска судна класса Arc7 к самостоятельному плаванию с 01 июля по 30 ноября.

4. Транспортная схема. Рассмотрены следующие маршруты поставок природного газа потребителю:

1. Маршрут поставки газа с Уренгойского НГКМ трубопроводным транспортом выглядит следующим образом: осушенный и подготовленный к транспорту газ после компримирования подается в систему существующих газопроводов ЕСГ и далее с подключением к вероятной

системе газопроводов проектируемой магистрали «Сила Сибири 2» или с подключением к существующему магистральному газопроводу «Сила Сибири» (рисунок 4).

2. Маршрут поставок СПГ с п-ова Ямал по Северному морскому пути. Общая протяженность морского пути от п. Сабетта до крупнейшего регазификационного СПГ терминала Китая – Tangshan LNG, расположенного в логистическом парке порта Цаофэйдянь г. Таншаня провинции Хэбэй – 6263,5 морских миль (11 600 км). Перевалка груза с судов арктического класса на газовозы конвекционального типа может осуществляться в портах города Певек или Анадырь Чукотского автономного округа [18, 19].

3. Маршрут транспортировки природного газа с п-ова Ямал с изменением фазового состояния с СПГ на КПГ при регазификации в порте г. Якутск или пос. Олёкминск Республики Саха (Якутия) с последующим компримированием газа на компрессорной станции и подачей в магистральный газопровод «Сила Сибири».

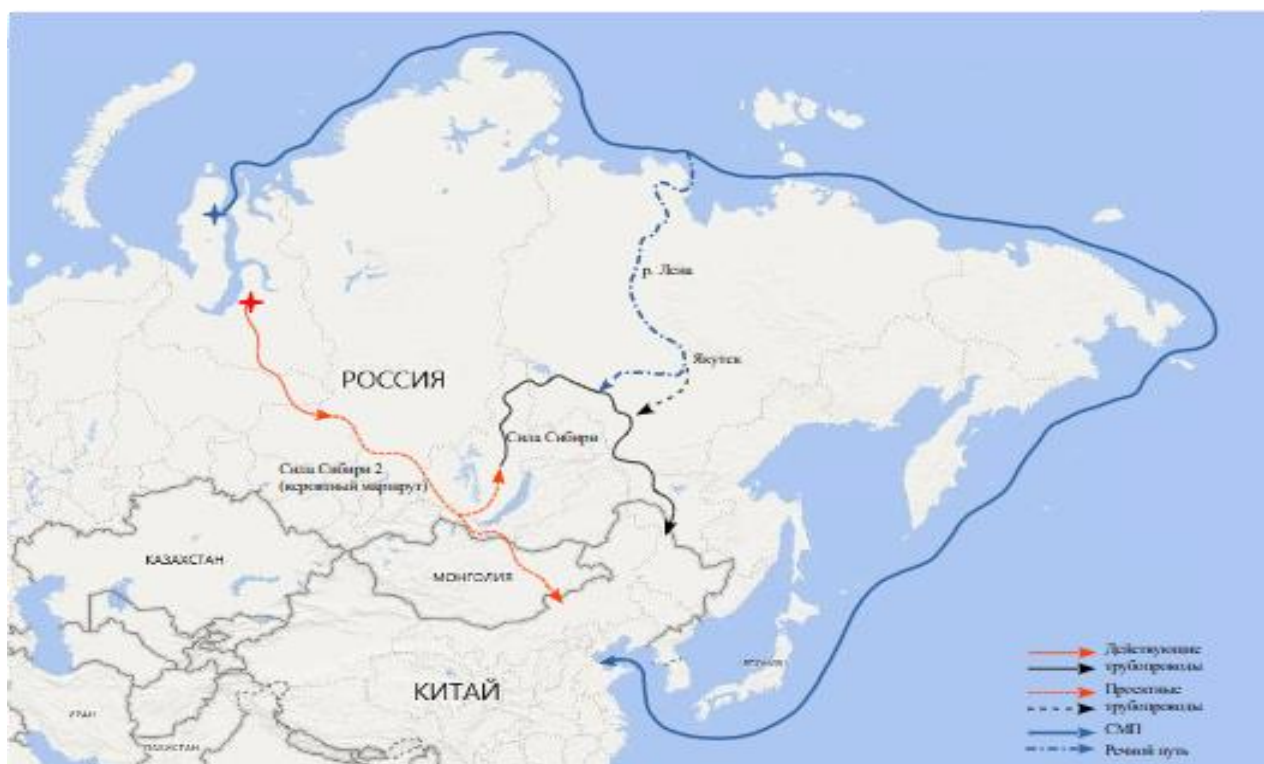


Рис. 4. Маршрутная схема поставки газа

5. **Результаты расчетов.** На основании приведенных коэффициентов и исходных данных были рассчитаны затраты на трубопроводную (E_{pipeline}), морскую (E_{ing}) и мультимодальную ($E_{1/g}$) транспортировку 1 тыс. м³ природного газа, результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета затрат на доставку газа в зависимости от маршрутного коридора

Маршрут поставки	Затраты на транспортировку (E), долл./тыс.м ³	Протяженность пути, км	
Трубопроводный транспорт	УНГКМ – Китай (проектный маршрут газопровода до действующего газопровода «Сила Сибири»)	196,1	5259
	УНГКМ – Монголия – Китай (проектный маршрут газопровода «Сила Сибири 2»)	163,2	6318

Морской транспорт	ЮТГК – СМП– Китай (судно Arc7)	141,8	11600
	ЮТГК – СМП Китай (перевалка груза Arc7 – Conventional)	123,8	12710
Смешанный (морской/ трубопроводный)	ЮТГК – СМП – Якутия – Китай (судно Arc7 – действующий газопровод «Сила Сибири»)	240,2	6258

Затраты на транспортировку газа с Уренгойского НГКМ по территории России с подключением к действующему магистральному газопроводу «Сила Сибири» составляют 196,1 долл./тыс. м³. Транспортный маршрут, проложенный по территории России через территорию Монголии по проектируемому газопроводу «Сила Сибири 2», характеризуется затратами 163,2 долл./тыс. м³. Себестоимость поставки 1 тыс. м³ морским путем по СМП с конечной точкой в порту г. Таньшань, Китай составляет 141,8 долл./тыс. м³ и 123,8 долл./тыс. м³ при перевалке груза с судна класса Arc7 на газовоз общего назначения соответственно.

Доставка газа потребителю по маршруту СМП с заходом через устье реки Лена до г. Якутск или пос. Олекминск, находящегося выше течения реки, с последующей регазификацией и компримированием газа на действующих компрессорных станциях магистрального газопровода «Сила Сибири» КС-3 или КС-2 соответственно, составит 240,2 долл./тыс. м³.

Необходимо отметить, что данные расчеты приведены на единичный случай поставки 1 тыс. м³ газа. Прогнозируя газоснабжения субъектов или экспортные поставки длительного периода, необходимо учитывать различные факторы, касающиеся объемов добычи газа с учетом падающих дебетов существующих месторождений и запуском новых проектов добычных кластеров, а также допустимые транспортные мощности с учетом отбора газа из магистральной сети и/или увеличения объемов прокачки по пути следования к конечному потребителю в зависимости от пропускной способности газопровода. При поставках морским транспортом необходимо предусматривать ограничения по объемам грузовых отсеков танкера, наличие соответствующего флота, сезонные условия и время движения судна до потребителя, в отличие от трубопроводной поставки, которая менее подвержена корреляции время-объем при правильно заложенных проектных решениях. Таким образом, в дальнейших исследованиях имеет смысл рассмотреть интегрированные, неконкурирующие маршруты трубопроводного-морского транспорта газа с учетом развития инфраструктуры прибрежных зон и газификации удаленных северных районов.

6. Оптимизация транспортной системы. При решении задач по оптимизации логистических маршрутов, перспективному планированию, развитию и расширению транспортной системы необходимо рассмотреть множество сопутствующих задач, тесно связанных с распределением потоков в зависимости от мощностей трубопроводной системы, сезонными условиями доставки груза морским транспортом, пиковым/сезонным спросом и т. д.

Основным методологическим инструментом при рассмотрении поставленных задач является линейное программирование. Результатом оптимизации транспортной системы при дальнейших исследованиях является нахождение более оптимального маршрута при снижении издержек по доставке конечного продукта потребителю. Для этих целей может быть применена теория потокового программирования, которая обширно освещена в ходе научных исследований, анализирующих как сам процесс моделирования различных задач, так и используемые методы и алгоритмы [20].

Одним из основных методов решения задач линейного программирования является симплекс-метод [21]. Данный метод представляет собой итеративную процедуру решения задач

линейного программирования, что во многом упрощает, а в большинстве случаев составляет основу для анализа искомым данным.

Заключение. Сравнительный анализ себестоимости транспортировки природного газа с месторождений Арктического региона различными маршрутами продемонстрировал высокую конкурентоспособность доставки энергоносителей в форме СПГ по СМП. Развитие экономической деятельности России в Арктике во многом зависит от возросшего технологического, транспортного и инфраструктурного потенциала региона. Это включает в себя не только порты, ледокольный флот, поисково-спасательные и экологические службы, автомобильные и железные дороги, но и передовые технологии, направленные на развитие производства. Следовательно, развитие Северного морского пути может стать одним из основных драйверов формирования транспортной системы Арктической зоны, что потребует решения следующих задач:

1. Разработка маршрутов с перевалочными терминалами, обеспечивающие круглогодичные грузопотоки по Северному морскому пути.
2. Построение математических моделей и алгоритмов с целью выявления наиболее оптимальных транспортных маршрутов и удовлетворения спроса потребителей.
3. Расширение возможности судоходства по каналам и бассейну рек Арктической зоны, включая проведение дноуглубительных, берегоукрепительных работ, строительство и обустройство действующих портов и портопунктов.
4. Внедрение общих стратегий, для создания новой морской инфраструктуры вдоль СМП, позволяющей управлять высокими операционными рисками и обеспечивающей надежные цепочки поставок груза.

Список источников

1. Иванов В.Л. Восточно-арктический шельф России ждет своих исследователей / В.Л. Иванов // Горный журнал, 2015. – № 3. – С. 71-76.
2. Краснов О.С. Геолого-экономические проблемы воспроизводства минерально-сырьевой базы нефти и газа / О.С. Краснов, В.И. Назаров, О.М. Прищепа и др. // Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 12–18.
3. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 16 марта 2021 г. № 640-р «Об утверждении долгосрочной программы развития производства сжиженного природного газа в Российской Федерации».
4. Makarova I., Gubacheva L., Makarov D., Buyvol P. Economic and environmental aspects of the development possibilities for the northern sea route. *Transportation research procedia*, 2021, vol. 57, pp. 347-355.
5. World Energy Outlook 2022. Available at: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2022/10/IEA-World-Energy-Outlook-2022-2022_10.pdf (accessed: 07/05/2023).
6. Степанов Н.С. Арктика и развитие Северного морского пути в институциональной модернизации экономики России / Н.С. Степанов // Федерализм, 2019. – № 1. – С. 5-23.
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 18.09.2020 № 1487 «Об утверждении Правил плавания в акватории Северного морского пути» (с изменениями на 19 сентября 2022 года).
8. Информационное агентство Neftegaz.RU. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/686478-obnovlenie-arkticheskogo-flota/> (дата обращения: 19.07.2023).
9. Информационное агентство Neftegaz.RU. – URL: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/spg/733414-karta-rossiyskoj-spg-otrasli-2022/> (дата обращения 19.07.2023).
10. IGU World LNG Report 2022, available at: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/08/World-LNG-Report2022.pdf> (accessed: 09/05/2023).
11. The Oxford Institute for energy studies, March 2022. Available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/03/OEF-131.pdf> (accessed 09/14/2023).
12. Информационное агентство Neftegaz.RU. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/769892-mirovoy-rynok-spg-strukturnye-osobennosti-i-prognoz-razvitiya/> (accessed 09/14/2023).
13. Козьменко С.Ю. Обоснование экономического преимущества морской транспортировки Арктического природного газа в виде СПГ / С.Ю. Козьменко, В.А. Маслобоев, Д.А. Матвишин // Записки Горного института. Геоэкономика и менеджмент, 2018. – Т. 233. – С. 554-560.

14. Бородин В.С. Экономическое преимущество использования СМП как главного трансарктического маршрута сбыта СПГ в страны АТР и ЕС / Бородин В.С., Гришно М.А. // Международный научно-исследовательский журнал. – Российский университет дружбы народов, Москва, Россия, 2021. – № 6 (108). – Ч. 5.
15. Statistical review of world energy 2022. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed: 06/14/2023).
16. The Oxford Institute for energy studies, November 2019, ISBN: 978-1-78467-150-1, DOI: 10.26889/9781784671501, available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/11/Russian-LNG-Becoming-a-Global-Force-NG-154.pdf>.
17. Информационное агентство Neftegaz.RU. – URL: <https://neftegaz.ru/news/spg-szhizheny-prirodny-gaz/704007-stoimost-frakhta-tankerov-gazovozov-spg-vyrosla-bolee-chem-v-2-raza-/?ysclid=lldbrw1b5777088102> (дата обращения: 30.06.2023).
18. Третий том серии Арктических исследований подготовлен рабочей группой «Энергия Арктики» Центра энергетики Московской школы управления СКОЛКОВО, сформировавшейся из выпускников Энергетической летней школы СКОЛКОВО-2018, и посвящен развитию Северного Морского Пути (СМП), логистике и флоту. – URL: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_Arctic_Vol3.pdf (дата обращения: 10.05.2023).
19. Боброва В.А. Роль Северного Морского пути в развитии регионов Арктической Зоны России / В.А. Боброва // Вектор Экономики, 2020. – № 6. – URL: <http://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2020/6/regionaleconomy/Bobrova.pdf> (дата обращения: 23.06.2023).
20. Юдин Д.Б. Линейное программирование / Д.Б. Юдин, Е.Г. Гольштейн. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
21. Габасов Р. Методы линейного программирования / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова. – Минск: БГУ, 1977. – 176 с.

Боровинский Даниил Игоревич. Аспирант Института систем энергетики им Л.А. Мелентьева СО РАН, ведущий инженер ООО «Газпром добыча Иркутск». Наименование исследований: Исследование развития газо-снабжающей системы Северных месторождений Ямала, Восточной Сибири и Дальнего Востока. AuthorID: 1214990, SPIN: 6594-9119, BorovinskyDI@irkutsk-dobycha.gazprom.ru.

UDC 621.6:629.124

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.012

Analysis of the development of pipeline and sea transport of natural gas from the Arctic region

Daniil I. Borovinskii

Melentiev energy systems institute SB RAS,

Russia, Irkutsk, BorovinskyDI@irkutsk-dobycha.gazprom.ru

Abstract. The article discusses the logistics transport routes for the supply of natural gas from Arctic region located on the shelf of the northern seas and the Yamal Peninsula. The description of the development of the transport network is given with the results of a comparative calculation of the unit cost of transporting gas in different phase states along different transport routes. The purpose of the study is to consider possible options for the delivery of hydrocarbon raw materials to the consumer with the lowest transport costs. The considered transport routes and the obtained preliminary data are applicable to solving linear programming problems. Schematically shows the supply of natural gas to consumers from the northern fields through the pipeline system in a compressed state and by sea in liquefied form. The fields of the western part of the Yamal Peninsula and the Nadym-Pur-Taz region are part of a single gas supply system, the fields of the eastern part of the Yamal Peninsula, the shelf and the western part of the Gydan Peninsula are removed from the existing gas infrastructure, which significantly complicates the monetization of finished products. Due to the close connection of the Arctic regions with the Arctic Ocean, shipping by sea is becoming an integral part of the development of offshore and coastal fields. Climatic conditions and underdeveloped infrastructure require a detailed study of possible transport routes, taking into account the reliability of the equipment involved in transport chains and the financial component of the relevant investment projects. In order to identify the optimal directions of gas supplies from an economic point of

view, various route options are considered, including with a change in the phase state of the energy carrier. The author considers the integrated gas delivery route to the consumer, combining marine and pipeline gas transportation, suggests new supply routes, shows the methodology for preparing initial information, and performs calculations for existing, project and possible transport directions.

Keywords: gas supply to the consumer, transport routes, Northern Sea Route, icebreaker fleet, LNG transportation, mathematical modeling

Reference

1. Ivanov V.L. Vostochno-arkticheskiy shel'f Rossii zhdet svoikh issledovateley [The Eastern Arctic shelf of Russia is waiting for its researchers]. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal], 2015, no. 3, pp. 71-76.
2. Krasnov O.S., Nazarov V.I., Prishchepa O.M. and others *Geologo-ekonomicheskiye problemy vosproizvodstva mineral'no-syr'yevoy bazy nefti i gaza* [Geological and economic problems of reproduction of the mineral resource base of oil and gas]. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* [Oil and gas geology. Theory and practice], 2013, vol. 6, no. 1, pp. 12-18.
3. Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 16 marta 2021 g. № 640-r «Ob utverzhdenii dolgosrochnoy programmy razvitiya proizvodstva szhizhennogo prirodnogo gaza v Rossiyskoy Federatsii» [Decree of the Government of the Russian Federation no. 640-r dated March 16, 2021 "On approval of a long-term Program for the development of liquefied natural gas production in the Russian Federation»].
4. Makarova I., Gubacheva L., Makarov D., Buyvol P. Economic and environmental aspects of the development possibilities for the northern sea route. *Transportation research procedia*, 2021, vol. 57, pp. 347-355.
5. World Energy Outlook 2022. Available at: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2022/10/IEA-World-Energy-Outlook-2022-2022_10.pdf (accessed: 07/05/2023).
6. Stepanov N. S. Arktika i razvitiye Severnogo morskogo puti v institutsional'noy modernizatsii ekonomiki Rossii [The Arctic and the development of the Northern Sea Route in the institutional modernization of the Russian economy]. *Federalizm* [Federalism], 2019, no. 1, pp. 5-23.
7. Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 18.09.2020 № 1487 "Ob utverzhdenii Pravil plavaniya v akvatorii Severnogo morskogo puti" [Decree of the Government of the Russian Federation no. 1487 dated 18.09.2020 "On Approval of the Rules of Navigation in the Waters of the Northern Sea Route"], (as amended on September 19, 2022).
8. Informatsionnoye agentstvo Neftegaz.RU [Information agency Neftegaz.RU]. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/arktika/686478-obnovlenie-arkticheskogo-flota>, (accessed: 07/19/2023).
9. Informatsionnoye agentstvo Neftegaz.RU [Information agency Neftegaz.RU]. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/spg/733414-karta-rossiyskoy-spg-otrasli-2022/>, (accessed: 07/19/2023).
10. IGU World LNG Report 2022, available at: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/08/World-LNG-Report2022.pdf> (accessed: 09/05/2023).
11. The Oxford Institute for energy studies, March 2022. Available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/03/OEF-131.pdf>. (accessed: 09/14/2023).
12. Informatsionnoye agentstvo Neftegaz.RU [Information agency Neftegaz.RU]. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/769892-mirovoy-rynok-spg-strukturnye-osobennosti-i-prognoz-razvitiya> (accessed: 09/14/2023).
13. Kozmenko S.Yu., Masloboev V.A., Matviishin D.A. Obosnovaniye ekonomicheskogo preimushchestva morskoy transportirovki Arkticheskogo prirodnogo gaza v vide SPG [Justification of the economic advantages of sea transportation of Arctic natural gas in the form of LNG], *Zapiski Gornogo instituta. Geoekonomika i menedzhment* [Notes of the Mining Institute. Geo-economics and management], 2018, vol. 233, pp. 554-560.
14. Borodkin V.S., Grikhno M.A. Ekonomicheskoye preimushchestvo ispol'zovaniya SMP kak glavnogo transarkticheskogo marshruta sbyta SPG v strany ATR i YES [On the economic advantage of using the Northern sea route as the main trans-arctic route for the supply of liquefied natural gas to the Asia-Pacific and the EU], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International scientific research journal], Rossiyskiy universitet druzhby narodov [Peoples Friendship University of Russia], Moscow, Russia, 2021, no. 6 (108), part 5.
15. Statistical review of world energy 2022. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf> (accessed: 06/14/2023).
16. The Oxford Institute for energy studies, November 2019. ISBN: 978-1-78467-150-1, DOI:10.26889/9781784671501, available at: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/11/Russian-LNG-Becoming-a-Global-Force-NG-154.pdf>.

17. Informatsionnoye agentstvo Neftegaz.RU [Information agency Neftegaz.RU]. Available at: <https://neftegaz.ru/news/spg-szhizhennyu-prirodnyu-gaz/704007-stoimost-frakhta-tankerov-gazovozov-spg-vyroslo-bolee-chem-v-2-raza-/?ysclid=lldbrw1b5777088102> (accessed: 06/30/2023).
18. Tretiy tom serii Arkticheskikh issledovaniy podgotovlen rabochey gruppoy «Energiya Arktiki» Tsentra energetiki Moskovskoy shkoly upravleniya SKOLKOVO, sformirovavsheysya iz vypusnikov Energeticheskoy letney shkoly SKOLKOVO-2018, i posvyashchen razvitiyu Severnogo Morskogo Puti (SMP), logistike i flout [The third volume of the Arctic Research series was prepared by the working group "Arctic Energy" of the Energy Center of the Moscow School of Management SKOLKOVO, formed from graduates of the Energy Summer School SKOLKOVO-2018, and is dedicated to the development of the Northern Sea Route (NSR), logistics and fleet]. Available at: https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_RU_Arctic_Vol3.pdf (accessed: 05/10/2023).
19. Bobrova V.A. Rol' Severnogo Morskogo puti v razvitii regionov Arkticheskoy Zony Rossii [The role of the Northern Sea Route in the development of the regions of the Arctic Zone of Russia]. Vektor Ekonomiki [Vector of Economics], 2020, no. 6, UDC 332.1, available at: <http://www.vectoreconomy.ru/images/publications/2020/6/regionaleconomy/Bobrova.pdf> (accessed: 06/23/2023).
20. Yudin D.B., Gol'shteyn E.G. Lineynoye programmirovaniye [Linear programming], Nauka [Science], 1969, p. 424.
21. Gabasov R., Kirillova F.M. Metody lineynogo programmirovaniya [Methods of linear programming], Minsk, BSU, 1977, p. 176.

Daniil Igorevich Borovinskii. *PhD student, Melentiev energy systems institute siberian branch of the Russian Academy of Sciences, AuthorID: 1214990, SPIN: 6594-9119, BorovinskyDI@irkutsk-dobycha.gazprom.ru.*

Статья поступила в редакцию 06.10.2023; одобрена после рецензирования 14.02.2024; принята к публикации 13.03.2024.

The article was submitted 10/06/2023; approved after reviewing 02/14/2024; accepted for publication 03/13/2024.

Информационные и интеллектуальные технологии

УДК 004.550

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.013

Разработка виртуальных пространств с интеллектуальным адаптивным интерфейсом для цифровых геологических систем

Ерёменко Виталий Сергеевич¹, Наумова Вера Викторовна¹, Загумённов Алексей Андреевич²

¹Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН,
Россия, Москва, *vitaer@gmail.com*

²Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Россия, Владивосток

Аннотация. Статья посвящена разработке и последующей программной реализации подхода по созданию виртуального рабочего пространства с интеллектуальным адаптивным интерфейсом. В статье рассматриваются существующие решения для организации виртуальных рабочих мест, формулируются основные требования к виртуальному рабочему пространству и предлагается структура программного решения. Демонстрируется прототип разработанной программной платформы.

Ключевые слова: виртуальное рабочее пространство, web-сервис, программная платформа

Цитирование: Ерёменко В.С. Разработка виртуальных пространств с интеллектуальным адаптивным интерфейсом для цифровых геологических систем / В.С. Ерёменко, В.В. Наумова, А.А. Загумённов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 146-153. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.013.

Введение. Целью данной работы является проектирование программной системы, предоставляющей исследователям единую точку доступа к научным данным и сервисам их обработки, анализа и визуализации в формате совместной работы в виртуальном рабочем пространстве с интеллектуальным адаптивным интерфейсом для решения геологических задач.

1. Обзор существующих систем и решений. Виртуальное рабочее пространство предполагает возможность удалённой работы пользователей в режиме рабочего стола в привычном окружении и с требуемым программным обеспечением. Существует несколько основных подходов для организации виртуального рабочего пространства:

- Virtual Desktop Infrastructure (VDI) – программно-аппаратный комплекс для централизованного создания виртуальных рабочих столов. Чаще всего такой подход предполагает наличие на стороне сервера набора виртуальных машин с клиентскими операционными системами и программным обеспечением. Каждая виртуальная машина работает независимо от других. Пользователь получает доступ к своему образу операционной системы удалённо через клиентское приложение.
- Remote Desktop Services (RDS) – клиент-серверная технология виртуализации рабочих мест, в которой пользователи совместно используют операционную среду сервера, программы и аппаратные ресурсы.

Оба варианта виртуализации рабочего пространства требуют значительных аппаратных ресурсов, позволяющих размещать набор образов операционных систем (в случае VDI), либо организовывать централизованный доступ к ресурсам одной операционной системы и её программного обеспечения (в случае RDS) для совместного использования несколькими клиентами. При этом настройка необходимого программного обеспечения выполняется либо самим пользователем, либо администратором поставщика услуги.

Ещё одним вариантом организации виртуального рабочего пространства является использование технологий виртуальной и дополненной реальности, предоставляющие пользователю возможность работы с привычными ему программными приложениями, используя VR-гарнитуру как инструмент для взаимодействия с приложениями и их визуализации [1].

Современное развитие web-технологий позволяет организовать виртуальное рабочее пространство в облачной среде, предоставляя пользователю рабочий стол в виде web-приложения, с набором программного обеспечения в формате облачных сервисов. Примером данного подхода являются облачные решения в рамках моделей Software as a Service (SaaS) и Platform as a Service (PaaS). Такой подход менее требователен к аппаратным ресурсам центральной программной платформы, т.к. выполнение рабочих процессов происходит на удалённых территориально-распределённых серверах поставщиков сервисов [2, 3]. Однако типовые разрабатываемые решения ориентированы под различные бизнес-задачи, и их сложно адаптировать под задачи поддержки научных исследований [4].

2. Проектирование виртуальных пространств с интеллектуальным адаптивным интерфейсом для цифровых геологических систем. Виртуальное рабочее пространство позволяет в интерактивном режиме получить доступ к наборам данных, сервисам их обработки, анализа и визуализации для решения определённой исследовательской задачи в рамках одной программной системы. Привычный пользователю графический интерфейс, используемый в современных операционных системах, позволяет упростить процесс взаимодействия с доступными в системе инструментами. Таким образом, можно выделить следующие основные требования к виртуальному рабочему пространству:

- возможность работы с данными и сервисами обработки совместно с другими пользователями;
- интерактивный пользовательский интерфейс в web-браузере в привычном пользователю формате рабочего окружения;
- расширение функциональности посредством подключения плагинов.

На основе поставленных требований можно сформулировать следующие функциональные требования:

- управление пользователями (регистрация, авторизация, редактирование аккаунта и т.д.);
- управление данными (загрузка, скачивание, редактирование, удаление);
- управление плагинами (добавление, удаление, включение/отключение);
- администрирование (управление системой, мониторинг, логирование и т.д.).

Для реализации сформулированных требований предлагается использовать программную платформу, включающую в себя следующие основные элементы:

- Ядро платформы – набор базовых компонентов платформы, обеспечивающий минимальную функциональность, необходимую для работы платформы. Ядро включает в себя компоненты по управлению пользователями, управлению данными и администрированию.
- Плагины – внешние программные модули, реализованные согласно определённым требованиям, позволяющие расширять существующую функциональность платформы.
- Пользовательский web-интерфейс – интерфейс для взаимодействия пользователей с платформой через web-браузер в интерактивном режиме.

В качестве инструментов для реализации требуемых функций рабочего пространства можно рассмотреть ряд существующих решений. Программные системы для организации совместной работы пользователей над одним или несколькими проектами позволяют управлять участниками проекта, списком задач, связанными ресурсами, а также следить за ходом выполнения проектов и формировать отчёты. Среди них можно выделить следующие системы:

- Trello – планировщик задач, который позволяет пользователям управлять проектами, рабочими процессами и заданиями любых типов [5]. Предоставляет возможность составления списка задач, добавления файлов, интеграции с внешними системами и автомати-

зации процессов. Основными элементами проекта являются карточки, описывающие задачи проекта; колонки, группирующие карточки; и доски, состоящие из набора сгруппированных по колонкам карточек, представляющие отдельный проект.

- Jira – платформа для управления проектами, задачами и отслеживания ошибок [6]. Платформа предназначена, в первую очередь, для разработчиков и ведения agile-проектов.
- Migo – интерактивная онлайн-доска для совместной работы команд [7]. Она позволяет пользователям писать, рисовать, добавлять файлы, делиться комментариями, управлять проектами в режиме канбан-доски.
- Notion – приложение, которое предоставляет такие компоненты, как базы данных, канбан-доски, вики, календари и напоминания [8]. Пользователи могут подключать эти компоненты для создания собственных систем управления знаниями, ведения заметок, управления данными, управления проектами и другими. Эти компоненты и системы могут использоваться индивидуально или совместно с другими.
- Yandex Tracker – сервис для совместной работы и организации процессов в компании [9]. В основном используется командами разработчиков по методологии agile, а также для ведения документооборота и создания отчётов по проектам.

Описанные выше программные системы являются универсальными инструментами для организации коллективной работы пользователей без учёта специфики определённой предметной области или категорий задач. Их основными функциями являются распределение задач между участниками проекта, отслеживание текущего статуса каждой задачи в проекте с возможностью формирования отчётов, ведение документации, фиксация замечаний и ошибок и т.д.

Среди систем для совместного просмотра и редактирования данных можно выделить следующие:

- Google Документы – офисный пакет, разработанный компанией Google, который помогает пользователям создавать и редактировать документы, электронные таблицы и презентации в облаке [10]. Поддерживает работу с документами форматов Microsoft Word и PDF. Сохранять результаты можно в форматах DOCX, PDF, ODT, RTF, TXT и HTML.
- Microsoft Office Online – это онлайн-пакет офисных приложений, который позволяет пользователям создавать и редактировать файлы, используя облегченные веб-версии приложений Microsoft Office: Word, Excel, PowerPoint, OneNote [11].

Использование таких систем позволяет организовать программную инфраструктуру для более эффективного решения задач в совместном режиме. При необходимости вышеперечисленные системы можно подключить к разрабатываемой платформе с помощью системы плагинов.

3. Разработка виртуальных пространств с интеллектуальным адаптивным интерфейсом для цифровых геологических систем. Разработка виртуального рабочего пространства для цифровых геологических систем ведётся на базе информационно-аналитической среды для поддержки научных исследований в геологии GeologyScience.ru [12 - 14].

В настоящий момент реализован прототип виртуального рабочего пространства (<https://workplace.geologyscience.ru>). Ядро платформы включает в себя реализованные компоненты управления пользователями и управления данными (рис. 1).

Важным подходом при разработке пространства является поддержка интерфейса на естественном языке для постановки и решения самых разнообразных геологических задач. При этом используются методы и технологии искусственного интеллекта и теории графов. Важным новым моментом является формальная постановка задачи на основе текстового описания задачи пользователем с использованием технологии чат-бота с генеративным искусственным

интеллектом, способного работать в диалоговом режиме, поддерживающего запросы на естественных языках. На основе результата работы чат-бота пользователю будет предложен набор данных и методов анализа, которыми он может воспользоваться для решения поставленной задачи.

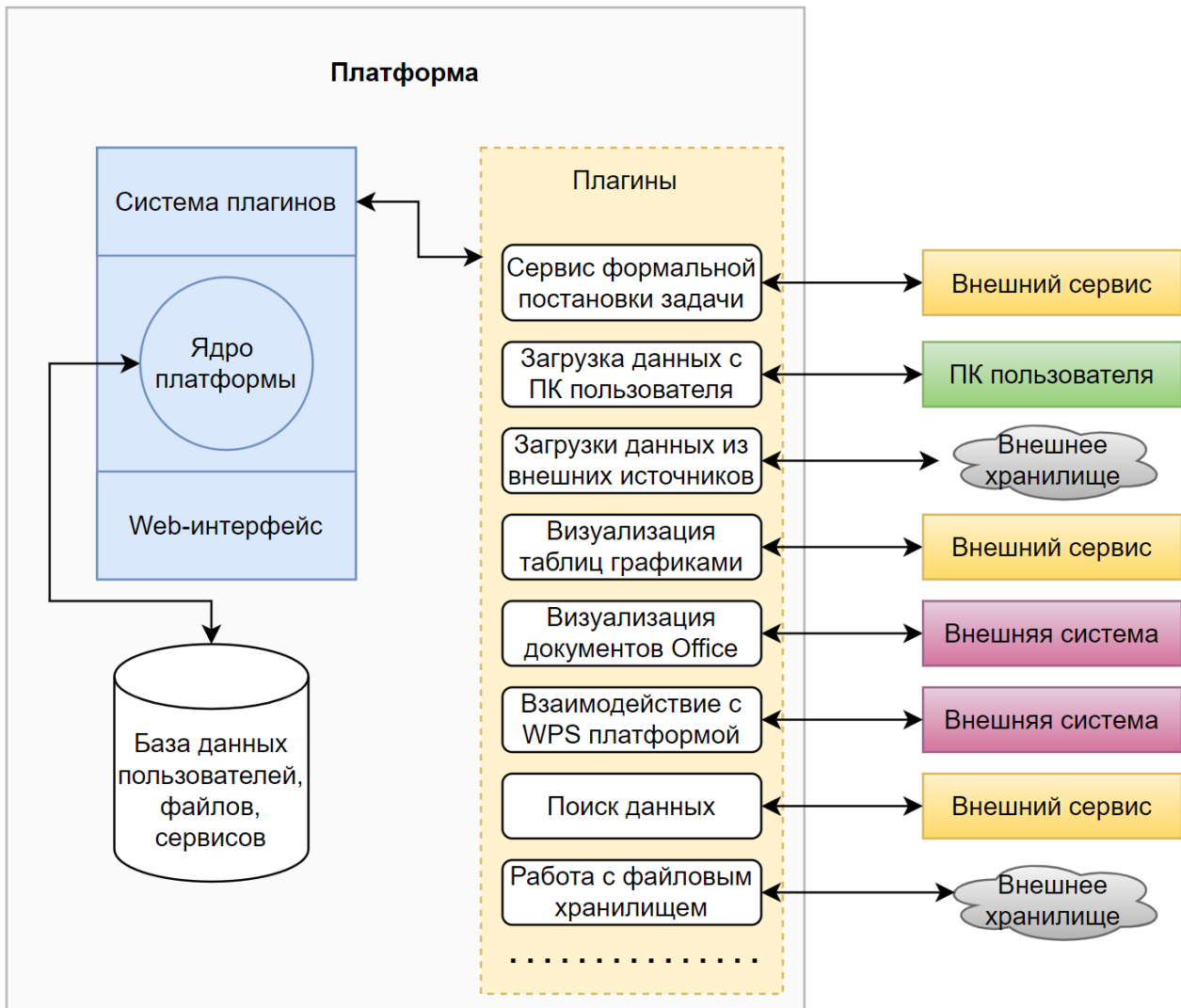


Рис. 1. Схема виртуального рабочего пространства

В настоящее время в прототипе через web-интерфейс доступны функции регистрации и авторизации; поиска, получения, сохранения и визуализации данных (рис. 2). Дальнейшее расширение функциональности платформы предполагается реализовать путём добавления в систему новых плагинов. На данный момент реализованы плагины для поиска данных по текстовому запросу, взаимодействия с WPS-платформой, включающей ряд web-сервисов для обработки количественных и текстовых данных, загрузки данных из внешних источников и ПК пользователя, работы с внешним облачным хранилищем.

В качестве программной архитектуры ядра был выбран микросервисный подход, предполагающий разделение программного продукта на небольшие относительно независимые элементы. Такой подход упрощает разработку и дальнейшую поддержку ядра платформы, и позволяет гибко распределять нагрузку на разные элементы ядра платформы (рис. 3).

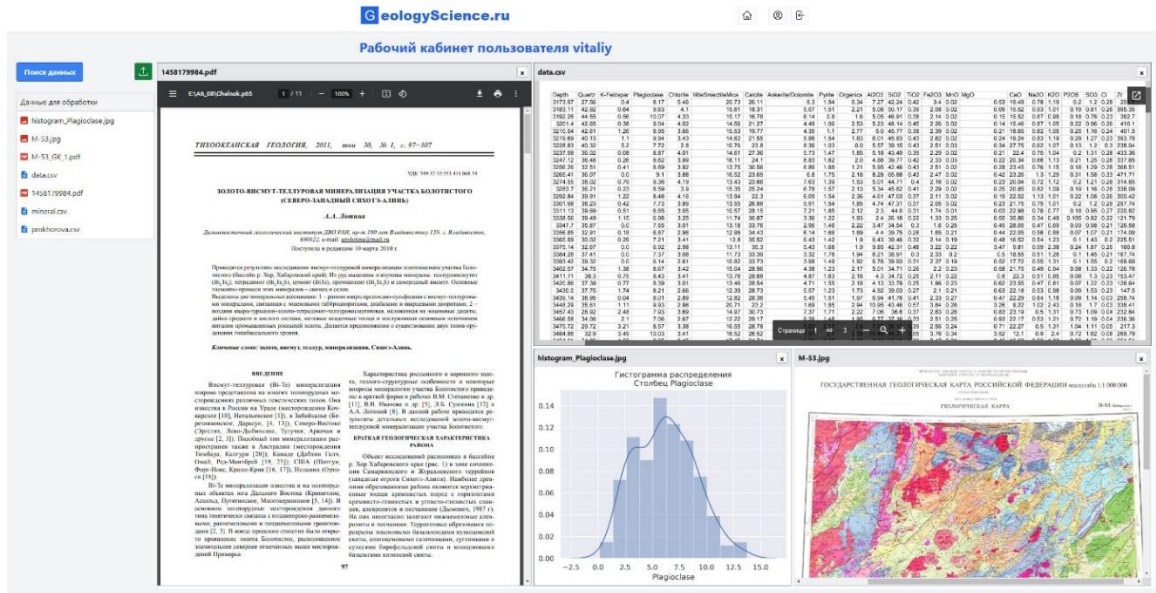


Рис. 2. Web-интерфейс прототипа виртуального рабочего пространства

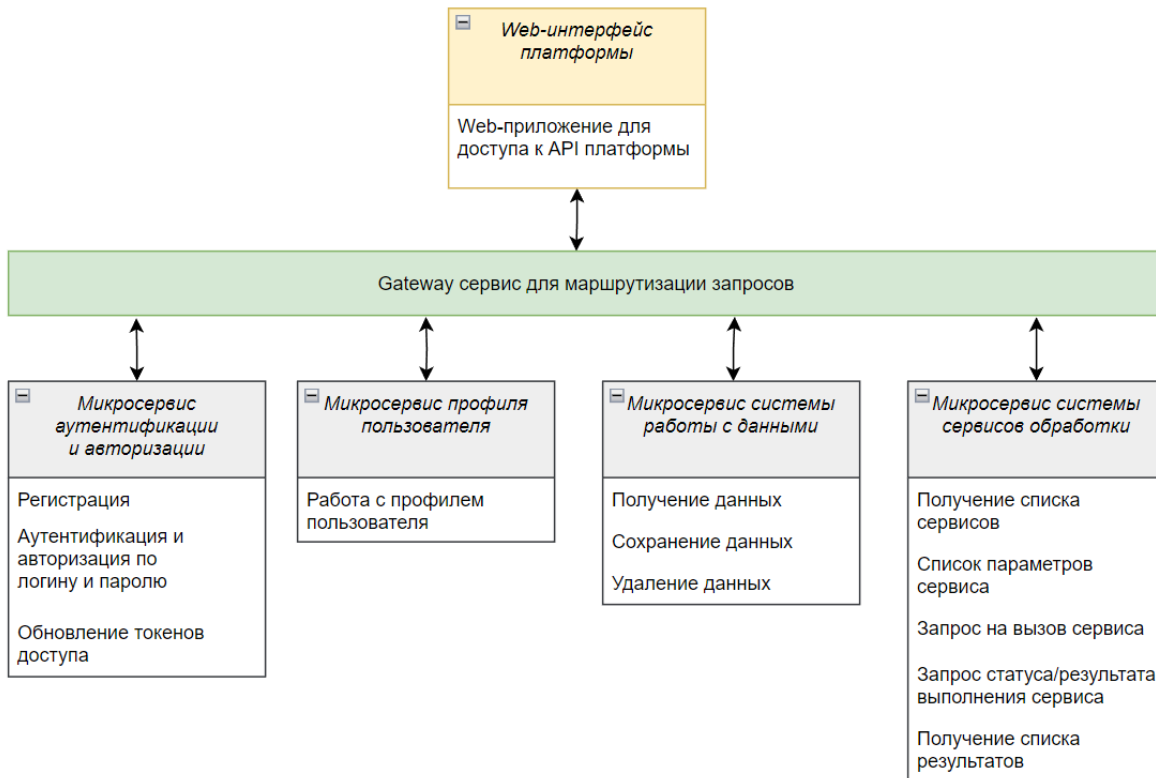


Рис. 3. Схема разбиения ядра платформы на отдельные микросервисы

Для регистрации и аутентификации пользователей используется общий сервис единой аутентификации, предоставляющий пару токенов (access и refresh), используя которые, пользователь может получить доступ к другим элементам платформы, согласно его правам доступа.

Поиск данных осуществляется через обращение к внешнему сервису. Этот сервис реализует поиск по задаваемой строке среди информационных блоков системы GeologyScience.ru. Результаты поиска можно сохранить в личном кабинете для дальнейшего использования, или скачать на свой ПК (рис. 4).

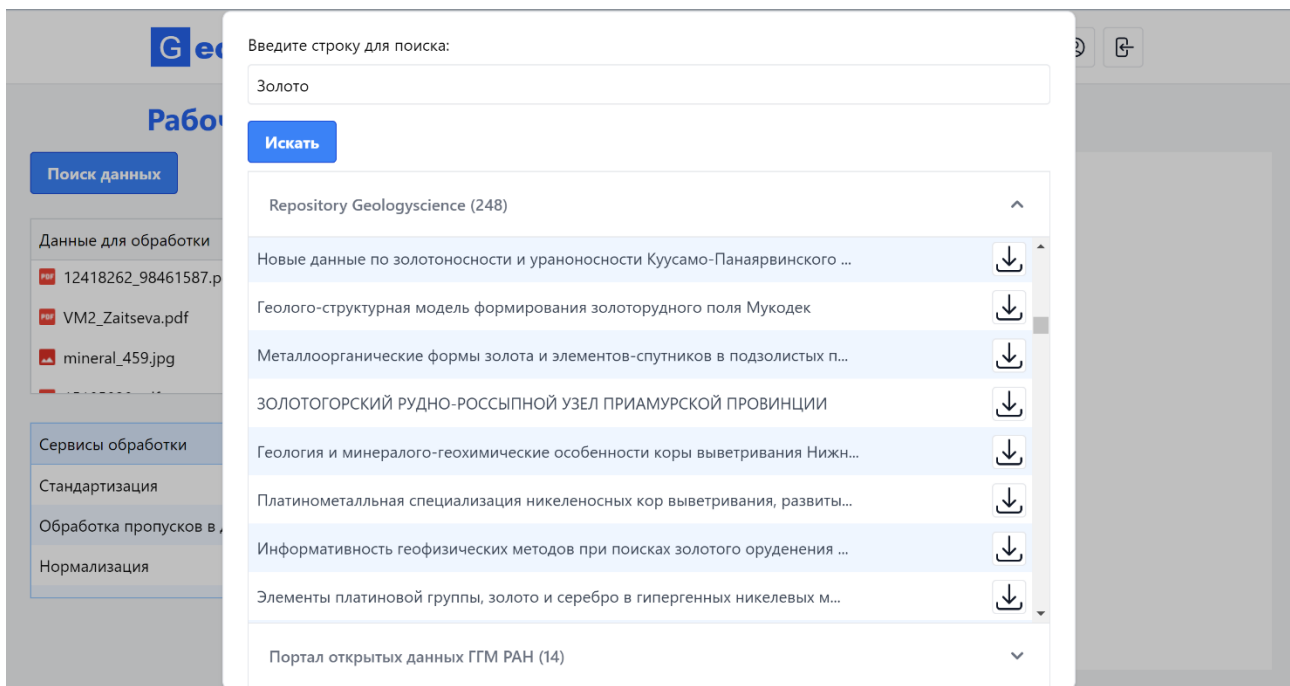


Рис. 4. Интерфейс поиска и получения геологических данных по заданной строке с использованием внешнего web-сервиса.

Для реализации микросервисов ядра платформы и плагинов используется фреймворк с открытым исходным кодом для Java-платформы Spring. Этот фреймворк широко применяется при создании современных web-приложений и сервисов. Каждый микросервис запускается в отдельном контейнере с использованием платформы контейнеризации приложений Docker. Для реализации web-интерфейса платформы используются JavaScript фреймворк Vue и CSS фреймворк Tailwind.

Заключение. Искусственный интеллект сегодня проникает во все сферы деятельности человека, в том числе и в научные исследования в геологии. Научное исследование включает в себя постановку задачи, сбор информации, выбор методов решения и анализ результатов. Это требует от облачных сервисов, инструментов поиска и обработки данных новых свойств и функций, возможности интеграции в виртуальное рабочее пространство исследователя, поддержки интерфейса на естественном языке для постановки и решения самых разнообразных задач: от поиска информации, предварительной обработки и анализа информации до моделирования, генерации карт и изображений, создания научных отчетов и набросков статей. В статье описан один из подходов к решению этой проблемы и приведено описание программной реализации предложенного подхода.

Благодарности. Работы выполняются в рамках Государственного задания ГГМ РАН по теме № 0140-2019-0005 «Разработка информационной среды интеграции данных естественно-научных музеев и сервисов их обработки для наук о Земле».

Список источников

1. Саенко А.А. Создание виртуального рабочего пространства / А.А. Саенко, В.С. Габов // Информационные технологии XXI века: сборник научных трудов. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет, 2023. – С. 168-171.
2. Ерёмченко В.С. Облачные технологии для развития территориально распределенной вычислительно-аналитической геологической среды / В.С. Ерёмченко, В.В. Наумова, А.А. Загуменнов, С.В. Булов // Вычислительные технологии, 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 86-98. – DOI:10.25743/ICT.2021.26.1.007.
3. Eremenko V.S., Naumova V.V. A multi-platform ecosystem for computing in Earth sciences. CEUR Workshop Proceedings, 2021, vol. 3006, p. 67-73.

4. Духанов А.В. Предметно-ориентированные технологии создания виртуальных рабочих пространств в среде облачных вычислений CLAVIRE / А.В. Духанов, Е.В. Болгова, Л.П. Гервич [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение, 2013. – Т. 56. – № 5. – С. 45-51.
5. Trello — облачная программа для управления проектами. – URL: <https://trello.com> (дата обращения: 12.10.2023).
6. Jira – платформа для управления проектами. – URL: <https://jira.atlassian.com> (дата обращения: 12.10.2023).
7. Miro – платформа для совместной работы распределенных команд. – URL: <https://miro.com> (дата обращения: 12.10.2023).
8. Notion – приложение для работы с информацией, её организации и использования. – URL: <https://www.notion.so> (дата обращения: 12.10.2023).
9. Yandex Tracker – система управления проектами. – URL: <https://cloud.yandex.ru/services/tracker> (дата обращения: 12.10.2023).
10. Google Docs – текстовый онлайн-процессор. – URL: <https://docs.google.com/document> (дата обращения: 12.10.2023).
11. Microsoft Office Online – онлайн-пакет офисных приложений. – URL: <https://www.office.com> (дата обращения: 12.10.2023).
12. Naumova V.V., Platonov K.A., Eremenko V.S., Dyakov S.E. Information and analytical environment to support scientific research in geology: current status and development perspectives. CEUR Workshop Proceedings, 2019, vol. 2527, pp. 36-41.
13. Eremenko V.S., Naumova V.V., Platonov K.A., Dyakov S.E., Eremenko A.S. The main components of a distributed computational and analytical environment for the scientific study of geological systems. Russian journal of earth sciences, 2018, vol. 18, iss. 6.
14. Патук М.И. Цифровой репозиторий "geologyscience.ru": открытый доступ к научным публикациям по геологии России / М.И. Патук, В.В. Наумова, В.С. Ерёменко // Электронные библиотеки, 2020. – 23(6). – С. 1324-1338.

Ерёменко Виталий Сергеевич. Младший научный сотрудник, Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского РАН, AuthorID: 984069, SPIN: 3939-5998, ORCID: 0000-0002-5250-5743, vitaer@gmail.com, Москва, Россия.

Наумова Вера Викторовна. Д.г.-м.н., г.н.с., зав. научным отделом Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН, AuthorID: 1968, SPIN: 3919-4475, ORCID: 0000-0002-3001-1638, nauмова_new@mail.ru, Москва, Россия.

Загумённых Алексей Андреевич. Младший научный сотрудник, Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, AuthorID: 641587, SPIN: 2196-4572, ORCID: 0000-0002-0501-5362, trueepikvic@gmail.com, Владивосток, Россия.

UDC 004.550

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.013

Development of virtual spaces with intelligent adaptive interface for digital geological systems

Vitaliy S. Eremenko¹, Vera V. Naumova¹, Alexey A. Zagumennov²

¹State Geological Museum named after Vladimir Vernadsky, Russia, Moscow, vitaer@gmail.com

²Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Russia, Vladivostok

Abstract. The paper is devoted to the development and subsequent software implementation of an approach to creating a virtual workspace with an intelligent adaptive interface. The paper discusses existing solutions for organizing virtual workspaces, formulates the basic requirements for a virtual workspace and proposes the structure of a software solution. A prototype of the software platform is demonstrated.

Keywords: virtual workspace, web service, software platform

Acknowledgements: The work is carried out within the framework of the State assignment of the SGM RAS on topic No. 0140-2019-0005 “Development of an information environment for integrating data from natural science museums and services for processing them for the Earth sciences”.

References

1. Saenko A.A., Gabov V.S. Sozdanie virtualnogo rabocheho prostranstva [Creation of a virtual workspace]. Informatsionnyye tekhnologii XXI veka: sbornik nauchnykh trudov [Information technologies of the XXI century: collection of scientific works]. Khabarovsk, Tikhookeanskiy gosudarstvennyy universitet [Pacific state university], 2023, pp. 168-171.
2. Eremenko V.S., Naumova V.V., Zagumennov A.A., Bulov S.V. Oblachnye tekhnologii dlja razvitiya territorialno raspredelennoj vychislitelno-analiticheskoy geologicheskoy sredy [Cloud technologies for development of geographically distributed computational and analytical Geological environment]. Vychislitel'nyye tekhnologii [Computational technologies], 2021, vol. 26, iss. 1, pp. 86-98.
3. Eremenko V.S., Naumova V.V. A multi-platform ecosystem for computing in Earth sciences. CEUR Workshop Proceedings, 2021, vol. 3006, p. 67-73.
4. Dukhanov A.V., Bolgova E.V., Gervich L.R. [et al.] Predmetno-orientirovannyye tekhnologii sozdaniya virtual'nykh rabochih prostranstv v srede oblachnykh vychislenij CLAVIRE [Subject-oriented technologies for creating virtual workspaces in the CLAVIRE cloud computing environment]. Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie [News of higher educational institutions. Instrumentation], 2013, vol. 56, no. 5, pp. 45-51.
5. Trello — a web-based, kanban-style, list-making application. — Available at: <https://trello.com> (accessed: 12/10/2023).
6. Jira — project management platform. — Available at: <https://jira.atlassian.com> (accessed: 12/10/2023).
7. Miro — platform for collaboration of distributed teams. — Available at: <https://miro.com> (accessed: 12/10/2023).
8. Notion — application for working with information, organizing and using it. — Available at: <https://www.notion.so> (accessed: 12/10/2023).
9. Yandex Tracker — project management system. — Available at: <https://cloud.yandex.ru/services/tracker> (accessed: 12/10/2023).
10. Google Docs — online word processor. — Available at: <https://docs.google.com/document> (accessed: 10/12/2023).
11. Microsoft Office Online — online office suite. — Available at: <https://www.office.com> (accessed: 10/12/2023).
12. Naumova V.V., Platonov K.A., Eremenko V.S., Dyakov S.E. Information and analytical environment to support scientific research in geology: current status and development perspectives. CEUR Workshop Proceedings, 2019, vol. 2527, pp. 36-41.
13. Eremenko V.S., Naumova V.V., Platonov K.A., Dyakov S.E., Eremenko A.S. The main components of a distributed computational and analytical environment for the scientific study of geological systems. Russian journal of earth sciences, 2018, vol. 18, iss. 6.
14. Patuk M.I., Naumova V.V., Eryomenko V.S. Cifrovoy repozitorij "geologyscience.ru": otkrytyj dostup k nauchnym publikacijam po geologii Rossii [Digital repository "geologyscience.ru": open access to scientific publications on russian geology]. Elektronnyye biblioteki [Electronic libraries], 2020, 23(6), pp.1324-1338.

Eremenko Vitaliy Sergeevich. Junior researcher of SGM scientific department, Vernadsky state geological museum RAS, AuthorID: 984069, SPIN: 3939-5998, ORCID: 0000-0002-5250-5743, vitaer@gmail.com, Moscow, Russia.

Naumova Vera Viktorovna. Prof., head of SGM scientific department, Vernadsky state geological museum RAS, AuthorID: 1968, SPIN: 3919-4475, ORCID: 0000-0002-3001-1638, naumova_new@mail.ru, Moscow, Russia.

Zagumennov Alexey Andreevich. Junior researcher of Institute of automatic and control processes of FEB RAS, AuthorID: 641587, SPIN: 2196-4572, ORCID: 0000-0002-0501-5362, truepikvic@gmail.com, Vladivostok, Russia.

Статья поступила в редакцию 16.10.2023; одобрена после рецензирования 03.03.2024; принята к публикации 13.03.2024.

The article was submitted 10/16/2023; approved after reviewing 03/03/2024; accepted for publication 03/13/2024.

УДК 004.89

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.014

Применение методов географического информационного поиска для анализа новостных данных

Авдюшина Анна Евгеньевна, Королёва Юлия Александровна, Маркина Татьяна Анатольевна, Бессмертный Игорь Александрович

Университет ИТМО РФ, Санкт-Петербург, avdiushina@itmo.ru

Аннотация. Статья посвящена выделению неформальных районов на основе данных из новостных источников и социальных сетей по критерию географической близости. Предложена методика извлечения геоданных из текстов для пространственной кластеризации. Из текстов извлекаются географические названия, которые преобразуются в геолокации с помощью геокодирования. Выделенные геоточки кластеризуются по плотности и для каждого кластера определяется распределение тем. Данный подход позволяет абстрагироваться от административного деления и выявить кластеры, близкие к восприятию горожан. Результаты кластеризации перспективно применять в разнообразных задачах управления городской инфраструктурой: мониторинг общественной жизни, анализ качества городской среды, общественная безопасность. Отличие предложенной методики от аналогов состоит в синтезе геоданных для группировки объектов. Разработанные на основе методики программные средства позволяют принимать решения в области урбанистики: развитие микрорайонов города и транспортной инфраструктуры, размещение социально значимых объектов и обеспечение безопасности.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных, умный город, информационная модель, системы поддержки принятия решений, кластеризация, геопространственные данные.

Цитирование: Авдюшина А.Е. Применение методов географического информационного поиска для анализа новостных данных / А.Е. Авдюшина, Ю.А. Королёва, Т.А. Маркина, И.А. Бессмертный // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 154-165. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.014.

Введение. Объем данных, публикуемых каждый день, неуклонно растет, для преобразования его в полезную информацию требуются эффективные методы анализа неструктурированной информации. Анализ городских новостных данных из различных информационных источников является актуальной задачей для понимания происходящих процессов и перспектив развития умного города.

Предварительное исследование показало, что существуют работы по извлечению геолокации из данных социальных сетей, только в том случае, если пользователь отметил геолокацию явно. Так же существует отдельное направление по анализу и извлечению информации из текстов, но нет работ, описывающих алгоритм (конвейер) извлечения геоданных из непривязанных текстовых данных явно, и дальнейшее разбиение на кластеры, соответствующие выделенным темам.

Для достижения поставленной цели перспективно использование методов из двух, на первый взгляд не связанных, научных направлений. Обработка естественного языка (NLP – Natural Language Processing) является дисциплиной на стыке лингвистики, компьютерных наук и искусственного интеллекта, направленной на анализ и понимание человеческого языка с помощью алгоритмов. Наука о географической информации (GIScience) изучает методы сбора, анализа и визуализации геопространственных данных. Хотя NLP и GIScience являются различными направлениями, их комплексное использование позволяет связать анализ текстовых данных с географическим контекстом. При этом NLP помогает извлекать информацию из текста, а GIScience – интерпретировать и визуализировать географическое расположение этой информации.

В данной работе предлагается метод определения тематического образа местности. Обработка данных даёт возможность получить список агрегированных тем, показывающий полное распределение тем по областям, определяет контекст происходящего в отдельных

частях города, а именно, какие темы и события наиболее характерны для различных частей города, которые не привязаны к административному делению.

1. Обзор существующих подходов к выделению тем и кластеризации городских данных. Городские данные являются разновидностью геопространственных данных, включают в себя информацию о местоположении объектов и явлений в городском пространстве, представленную обычно через географические координаты. Они предоставляют уникальную возможность для анализа и понимания городских процессов, позволяя идентифицировать и визуализировать пространственные взаимосвязи и динамику городской среды. Этот вид данных объединяет информацию о событиях и их местоположении, что критически важно для градостроительного планирования, управления городскими ресурсами и разработки стратегий улучшения качества жизни в городах.

Существующее административное деление регионов или районов не всегда совпадает с реальным делением. Нахождение такого представления регионов можно составить на основе характеристик ключевых признаков, отличающих один регион от другого, и формирующих их уникальность. Описание подобного представления городской среды можно сделать с помощью ментальных карт [1], которые включают в себя социокультурный анализ и проведение проектных сессий.

Использование ГИС позволяет отображать активность и особенности территории. Однако, данный подход ограничен тем, что объем данных, публикуемых каждый день, неуклонно растет. Преобразование такого огромного объема информации в знания, особенно касающиеся местоположения и контекста территорий, требует эффективных методов анализа неструктурированной информации, выделения границ неформальных районов.

В рамках интеллектуального анализа текста тематическое моделирование, в частности, скрытое распределение Дирихле (LDA – Latent Dirichlet Allocation), представляет собой мощный метод обнаружения и анализа абстрактных тем в коллекции текстовых документов [2, 3]. Тематическое моделирование используется в разных областях исследований – от анализа социальных сетей до геоинформационного поиска.

Количество информации в социальных сетях растет экспоненциально, а также информации о географических местах становится всё больше, именно такие данные могут стать источником новых возможностей исследования. Одним из важных направлений является развитие интеллектуальных систем поддержки принятия решений, где анализ геотегированных данных позволяет определить популярные места и интересы пользователей [3]. Дополнительное применение тематического моделирования с использованием LDA, pLSA (probabilistic Latent Semantic Analysis) и ml-PLSI (вероятностная тематическая модель) позволяет обнаруживать городские события, включая стихийные бедствия, а также классифицировать многозначные текстовые документы с использованием вероятностного подхода [4]. Отслеживание изменений тем во времени позволяет отслеживать тенденции в обществе, строить онтологии с помощью систем семантического моделирования и связывать непространственные концептуальные иерархии с онтологией места, основанной на семантике классификации для создания интегрированной меры семантической близости, которую можно использовать для ранжирования релевантности извлеченных объектов, или моделировать поведение и реакцию городских жителей [5, 6]. Иерархическая мера расстояния сочетается с евклидовым расстоянием между центроидами мест для создания гибридной меры пространственного расстояния. Это может объединить данные из социальных сетей, часто содержащих хэштеги, ключевые слова, классифицирующие темы, поэтому тематическое моделирование с кластеризацией хэштегов [7] становится многообещающим методом анализа коротких текстов.

Следует отметить, что для решения задач географического информационного поиска активно используется подход коллаборативного обучения, основанного на временной, географической и социальной информации для поиска географической информации с использованием социальных сетей, Интернета и баз геоданных [8, 9].

Исследования, включающие кластеризацию геопространственных данных с применением плотностных и адаптивных алгоритмов, используются для анализа новостных данных с учетом географического контекста, в социальных исследованиях, интеллектуальном анализе текста и в геоинформационных системах. Плотностные методы кластеризации текстовых данных с учетом местоположения улучшают классифицирование и анализ новостных данных за счёт определения объектов, семантически близких друг к другу [10-12]. Важной областью исследований является анализ аварий и прогнозирование. Исследование [13] представляет адаптивный метод анализа аварий и кластеризации с использованием географических данных, что имеет большое значение для обеспечения безопасности и предотвращения несчастных случаев.

В статье [14] используется подход, основанный на географическом тематическом моделировании данных из социальных сетей с пространственным контекстом. Методика включает анализ текстовой информации из социальных сетей, обогащенной географическими тегами, для выявления и визуализации тематических и пространственных закономерностей. Это позволяет исследователям лучше понимать социокультурные явления в различных географических регионах, а также способствует более эффективному мониторингу и анализу общественных настроений и трендов в реальном времени. Однако, основным недостатком подхода является использование исключительно геотегированных постов, что приводит к потере значительного количества семантики текстов и создает сложности с обогащением данных при использовании нескольких источников. Это ограничивает анализ, делая его менее гибким для более широкого исследования, например, для определения точек интереса за пределами прямо геотегированных упоминаний.

2. Методология. В основе данной разработки лежит идея о восприятии городской среды через яркие литературные тексты или цитаты. Для составления такого образа необходимо построить конвейер, концептуальная схема которого представлена на рисунке 1.

Данная диаграмма описывает методологию, а для практического применения необходимо определить этапы конвейера. В качестве источника данных использованы новостные статьи и социальные сети. После сбора данных из выбранных источников и их предобработки следует этап извлечения именованных сущностей. На описанных этапах применялись методы NLP. На последних этапах конвейера реализуется геокодирование именованных сущностей, пространственная кластеризация и анализ распределения тем внутри каждого геокластера с использованием методов GIScience. Конечная цель – сформировать актуальное распределение тем, которое освещается официальными источниками и отображает реальную кластеризацию районов города.

2.1. Сбор данных. Исходные данные для данного исследования были получены с использованием двух основных методов: веб-краулинга новостного сайта «Фонтанка» и подключения к социальной сети "ВКонтакте" с помощью API (Application programming interface). Эти данные включают в себя заголовки новостей, тексты статей и информацию о местоположении событий. Информация собиралась с целью создания набора данных, который позволит исследовать события, происходящие в различных районах и территориях. Для хранения, обновления и обработки информации создана база данных под управлением СУБД PostgreSQL.

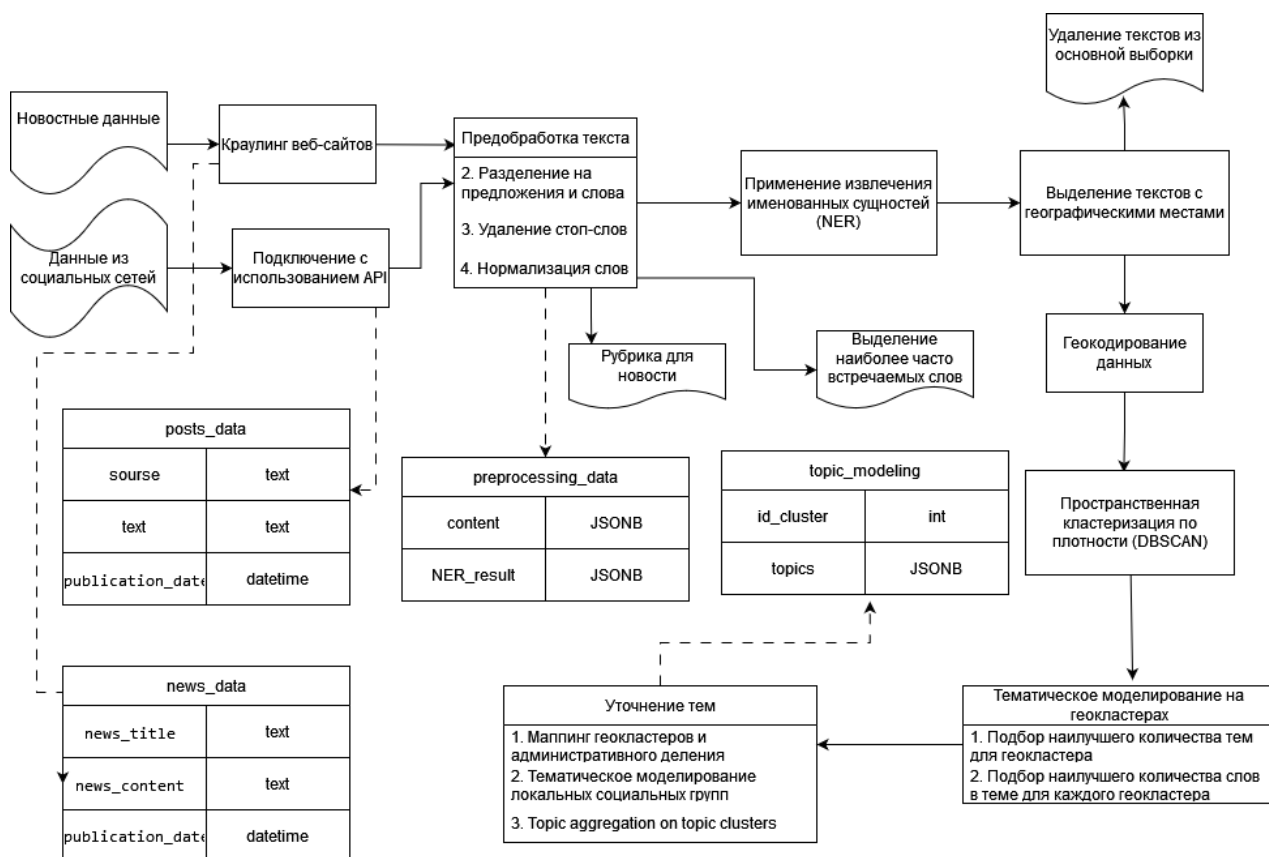


Рис. 1. Концептуальная диаграмма для обнаружения распределения тем по геоклстерам

2.1.1. Веб-краулинг новостного сайта. Для сбора новостных данных использовался веб-краулинг, что позволило извлечь информацию с новостного сайта. Веб-краулинг – это метод сбора информации с веб-ресурсов, при котором агент автоматически переходит по страницам сайта, извлекая необходимую информацию, такую, как заголовки новостей, текст статей, даты публикации и географические координаты, если они доступны. Собранная информация была сохранена в базе данных PostgreSQL для дальнейшего анализа.

2.1.2. Подключение к социальной сети "ВКонтакте" по API. Для получения данных из социальной сети "ВКонтакте", был использован API данной платформы. API "ВКонтакте" предоставляет доступ к различным группам и сообществам и позволяет извлекать данные постов и комментарии пользователей. Также разработан инструмент для дополнения в созданную базу данных этой информации в потоковом режиме.

2.1.3. Объединение данных и удаление дублирующихся новостей. После сбора данных из двух источников, информация была объединена в одной базе данных для дальнейшей обработки. Объединение позволило снизить трудозатраты на анализ и вероятность ошибок.

При объединении данных также проведена процедура удаления дублирующихся новостей, которые могли возникнуть из-за перекрытия информации между новостным сайтом и социальной сетью. Были применены алгоритмы сравнения и удаления дубликатов, что позволило уменьшить избыточность данных и улучшило качество исходных данных для последующего анализа.

2.2. Предобработка текста. На этом этапе происходило удаление лишних символов, преобразование текста в нижний регистр, а также удаление стоп-слов, которые не несут смысловой нагрузки. Такая предобработка позволяет сделать текст более структурированным и готовым для дальнейшего анализа.

Для предобработки текстовых данных применены разные библиотеки языка Python, которые добавлены в этапы конвейера. В рамках исследования использованы следующие методы и инструменты:

- 1. Сегментация текста и морфологический анализ:** с помощью сегментатора и морфологического словаря *Natasha* текст был разбит на отдельные слова, а также проведен морфологический анализ. Это позволило определить части речи и грамматические характеристики слов.
- 2. Морфологическая разметка:** для детального морфологического анализа текста применялся инструмент *SpaCy*, из которого применялись функции лемматизации и определение частей речи.
- 3. Синтаксический анализ:** Для изучения структуры предложений и связей между словами использовался *Stanford NLP Parser*, который определяет синтаксические зависимости для каждого предложения.

Описанный этап предобработки необходим для формирования понимания исходных данных, проведения разведывательного анализа данных.

2.3. Извлечение именованных сущностей (NER – Named Entity Recognition). Для выявления именованных сущностей, включая названия организаций, географические местоположения, использовался инструмент *Natasha*, при этом выделялись такие типы сущностей, как наименования организаций, географические наименования, а также координаты. На данном этапе определялись тексты для дальнейшего использования. Тексты, в которых не получилось выявить именованную сущность, вероятнее всего, не представляют ценности. Использование NER может быть улучшено путём дообучения модели с использованием топонимов.

2.4. Геокодирование данных. Извлеченные именованные сущности, связанные с местоположением, преобразовывались в географические координаты с помощью геокодирования, это является важным этапом для анализа геопространственной информации. Использована библиотека *yandex_geocoder*, предоставляющая возможность обращения к геокодированию с использованием API. Так как не все географические наименования и названия организаций могут быть преобразованы в координаты, поэтому на этом этапе формируется основная выборка (словарь) для дальнейшей работы, но также остаётся подвыборка с неопределёнными местоположениями. Таким образом, геокодирование позволяет преобразовать текстовые локации в географические координаты, что делает возможным дальнейший анализ и визуализацию данных. Для сохранения данных с географическими координатами используется расширение *PostgreSQL – PostGIS*.

2.5. Пространственная кластеризация. Следующим этапом является геопространственная кластеризация геокодированных данных с использованием алгоритма *DBSCAN* [15]. Данный метод позволяет группировать географические точки в кластеры на основе плотности расположения объектов. Это помогает выделить географические области, в которых события близки друг к другу. Результатом пространственной кластеризации является набор геокластеров, обозначаемых как C .

2.6. Анализ распределения тем внутри каждого кластера с использованием LDA. Для каждого из геокластеров, обозначаемых как C_i в наборе C , происходит извлечение текстовых данных, связанных с событиями внутри кластера (новости и посты из социальных сетей). Затем применяется модель *LDA* для анализа распределения тем внутри каждого кластера. *LDA* позволяет определить, какие темы наиболее характерны для текстовых данных в каждом кластере. Например, это позволяет определить, какие события и темы наиболее

актуальны в определенных районах. Модель базируется на вероятностном распределении слов по темам и может быть представлена следующим образом [2]:

$$P(\theta|\alpha) = \text{Dir}(\theta|\alpha) = \frac{\Gamma\left(\sum_{k=1}^K \alpha_k\right)}{\prod_{k=1}^K \Gamma(\alpha_k)} \prod_{k=1}^K \theta_k^{\alpha_k - 1}, \quad (1)$$

где

- θ – распределение Дирихле на темы внутри кластера;
- α – вектор гиперпараметров Дирихле для распределения тем внутри кластера;
- K – количество тем в модели LDA.

Таким образом, результатом этого этапа является набор распределений тем θ , каждое из которых соответствует одному из геокластеров в S .

3. Результаты. В результате сбора данных сформирован датасет, включающий в себя 20 тысяч записей (15 тысяч постов и комментариев из «ВКонтакте» и 5 тысяч новостей сайта «Фонтанка»). После предварительной обработки, включающей удаление неинформативных элементов, таких, как ссылки, специальные символы и стоп-слова, а также лемматизацию, объем данных был сокращен примерно на 15%, составив 17 тысяч текстов. Размер каждого текста составляет от 10 до 1600 символов.

На рисунке 2 представлена карта города Санкт-Петербурга, на которой отмечены точки, соответствующие географическим координатам новостей и постов. Каждая точка на карте представляет собой местоположение, связанное с определенным текстом. Так как тесты определялись по схожести и для того, чтобы избежать дублирования, к каждой точке привязаны от 1 до 5 текстов. Тексты сравнивались с использованием косинусной меры в рамках одного дня публикации для определения схожих и объединения их в один. Рисунок 2 демонстрирует пространственное распределение данных, что позволяет визуально оценить, какие районы города наиболее активны с точки зрения информационных событий.

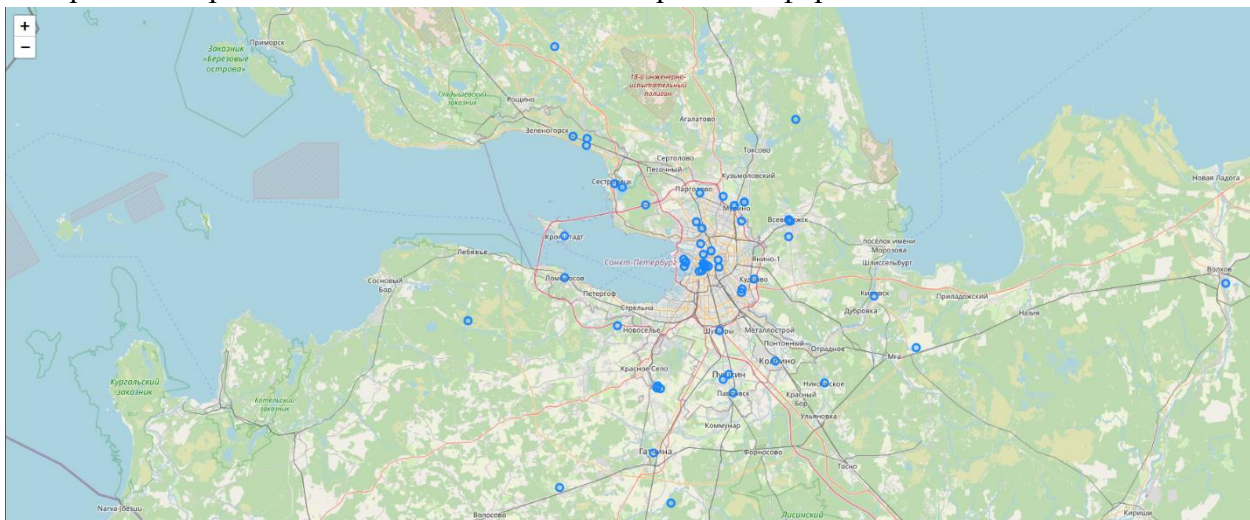


Рис. 2. Карта Санкт-Петербурга с нанесёнными точками координат новостей и постов

Для кластеризации и тематического моделирования использовались методы DBSCAN и LDA соответственно, где количество кластеров и тем определялось на основе анализа метрик качества (коэффициент силуэта для кластеризации и коэффициент когерентности для тематического моделирования).

Коэффициент силуэта [15] является инструментом для оценки качества кластеризации и определения степени схожести объектов внутри кластеров. Значение силуэта позволяет судить о том, насколько хорошо объекты внутри кластера схожи между собой и насколько четко разделяются кластеры.

Формула для вычисления коэффициента силуэта имеет следующий вид:

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (2)$$

где

$S(i)$ – силуэтный коэффициент для объекта i ;

$a(i)$ – среднее расстояние между объектом i и всеми другими объектами в том же кластере;

$b(i)$ – наименьшее среднее расстояние между объектом i и объектами в кластере, к которому i не принадлежит.

Для проведения моделирования и максимизации коэффициента силуэта проводились эксперименты с различным количеством кластеров (5-15 кластеров) и различным минимальным количеством точек к одному кластеру (5-20). Максимальное значение, которое получилось достичь, равно 0,63 при следующих параметрах: количество кластеров, равное 15 с параметрами $\varepsilon = 0.5$ и $\text{MinPts} = 5$, что свидетельствует о достаточной степени схожести объектов внутри кластеров и хорошем разделении кластеров. Общее значение силуэта оценивает, насколько хорошо объекты были сгруппированы в кластеры, а в контексте данного исследования это означает, что тексты внутри каждого кластера имеют достаточное семантическое сходство, в то время как тексты из разных кластеров значительно отличаются друг от друга. Такой уровень кластеризации является весьма приемлемым для анализа городских данных, подчеркивая эффективность выбранных методов для выделения информативных и географически релевантных паттернов в больших объемах текстовой информации. Это значение силуэта возможно улучшить путем обогащения данных. Интеграция дополнительных источников информации позволит сделать кластеризацию более точной: увеличить объем кластеров и более полно исследовать тематический контент и географические данные.

Когерентность для тем в модели LDA в данном исследовании вычислялась с использованием меры C_V когерентности [3]. Эта мера оценивает степень семантической связности слов в теме на основе их совместной встречаемости в текстах. Когерентность C_V для темы T может быть определена как:

$$C_V(T) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \text{score}(w_i, w_j)}{N(N-1)/2}, \quad (3)$$

где

M – количество топ-слов в теме;

N – количество слов, для которых вычисляется когерентность;

w_i и w_j – слова в теме;

$\text{score}(w_i, w_j)$ – мера семантической связности между парами слов, часто основанная на их совместной встречаемости или других статистических данных из корпуса.

Алгоритм вычисления когерентности включает выбор топ- N слов из каждой темы, вычисление score для каждой пары слов в этом наборе, и усреднение этих значений для

получения общей меры когерентности для темы. Затем среднее значение когерентности по всем темам используется для оценки качества модели LDA в целом.

Для проведения расчетов использовались различные параметры: количество тем варьировалось от 10 до 20, а количество слов – от 5 до 10. После моделирования с использованием меры C_V для оценки когерентности максимальное значение получилось 0,55, где было выявлено 10 наиболее выраженных тем, а каждая тема включает 6 слов.

В таблице 1 представлена информация о кластерах, их географических координатах (долгота и широта), и связанных с ними темах. Каждая строка таблицы соответствует отдельному кластеру, который имеет свой уникальный идентификатор (ID CLUSTER). Наименованием кластера (NAME) является именованная сущность, которая была выделена из текста, а координаты (LON и LAT) – являются результатом геокодирования. Темы, связанные с каждым кластером, отражают ключевые слова или концепции, выявленные в данных, связанных с этим кластером. В таблице собраны необходимые данные для более подробного анализа результатов кластеризации, что, в свою очередь, также помогает понять, какие темы преобладают в разных географических областях.

Таблица 1. Распределение тем по геокластерам

	NAME	LON	LAT	ID CLUSTER	TOPIC
0	Южный Всеволожск	30.648415	59.990431	19	пожар, ремонт, цены
1	Ленинградская область	29.608975	59.337017	13	суд, завод, празднования
2	Колтушское шоссе	30.647885	60.023717	19	штраф, авария, отдел
3	Ленобласть	29.608975	59.337017	13	эксперт, фестиваль
4	Мурино	30.438578	60.051284	21	происшествия, движение, квартира, пострадавший, мигрант, новый
...	
12	Тосненский район	31.017569	59.372039	9	авария, следователи
13	Петербург	30.315644	59.938955	5	почта, концерт, мчс, парковка, эрмитаж
14	Василеостровский район	30.248045	59.941430	5	рабочий, бизнес, тариф, ДТП
15	Шушары	30.379523	59.807224	22	ремонт, долг, новый, метро

На рисунке 3 представлена карта, на которой отмечены кластеры, выделенные с использованием алгоритма. Кластеры представлены разными цветами и обозначают группировку точек схожих координат. Этот рисунок помогает визуализировать результаты кластеризации и выделить географические области, в которых события схожи или связаны между собой. Каждый кластер на рисунке 3 соответствует кластеру из таблицы 1.

В результате проведенного исследования разработан полноценный конвейер обработки данных, начиная со сбора информации из новостных ресурсов и завершая анализом распределения тем внутри географических кластеров. Применение разработанной методологии позволило получить тематический контекст по геокластерам на основе текстовых данных, полученных из новостных и социальных медийных источников. Визуализация тематического контекста выявила области на карте города, которые отображают восприятие жителями неформальных районов.

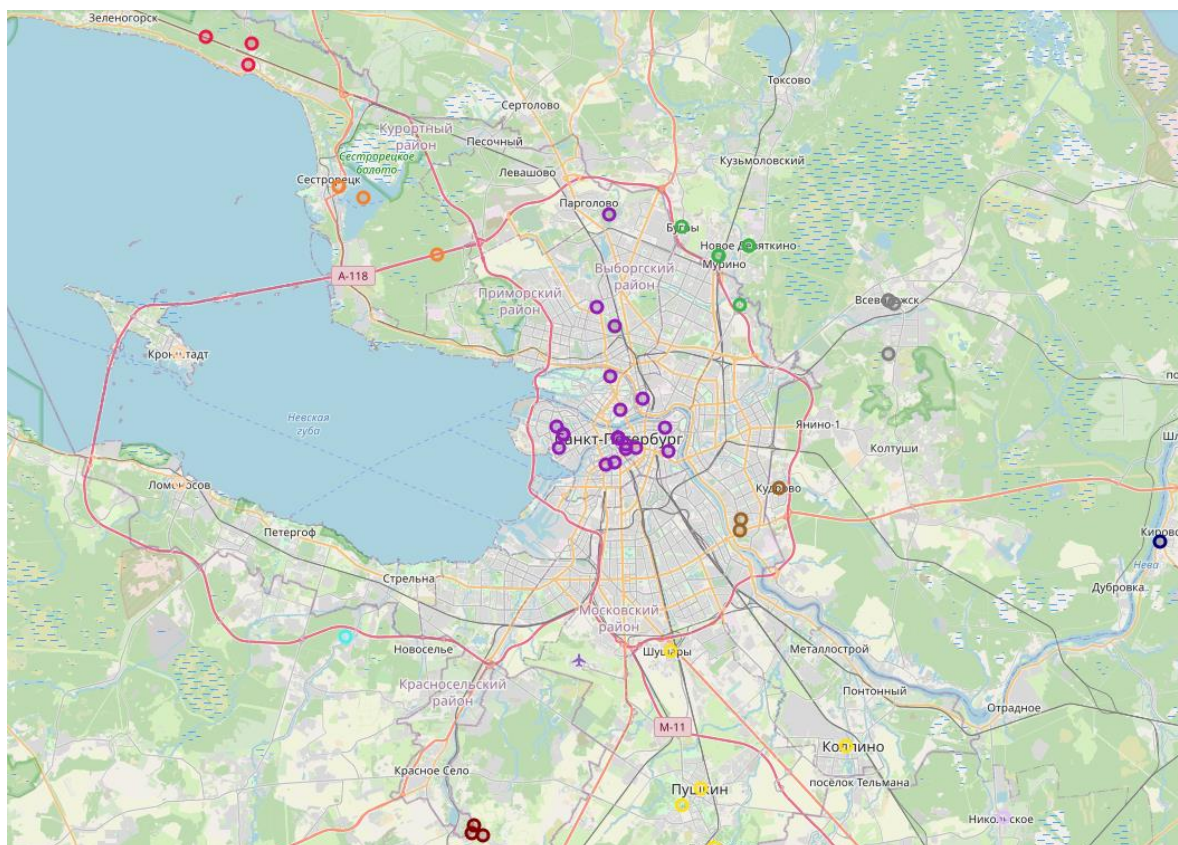


Рис. 3. Разделение географических точек на кластеры

Заключение. Таким образом, разработана методология анализа тематического контента на геокластерах, основанная на данных из социальных сетей и новостных источников. Представленный подход с учетом обобщенности и модульности позволяет применить его к различным источникам неструктурируемых текстовых данных. Использование методов геокодирования и кластеризации целесообразно применять для территорий, где нет возможности получить административное деление или необходимо более точное и локальное исследование.

В работе продемонстрировано, что этапы агрегирования и сегментации могут успешно выделить темы в географически разбросанных данных. Полученные агрегированные темы могут быть использованы для поиска по ключевым словам и позволяют интерпретировать информацию, содержащуюся в данных. Это открывает возможности для создания рекомендательных систем, обнаружения интересов пользователей и анализа настроений сообщений.

В дальнейших исследованиях планируется расширить подход, добавив анализ настроений, что позволит определить характер новостей и текстов и, как следствие, создать более точный портрет районов, рекомендации для пользователей относительно мест и событий. Кроме того, метод будет протестирован на анализе рекламных сообщений, с целью создания тематического рекламного образа города. Текстовые посты в социальных сетях и новостные данные представляют собой богатый источник информации, который, после агрегирования и кластеризации, помогает выявить интересы пользователей и предоставить им соответствующие рекомендации и рекламу.

Полученные результаты полезны для градостроителей, руководства города и органов местного самоуправления, так как они могут служить основой системы поддержки принятия решений в условиях неопределенности для развития городской инфраструктуры, планирования мероприятий и оптимизации городских служб. Анализ пространственной

организации информации позволяет лучше понимать динамику событий и взаимосвязи между различными районами города.

Данная методология имеет широкий спектр практических применений, начиная от анализа пользовательских интересов в социальных сетях и заканчивая созданием интеллектуальных систем рекомендаций и анализа общественного мнения в различных сферах.

Список источников

1. Вампилова Л.Б. Регионы и города России: Атлас ментальных карт / Л.Б. Вампилова, В.Н. Калущков, И.И. Митин, В.М. Матасов // Русское географическое общество. Электронное (сетевое) научное издание, 2018. – 130 с. – ISBN 978-5-600-02139-6.
2. Rüdiger M, Antons D, Joshi A.M, Salge T-O. Topic modeling revisited: New evidence on algorithm performance and quality metrics. PLoS ONE, 2022, no. 17(4), DOI:10.1371/journal.pone.0266325.
3. Jelodar H., Wang Y., Yuan C. [et al.]. Latent Dirichlet allocation (LDA) and topic modeling: models, applications, a survey. Multimedia Tools and Applications, 2019, no. 78, pp. 15169-15211, DOI:10.1007/s11042-018-6894-4.
4. Bodrunova S.S. Topic modeling in Russia: current approaches and issues in methodology. The Palgrave handbook of digital Russia studies. Palgrave Macmillan, Cham, 2020, pp. 409-426, DOI:10.1007/978-3-030-42855-6_23.
5. Карпович С.Н. Многозначная классификация текстовых документов с использованием вероятностного тематического моделирования ml-PLSI / С.Н. Карпович // Труды СПИИРАН. – СПб.: СПб ФИЦ РАН, 2016. – Вып. 47(4). – С. 92–104. – URL: <http://proceedings.spiiran.nw.ru/index.php/sp/article/view/3359/1942> (дата обращения: 25.10.2023).
6. Jones C.B., Alani H., Tudhope D. Geographical information retrieval with ontologies of place. In: Montello, D.R. (eds) Spatial Information Theory. COSIT 2001. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, vol. 2205. pp 322-335, DOI:10.1007/3-540-45424-1_22.
7. Тен Л.В. Тематическое моделирование в задаче автоматической рубрикации новостных текстов / Л.В. Тен // Terra Linguistica, 2023. – Т.14. – №2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tematicheskoe-modelirovanie-v-zadache-avtomaticheskoy-rubrikatsii-novostnyh-tekstov> (дата обращения: 25.10.2023).
8. Wu X., Fang L., Wang P. [et al.]. Performance of using LDA for Chinese news text classification. 2015 IEEE 28th Canadian conference on electrical and computer engineering (CCECE), Halifax, NS, Canada, 2015, pp. 1260-1264, DOI:10.1109/CCECE.2015.7129459.
9. Mata-Rivera F., Torres-Ruiz M., Guzmán G. [et al.] A collaborative learning approach for geographic information retrieval based on social networks. Computers in Human Behavior, 2015, vol. 51(B), pp. 829–842, DOI:10.1016/j.chb.2014.11.069.
10. Nguyen M.D., Shin W.Y. an improved density-based approach to spatio-textual clustering on social media. IEEE Access 7, 2019, pp. 27217-27230, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2896934.
11. Jiang B., Ma D., Yin J. [et al.] Spatial distribution of city tweets and their densities. Urban remote sensing: monitoring, synthesis, and modeling in the urban environment, second edition, 2021, pp. 115-129, DOI:10.1002/9781119625865.ch6_
12. Hu Y. Geo-text data and data-driven geospatial semantics. Geography Compass, 2018, DOI:10.1111/gec3.12404.
13. Dadwal R., Funke T., Demidova E. An adaptive clustering approach for accident prediction. IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Indianapolis, IN, USA, 2021, pp. 1405-1411, DOI:10.1109/ITSC48978.2021.9564564.
14. Funkner A.A., Elkhovskaya L.O., Lenivtceva I.D. [et al.] Geographical topic modelling on spatial social network data // Procedia computer science, 2021, Vol. 193, pp. 22-31, DOI:10.1016/j.procs.2021.10.003.
15. Sander J., Ester M., Kriegel H-P, Xiaowei Xu. Density-Based clustering in spatial databases: The algorithm GDBSCAN and its applications. Data mining and knowledge discovery, Berlin. Springer-Verlag, 1998, vol. 2, iss. 2, pp. 169-194, DOI:10.1023/A:1009745219419

Авдюшина Анна Евгеньевна. Аспирант, факультет программной инженерии и компьютерной техники университет ИТМО, AuthorID: 57221719751, ORCID: 0000-0002-8235-902X, avdiushina@itmo.ru, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект 49.

Королева Юлия Александровна. Доцент, к.т.н., факультет программной инженерии и компьютерной техники университета ИТМО, ORCID: 0000-0003-1462-1599, jakoroleva@itmo.ru, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр 49.

Маркина Татьяна Анатольевна. Доцент, к.т.н., факультет программной инженерии и компьютерной техники университета ИТМО, ORCID: 0009-0009-9146-433X, markina_t@itmo.ru, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр 49.

Бессмертный Игорь Александрович. Профессор, д.т.н. факультет программной инженерии и компьютерной техники университета ИТМО, AuthorID: 36661767800, ORCID: 0000-0001-6711-6399, bessmertny@itmo.ru, 197101, Россия, Санкт-Петербург, Кронверкский пр 49.

UDC 004.89

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.014

Application of geographic information retrieval methods to analyze new's data

Anna E. Avdiushina, Yulia A. Koroleva, Tatyana A. Markina, Igor A. Bessmertny

ITMO University, Russia, St. Petersburg, avdiushina@itmo.ru

Abstract. The article focuses on identifying informal urban areas based on data from news sources and social networks, utilizing geographical proximity as a criterion. A methodology for extracting geodata from texts for spatial clustering is proposed. Geographic names extracted from texts are transformed into geolocations through geocoding. The identified geopoints are then clustered by density, and a distribution of themes is determined for each cluster. This approach allows for an abstraction from administrative divisions to reveal clusters that are closer to the citizens' perception. The clustering results are promising for application in various urban infrastructure management tasks: monitoring public life, analyzing the quality of the urban environment, and public safety. The distinction of the proposed methodology lies in the synthesis of geodata for grouping objects. The software tools developed based on this methodology enable decision-making in the field of urban planning, including the development of city districts and transport infrastructure, the placement of socially significant objects, and ensuring safety.

Keywords: data mining, smart city, information model, decision support systems, clustering, geospatial data

References

1. Vampilova L.B., Kalutskov V.N., Mitin I.I., Matasov V.M. Regions and cities of Russia: An atlas of mental maps. Russian geographical society. Elektronnoye (setevoye) nauchnoye izdaniye [Electronic (online) scientific publication], 2018, 130 p., ISBN 978-5-600-02139-6.
2. Rüdiger M, Antons D, Joshi A.M, Salge T-O. Topic modeling revisited: New evidence on algorithm performance and quality metrics. PLoS ONE, 2022, no. 17(4), DOI:10.1371/journal.pone.0266325.
3. Jelodar H., Wang Y., Yuan C. [et al.]. Latent Dirichlet allocation (LDA) and topic modeling: models, applications, a survey. Multimedia Tools and Applications, 2019, no. 78, pp. 15169-15211, DOI:10.1007/s11042-018-6894-4.
4. Bodrunova S.S. Topic modeling in Russia: current approaches and issues in methodology. The Palgrave handbook of digital Russia studies. Palgrave Macmillan, Cham, 2020, pp. 409-426, DOI:10.1007/978-3-030-42855-6_23.
5. Karpovich S.N. Mnogoznachnaya klassifikaciya tekstov'x dokumentov s ispol'zovaniem veroyatnostnogo tematiceskogo modelirovaniya ml-PLSI [Multi-label classification of text documents using probabilistic topic model ml-PLSI]. SPIRAS Proceedings, 2016, iss. 4(47), pp. 92–104, available at: <http://proceedings.spiras.nw.ru/index.php/sp/article/view/3359/1942> (accessed: 10/20/2023).
6. Jones C.B., Alani H., Tudhope D. Geographical information retrieval with ontologies of place. In: Montello, D.R. (eds) Spatial information theory. COSIT 2001. Lecture notes in computer science, Springer, Berlin, Heidelberg, 2001, vol. 2205. pp 322-335, DOI:10.1007/3-540-45424-1_22.
7. Ten L.V. Tematiceskoe modelirovanie v zadache avtomaticheskoy rubrikacii novostny'x tekstov [Topic modeling in automatic categorization of news] Terra Linguistica, 2023, vol. 14, no. 2, DOI: 10.18721/JHSS.14207 (accessed: 10/25/2023).
8. Wu X., Fang L., Wang P. [et al.]. Performance of using LDA for Chinese news text classification. 2015 IEEE 28th Canadian conference on electrical and computer engineering (CCECE), Halifax, NS, Canada, 2015, pp. 1260-1264, DOI:10.1109/CCECE.2015.7129459 (accessed: 10/20/2023).
9. Mata-Rivera F., Torres-Ruiz M., Guzmán G. [et al.] A collaborative learning approach for geographic information retrieval based on social networks. Computers in Human Behavior, 2015, vol. 51(B), pp. 829-842, DOI:10.1016/j.chb.2014.11.069 (accessed: 10/20/2023).
10. Nguyen M.D., Shin W.Y. an improved density-based approach to spatio-textual clustering on social media. IEEE Access 7, 2019, pp. 27217-27230, DOI:10.1109/ACCESS.2019.2896934.

11. Jiang B., Ma D., Yin J. [et al.] Spatial distribution of city tweets and their densities. Urban remote sensing: monitoring, synthesis, and modeling in the urban environment, second edition, 2021, pp.115-129, DOI:10.1002/9781119625865.ch6.
12. Hu Y. Geo-text data and data-driven geospatial semantics. Geography compass, 2018, DOI:10.1111/gec3.12404.
13. Dadwal R., Funke T., Demidova E. An adaptive clustering approach for accident prediction. IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC), Indianapolis, IN, USA, 2021, pp. 1405-1411, DOI:10.1109/ITSC48978.2021.9564564.
14. Funkner A.A., Elkhovskaya L.O., Lenivtceva I.D. [et al.] Geographical topic modelling on spatial social network data // Procedia computer science, 2021, Vol. 193, pp. 22-31, DOI:10.1016/j.procs.2021.10.003.
15. Sander J., Ester M., Kriegel H-P, Xiaowei Xu. Density-Based clustering in spatial databases: The algorithm GDBSCAN and its applications. Data mining and knowledge discovery, Berlin. Springer-Verlag, 1998, vol. 2, iss. 2, pp. 169-194, DOI:10.1023/A:1009745219419.

Avdyushina Anna Evgenievna. Postgraduate student, Faculty of Software Engineering and Computer Technology, ITMO University, AuthorID: 57221719751, ORCID: 0000-0002-8235-902X, avdiushina@itmo.ru, 197101, St. Petersburg, Kronverksky Prospekt 49.

Koroleva Yulia Alexandrovna. Associate professor, Ph.D., faculty of software engineering and computer technology, ITMO University, ORCID: 0000-0003-1462-1599, jakoroleva@itmo.ru, 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky Ave 49.

Markina Tatyana Anatolyevna. Associate professor, Ph.D., faculty of software engineering and computer technology, ITMO University, ORCID: 0009-0009-9146-433X, markina_t@itmo.ru, 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky Ave 49.

Bessmertny Igor Alexandrovich. Professor, doctor of technical sciences faculty of software engineering and computer technology, ITMO University, AuthorID: 36661767800, ORCID: 0000-0001-6711-6399, bessmertny@itmo.ru, 197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky Ave 49.

Статья поступила в редакцию 01.11.2023; одобрена после рецензирования 04.03.2024; принята к публикации 13.03.2024.

The article was submitted 11/01/2023; approved after reviewing 03/04/2024; accepted for publication 03/13/2024.

УДК 004.422.81

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.015

Разработка модулей каталогизации и визуализации данных в системе аграрного мониторинга

Пушкарев Александр Александрович¹, Кузнецова Анна Сергеевна¹, Кадочников Алексей Анатольевич², Ерунова Марина Геннадьевна¹, Якубайлик Олег Эдуардович²

¹Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН», Россия, Красноярск, flash550@yandex.ru

²Институт вычислительного моделирования СО РАН, Россия, Красноярск

Аннотация. В статье рассматриваются модули, отвечающие за каталогизацию и визуализацию данных в системе аграрного мониторинга ФИЦ КНЦ СО РАН. Представлены особенности программной реализации этих модулей, диаграммы взаимодействия компонентов, а также основные возможности пользовательского интерфейса системы.

Ключевые слова: аграрный мониторинг, веб-ГИС, визуализация данных, javascript, typescript, react, openlayers

Цитирование: Пушкарев А.А. Разработка модулей каталогизации и визуализации данных в системе аграрного мониторинга / А.А. Пушкарев, А.С. Кузнецова, А.А. Кадочников, М.Г. Ерунова, О.Э. Якубайлик // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2024. – № 1(33). – С. 166-173. – DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.015.

Введение. В настоящее время аграрный сектор является одним из ключевых направлений экономики многих стран. Однако, для его эффективного развития необходимо внедрять информационные технологии во многие производственные процессы. Системы аграрного мониторинга являются одним из основных инструментов, которые позволяют получать и анализировать данные о состоянии посевов, урожайности, погодных условиях и других факторах [1-4].

В мире существует множество аграрных систем, которые используются для мониторинга и управления аграрным сектором. Например, «OneSoil» (<https://onesoil.ai/>) – это онлайн-сервис для анализа посевов и урожайности на основе данных спутникового мониторинга. NASA «Worldview» (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) – это еще одна система, которая предоставляет доступ к данным спутникового мониторинга для анализа погодных условий и других факторов, влияющих на аграрный сектор. Кроме того, существуют также системы управления растениеводством, такие как «Agroptima» (<https://www.agroptima.com/>) и «AgroSense» (<https://www.agrosense.com/>), которые помогают фермерам управлять посевами и увеличивать урожайность.

Разработка региональной системы аграрного мониторинга для Красноярского края имеет высокую актуальность в связи с необходимостью повышения эффективности сельскохозяйственного производства и улучшения управления аграрным сектором региона [5]. Создание такой системы позволит оперативно отслеживать состояние почвы, растений, погодные условия и другие факторы, что способствует принятию обоснованных решений и оптимизации процессов в сельском хозяйстве. Научная новизна данного проекта заключается в применении передовых технологий в веб-разработке и построении геоинформационных систем (ГИС). В статье рассматриваются особенности программного построения модулей, отвечающих за функции каталогизации и визуализации данных в разделе «Карта» системы «АгроМониторинг» (<https://gis.krasn.ru/agro/>), разрабатываемой в ФИЦ КНЦ СО РАН [6].

1. Материалы и методы. Данные являются основой любой информационной системы. Именно они несут в себе ценность, а программное обеспечение необходимо для удобства работы с этими данными. Все данные, представленные в системе, делятся на 4 типа:

спутниковые снимки Sentinel-2 и Landsat 8/9 [7], снимки с БПЛА, тематические карты, компьютерные модели Global Forecast System (GFS) [8] и Global Precipitation Measurement (GPM) [9]. Каждый тип данных имеет свои особенности визуализации и внедрения в систему. На нижнем уровне все типы данных, кроме тематических карт, представляют из себя растровые изображения. Доступ к этим изображениям предоставляется при помощи различных программных интерфейсов (API). Тематические карты представляют собой проекты QGIS (<https://qgis.org/>), состоящие из векторных SHAPE-файлов. На рисунке 1 представлена схема взаимодействия основных компонентов системы.

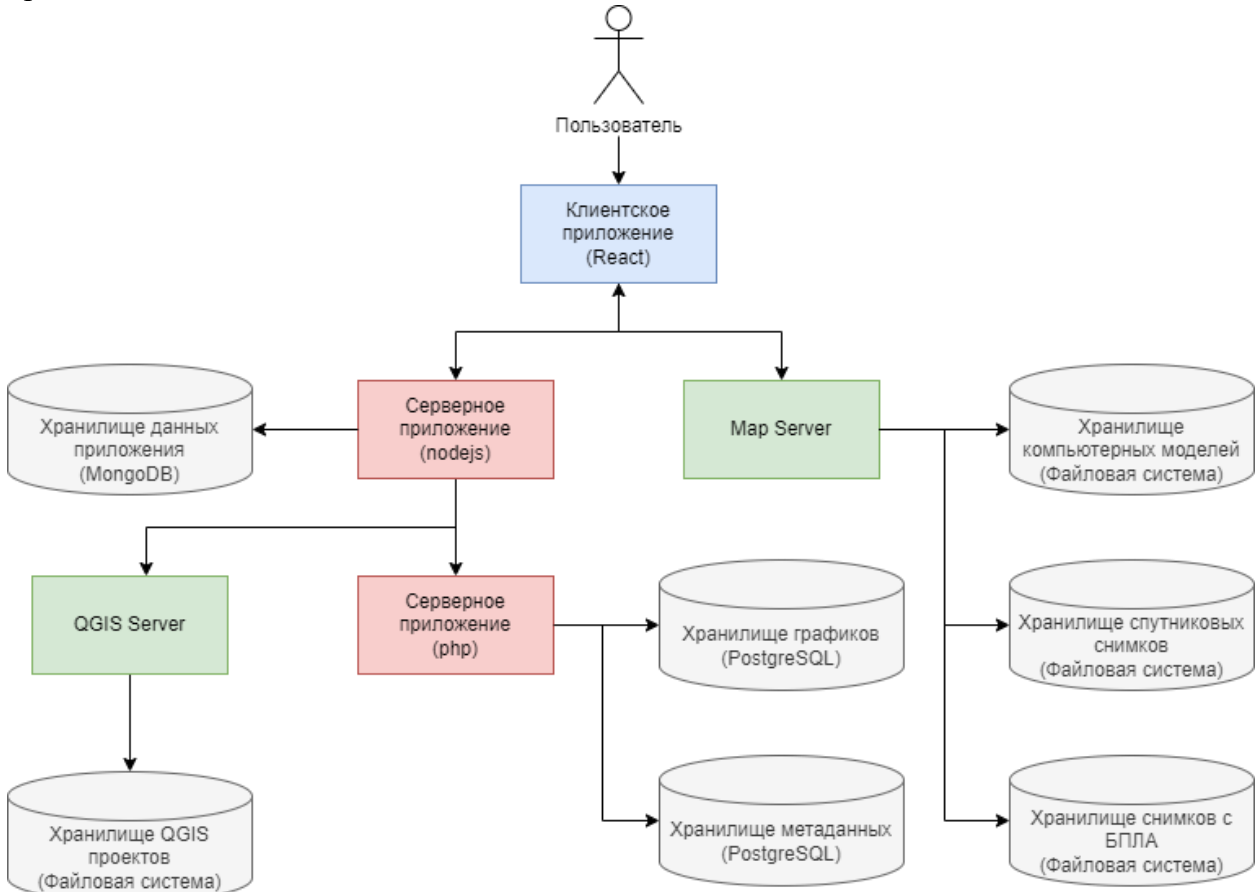


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов системы

Для визуализации растровых данных в веб-приложении необходимо организовать цепочку обработок, которая будет выполняться при добавлении клиентом данных на карту [10]. Все начинается с запроса клиента по протоколу HTTP, где он запрашивает определенный фрагмент изображения. Затем сервер должен обработать запрос, извлечь запрашиваемый фрагмент из исходного файла, преобразовать его в требуемый формат (JPEG или PNG) и отправить изображение в ответ по протоколу WMS. После этого изображение должно быть отображено на карте с учетом географической привязки. Существуют программные решения, позволяющие автоматизировать этот процесс. В данном случае серверная часть обработки выполняется Map Server (<https://mapserver.org/>), а за генерацию корректного запроса и визуализацию данных на карте отвечает JavaScript-библиотека OpenLayers (<https://openlayers.org/>). Проекты QGIS визуализируются аналогично, но серверную обработку выполняет QGIS Server, который преобразовывает векторные данные из проектов в изображения при каждом запросе и предоставляет их так же, как и растровые данные, по протоколу WMS.

В качестве базы данных используется MongoDB (<https://www.mongodb.com/>). Это NoSQL база данных, которая хранит сущности в формате JSON-объектов. Преимуществом

использования объектно-ориентированной базы данных в данном случае является простота реализации функциональности по выстраиванию определенной последовательности сущностей каталога. Так как все дочерние сущности хранятся в массиве, для изменения порядка элементов необходимо при обновлении родительской сущности передать массив с нужной последовательностью дочерних элементов. При использовании реляционных баз данных для решения данной задачи необходимо хранить позицию каждой сущности. В данном случае, когда один слой может находиться в нескольких группах, это может вызывать трудности при разработке данной функции.

Для удобной работы с библиотекой OpenLayers в React (<https://react.dev/>) были написаны компоненты «обертки» для каждого типа данных: вектор, растр и тайловые растры. Такой подход позволяет удобно работать с каждым отдельным слоем и изолировано обновлять параметры в зависимости от действий пользователя (прозрачность, очередность, раскраска и т.д.). На рисунке 2 представлена схема взаимодействия компонентов в модуле визуализации данных.

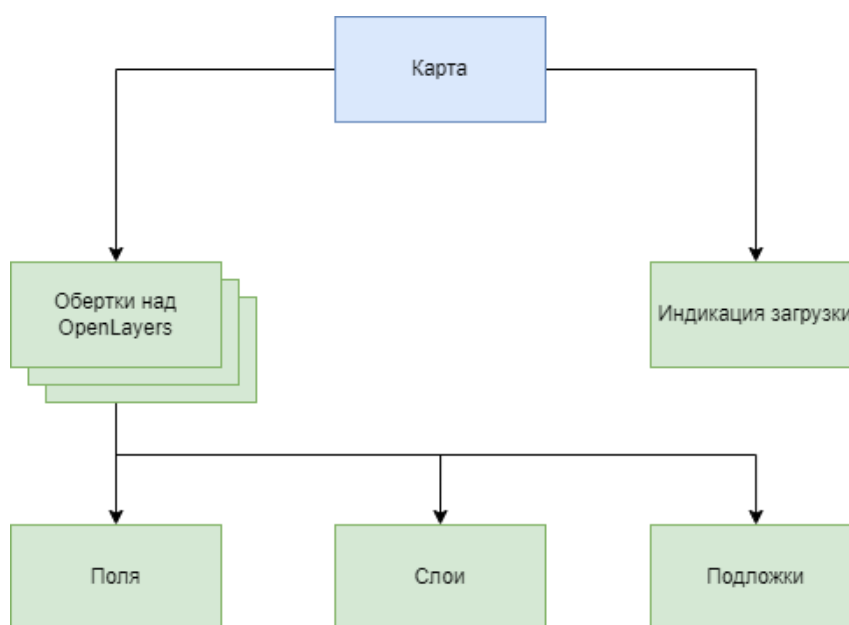


Рис. 2. Схема взаимодействия компонентов внутри модуля визуализации данных

Для визуализации вегетационных индексов (NDVI, GCI, VARI, SAVI, MSAVI2) [11] используется преобразование исходных значений пикселей в диапазон от 0 до 255, что образует градиент серого цвета, эти преобразования выполняет Map Server и отдает изображение по WMS, далее средствами библиотеки OpenLayers такое изображение раскрашивается в необходимую цветовую схему и визуализируется на карте. Такой подход позволяет использовать множество различных цветовых схем без необходимости генерировать дополнительные слои под каждую цветовую схему.

2. Основные результаты. В рамках исследования были разработаны модули каталогизации и визуализации данных, которые значительно улучшили процесс сбора, хранения и анализа информации о сельскохозяйственных угодьях в системе аграрного мониторинга. Эти модули предоставляют пользователям возможность оперативно получать доступ к актуальным данным и принимать обоснованные решения на основе достоверной информации. В этом разделе будут более подробно рассмотрены возможности разработанных модулей системы.

Каталог данных представляет из себя четырехуровневую систему, для удобного разделения данных по различным тематикам. Уровни расположены в следующей иерархии: вкладка – раздел – группа – слой. В системе предусмотрена возможность гибкой настройки

сущностей каждого уровня: выстраивание определённой последовательности сущностей внутри каждого уровня, добавление описания, изображений, ограничение доступа, перемещение сущностей в другую родительскую сущность. У администратора системы после авторизации появляются инструменты управления внутри самого каталога, что позволяет удобно настраивать внешний вид каталога для пользователей системы, а также наполнять каталог данными. На рисунке 3 изображен интерфейс каталога данных.

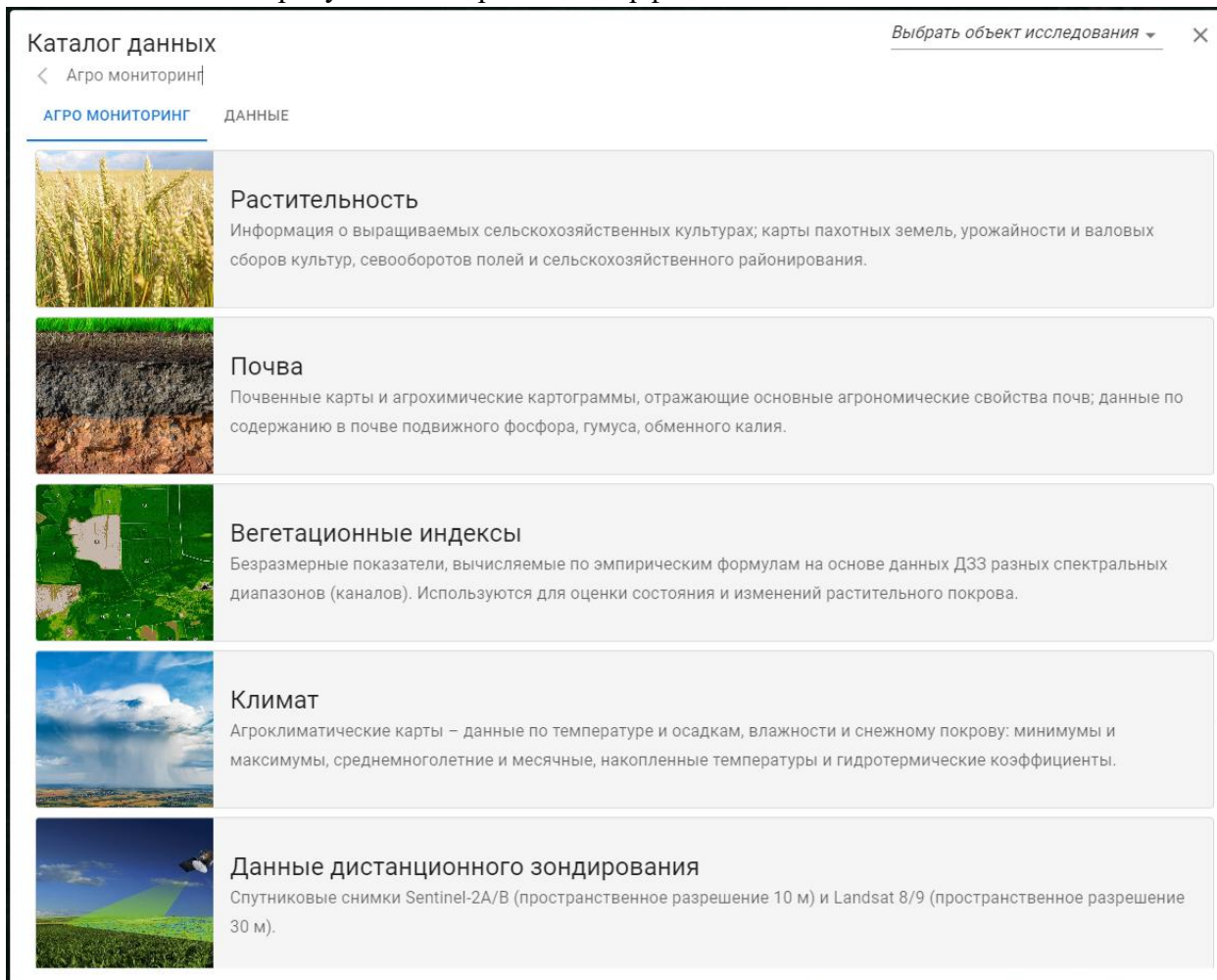


Рис. 3. Интерфейс каталога данных

Интерфейс рабочей области представляет из себя карту, занимающую большую часть экрана, на которой отображаются все слои, которые были добавлены из каталога, и боковую панель для манипуляций с данными. Боковая панель имеет две секции, каждая из которой может быть свернута. В первой секции располагается меню выбора области исследования, после нажатия на соответствующий пункт меню система фокусируется на выбранной области: карта приближается до границ этой области, в каталоге отображаются только те слои, которые доступны выбранной области, а также появляются дополнительные подробности про область исследования, например, контуры и номера полей.

Во второй секции бокового меню отображается список слоев, добавленных из каталога данных. Каждый элемент списка представляет из себя карточку слоя, содержащую название, легенду (при наличии) и элементы управления слоем. К элементам управления относятся: флажок переключения видимости слоя, кнопка отображения легенды, кнопка настроек слоя и кнопка удаления слоя с карты. При нажатии на кнопку настроек слоя открывается дополнительное окно, в котором можно более гибко настроить визуализацию слоя. Настройки, находящиеся в данном окне, отличаются в зависимости от типа данных слоя, так, например,

для спутниковых данных уникальна настройка облачности, которая позволяет выставить максимально допустимую облачность данных, отображаемых на шкале времени. Также в данном окне находится выбор цветовой схемы, выбор контрастности слоя и общая для всех слоев настройка прозрачности. Также возможно менять очередность отображения слоев, путем перетаскивания карточек слоя внутри списка (слои на карте отображаются согласно последовательности их в списке).

Так как большая часть данных представлена в виде временных рядов, в нижней части рабочей области располагается шкала времени, которая позволяет переключать активную дату. Шкала представляет из себя последовательность доступных дат для выбранных слоев. Если на одну дату доступно более одного слоя, то фон этой даты будет темнее в зависимости от количества доступных слоев, также при наведении отображается список слоев, доступных на эту дату. Помимо шкалы времени переключать активную дату можно также при помощи календаря, который имеет схожий дизайн доступных дат.

Из дополнительных функций можно также выделить переключение базовой подложки, состоящей из четырех слоев (подложка на основе спутниковых данных Sentinel, топооснова, светлый и темный рельеф). Также из элементов управления на карте присутствуют кнопки приближения и отдаления и рулетка для измерения расстояния и площади. На рисунке 4 представлен пользовательский интерфейс рабочей области приложения.

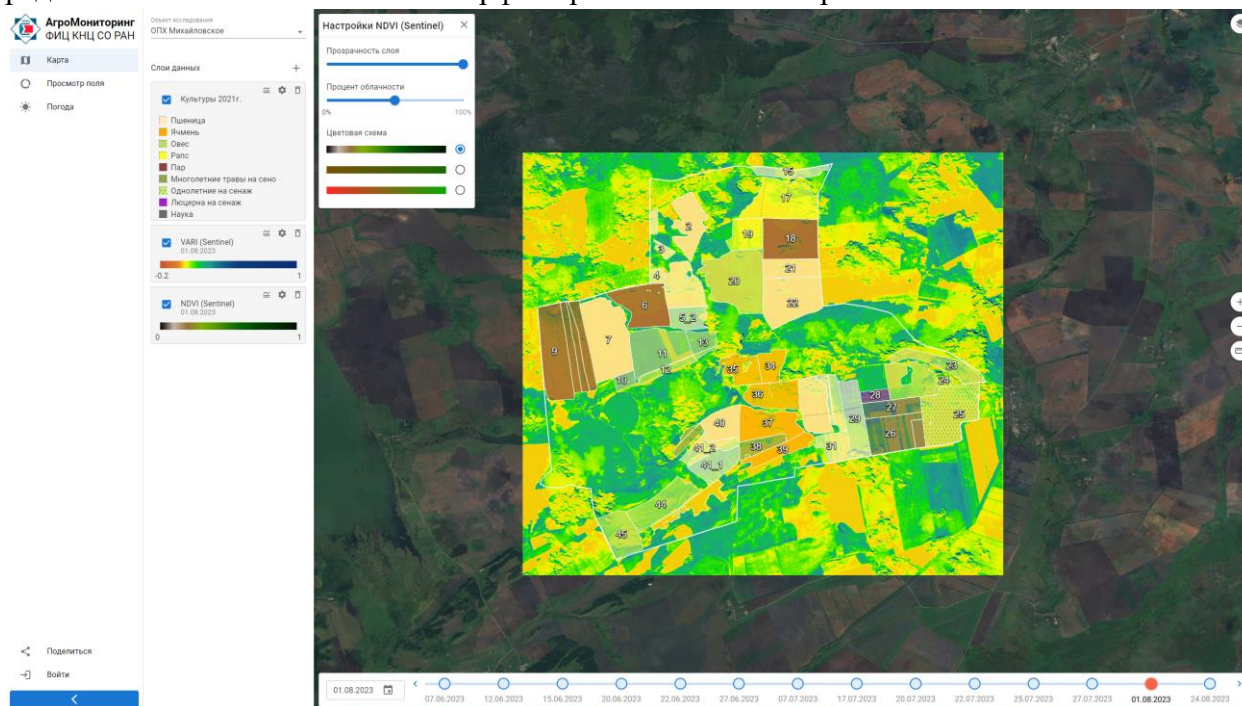


Рис. 4. Интерфейс приложения

Ещё одной немаловажной функцией системы является возможность сохранять и делиться текущим набором слоев, позицией на карте, активной датой и другим состоянием приложения. За хранение состояния приложения отвечает библиотека Zustand, которая предоставляет простой API для создания и управления состоянием приложения. Данная библиотека позволяет легко дублировать ключевые элементы состояния в SessionStorage за счет плагина Persist, благодаря этому при перезагрузке страницы приложение не теряет текущее состояние и полностью восстанавливается из данных, хранимых в SessionStorage. В то же время такая возможность позволяет легко сохранять в базе данных ту часть состояния, которая хранится в SessionStorage т.к. она не занимает много места и хранит в себе только идентификаторы активных сущностей приложения. При необходимости поделиться текущим состоянием приложения пользователю необходимо нажать на соответствующую кнопку на

боковой панели, после чего во всплывающем окне будет доступна ссылка, по которой любой, кто перейдет по данной ссылке, воссоздаст у себя такое же состояние приложения с поправкой на права доступа.

Заключение. Разрабатываемая система аграрного мониторинга («АгроМониторинг») является мощным инструментом для оценки состояния сельскохозяйственных территорий. Модуль каталогизации, рассмотренный в статье, позволяет пользователям системы удобно находить необходимые данные для дальнейшей аналитики, а модуль визуализации данных облегчает этот процесс, делая его доступным для пользователей системы. На данный момент описанные в статье модули полностью разработаны и внедрены в систему «АгроМониторинг» в раздел «Карта». В то же время разработка этой системы не стоит на месте, в ней регулярно появляются новые данные и функции, позволяющие улучшить пользовательский опыт применения системы «АгроМониторинг».

Список источников

1. Qingyu Feng, Dennis C. Flanagan, Bernard A. Engel, Lei Yang, Liding Chen. GeoAPEXOL, a web GIS interface for the agricultural policy environmental eXtender (APEX) model enabling both field and small watershed simulation. *Environmental Modelling & Software*, 2020, no. 123.
2. Mendas Abdelkader, Delali Amina Integration of multicriteria decision analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and electronics in agriculture*, 2012, no. 83, pp. 117-126.
3. Morteza Khazaei, Saeid Hamzeh, Najmeh Neysani Samani, Arnab Muhuri, Kalifa Goïta, Qihao Weng. A web-based system for satellite-based high-resolution global soil moisture maps. *Computers & Geosciences*, 2023, no. 170.
4. Kalliopi Avaniidou, Thomas Alexandridis, Dimitris Kavroudakos, Thanasis Kizos Development of a multi scale interactive web-GIS system to monitor farming practices: A case study in Lemnos Island, Greece. *Smart agricultural technology*, 2023, no. 5.
5. Ерунова М.Г. Геопространственная база данных цифровизации системы земледелия Красноярского края / М.Г. Ерунова, А.А. Шпедт, О.Э. Якубайлик, Ю.Н. Трубников // *Достижения науки и техники АПК*, 2019. – № 7. – Т. 33. – С 56-61.
6. Pushkarev A.A. Yakubailik O.E. A web application for visualization, analysis, and processing of agricultural monitoring spatial-temporal data. *CEUR workshop proceedings*, 2021, no. 3006, pp. 231-237.
7. Blickensdorfer L., Schwieder M., Pflugmacher D. et al. Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. *Remote sensing of environment*, 2022, vol. 269, p. 112831, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112831.
8. The global forecast system (GFS). Available at: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php.
9. Hou A.Y. et al. The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American meteorological society*, 2014, vol. 95, no. 5, pp. 701-722, DOI:10.1175/BAMS-13-00164.1.
10. Kadochnikov A.A. Software and technological support of geoinformation web system for the operative processing and visualization of satellite DATA. *CEUR workshop proceedings*, 2019, no. 2534, pp. 309-315.
11. Ботвич И.Ю. Оценка пространственного распределения урожайности ярового ячменя (Красноярский край) по наземным и спутниковым спектрофотометрическим данным / И.Ю. Ботвич, Д.В. Емельянов, А.А. Ларько, и др. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2019. – Т. 16. – № 5. – С. 183-193. – DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193.

Пушкарев Александр Александрович. Младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», AuthorID: 1019386, SPIN: 5344-5762, ORCID: 0009-0000-5790-966X, flash550@yandex.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50.

Кузнецова Анна Сергеевна. Младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», AuthorID: 1123552, SPIN: 4915-3961, ORCID: 0000-0002-8351-7536, anna.simakina.97@mail.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50.

Кадочников Алексей Анатольевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», AuthorID: 150608, SPIN: 6283-2922, ORCID: 0000-0003-0965-3609, scorant@ict.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50.

Ерунова Марина Геннадьевна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН», AuthorID: 116643, SPIN: 5424-1229, ORCID: 0000-0002-1922-1036, marina.erunova@gmail.com, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50.

Якубайлик Олег Эдуардович. Кандидат физико-математических наук, зам. директора по научной работе Института вычислительного моделирования СО РАН, AuthorID: 99904, SPIN: 7820-4178, ORCID: 0000-0002-2668-4776, oleg@icm.krasn.ru, Россия, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 44.

UDC 004.422.81

DOI:10.25729/ESI.2024.33.1.015

Development of cataloging and data visualization modules for the agrarian monitoring system

Alexander A. Pushkarev¹, Anna S. Kuznetsova¹, Alexey A. Kadochnikov², Marina G. Erunova¹, Oleg E. Yakubailik²

¹Federal Research Center Krasnoyarsk Science Center of the SB RAS, Russia, Krasnoyarsk, flash550@yandex.ru

²Institute of Computational Modelling SB RAS, Russia, Krasnoyarsk

Abstract. The article discusses the modules responsible for cataloging and visualizing data in the agricultural monitoring system of the Federal Research Center KSC SB RAS. Features of the software implementation of these modules, component interaction diagrams, as well as the main capabilities of the system user interface are presented.

Keywords: agricultural monitoring, web GIS, data visualization, javascript, typescript, react, openlayers

References

1. Qingyu Feng, Dennis C. Flanagan, Bernard A. Engel, Lei Yang, Liding Chen. GeoAPEXOL, a web GIS interface for the agricultural policy environmental eXtender (APEX) model enabling both field and small watershed simulation. *Environmental Modelling & Software*, 2020, no. 123.
2. Mendas Abdelkader, Delali Amina Integration of multicriteria decision analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. *Computers and electronics in agriculture*, 2012, no. 83, pp. 117-126.
3. Morteza Khazaei, Saeid Hamzeh, Najmeh Neysani Samani, Arnab Muhuri, Kalifa Goïta, Qihao Weng. A web-based system for satellite-based high-resolution global soil moisture maps. *Computers & Geosciences*, 2023, no. 170.
4. Kalliopi Avaniidou, Thomas Alexandridis, Dimitris Kavroudakos, Thanasis Kizos Development of a multi scale interactive web-GIS system to monitor farming practices: A case study in Lemnos Island, Greece. *Smart agricultural technology*, 2023, no. 5.
5. Erunova M.G., Shpedt A.A., Yakubailik O.E., Trubnikov Yu.N. Geoprostranstvennaya baza dannykh tsifrovizatsii sistemy zemledeliya Krasnoyarskogo kraya [Geospatial database for digitization of the agriculture system in the Krasnoyarsk krai]. *Dostizheniya nauki i tekhniki AP [Achievements of Science and Technology of AICis]*, 2019, no. 7, Vol. 33, С 56-61.
6. Pushkarev A.A. Yakubailik O.E. A web application for visualization, analysis, and processing of agricultural monitoring spatial-temporal data. *CEUR workshop proceedings*, 2021, no. 3006, pp. 231-237.
7. Blickensdörfer L., Schwieder M., Pflugmacher D. et al. Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. *Remote sensing of environment*, 2022, vol. 269, p. 112831, DOI: 10.1016/j.rse.2021.112831.
8. The global forecast system (GFS). Available at: https://www.emc.ncep.noaa.gov/emc/pages/numerical_forecast_systems/gfs.php.
9. Hou A.Y. et al. The global precipitation measurement mission. *Bulletin of the American meteorological society*, 2014, vol. 95, no. 5, pp. 701-722, DOI:10.1175/BAMSD-13-00164.1.
10. Kadochnikov A.A. Software and technological support of geoinformation web system for the operative processing and visualization of satellite DATA. *CEUR workshop proceedings*, 2019, no. 2534, pp. 309-315.

11. Botvich I.Y., Emelyanov D.V., Larko A.A., Malchikov N.O., Ivchenko V.K., Demyanenko T.N. Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya urozhaynosti yarovogo yachmenya (Krasnoyarskiy kray) po nazemnym i sputnikovym spektrofotometricheskim dannym [Assessment of the spatial distribution of spring barley yield (Krasnoyarsk Territory) based on ground-based and satellite spectrophotometric data]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2019, Vol. 16, no. 5, pp. 183–193, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-183-193.

Pushkarev Alexander Aleksandrovich. Junior researcher, federal research center Krasnoyarsk science center SB RAS, AuthorID: 1019386, SPIN: 5344-5762, ORCID: 0009-0000-5790-966X, flash550@yandex.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50.

Kuznetsova Anna Sergeevna. Junior researcher, federal research center Krasnoyarsk science center SB RAS, AuthorID: 1123552, SPIN: 4915-3961, ORCID: 0000-0002-8351-7536, anna.simakina.97@mail.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50.

Kadochnikov Alexey Anatolyevich. Candidate of technical sciences, senior researcher federal research center Krasnoyarsk science center SB RAS, AuthorID: 150608, SPIN: 6283-2922, ORCID: 0000-0003-0965-3609, scorant@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50.

Erunova Marina Gennadievna. Candidate of technical sciences, senior researcher federal research center Krasnoyarsk science center SB RAS, AuthorID: 116643, SPIN: 5424-1229, ORCID: 0000-0002-1922-1036, marina.erunova@gmail.com, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50.

Yakubailik Oleg Eduardovich. Candidate of physico-mathematical sciences, deputy director for scientific work, institute of computational modeling SB RAS, AuthorID: 99904, SPIN: 7820-4178, ORCID: 0000-0002-2668-4776, oleg@icm.krasn.ru, Russia, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50, building 44.

Статья поступила в редакцию 23.10.2023; одобрена после рецензирования 20.02.2024; принята к публикации 05.03.2024.

The article was submitted 10/23/2023; approved after reviewing 02/20/2024; accepted for publication 03/05/2024.

