

ISSN 2305-9052 (Print)
ISSN 2410-7034 (Online)

ВЕСТНИК



ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

BULLETIN

OF THE SOUTH URAL
STATE UNIVERSITY

СЕРИЯ

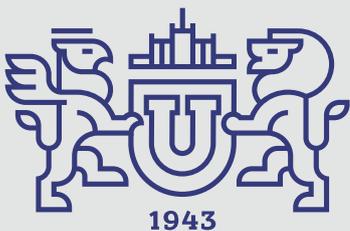
**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
МАТЕМАТИКА
И ИНФОРМАТИКА**

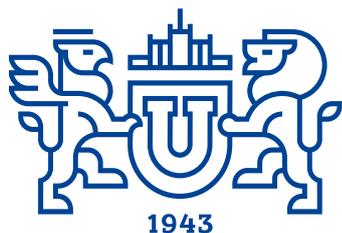
2025, том 14, № 1

SERIES

**COMPUTATIONAL
MATHEMATICS
AND SOFTWARE ENGINEERING**

2025, volume 14, no. 1





ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

2025
Т. 14, № 1

ISSN 2305-9052

СЕРИЯ

«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА»

Решением ВАК включен в Перечень научных изданий,
в которых должны быть опубликованы результаты диссертаций
на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук

Учредитель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

Тематика журнала:

- Вычислительная математика и численные методы
- Математическое программирование
- Распознавание образов
- Вычислительные методы линейной алгебры
- Решение обратных и некорректно поставленных задач
- Доказательные вычисления
- Численное решение дифференциальных и интегральных уравнений
- Исследование операций
- Теория игр
- Теория аппроксимации
- Информатика
- Искусственный интеллект и машинное обучение
- Системное программирование
- Перспективные многопроцессорные архитектуры
- Облачные вычисления
- Технология программирования
- Машинная графика
- Интернет-технологии
- Системы электронного обучения
- Технологии обработки баз данных и знаний
- Интеллектуальный анализ данных

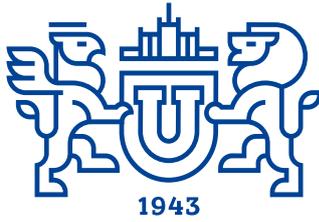
Редакционная коллегия

Л.Б. Соколинский, д.ф.-м.н., проф., *гл. редактор*
М.Л. Цымблер, д.ф.-м.н., доц., *зам. гл. редактора*
Я.А. Краева, к.ф.-м.н., *отв. секретарь*
А.И. Гоглачев, *техн. редактор*

Редакционный совет

С.М. Абдуллаев, д.г.н., профессор
А. Андреяк, PhD, профессор (Германия)
В.И. Бердышев, д.ф.-м.н., акад. РАН, *председатель*
В.В. Воеводин, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН

Дж. Донгарра, PhD, профессор (США)
С.В. Зыкин, д.т.н., профессор
И.М. Куликов, д.ф.-м.н.
Д. Маллманн, PhD, профессор (Германия)
А.В. Панюков, д.ф.-м.н., профессор
Р. Продан, PhD, профессор (Австрия)
Г.И. Радченко, к.ф.-м.н., доцент (Австрия)
В.Н. Ушаков, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН
М.Ю. Хачай, д.ф.-м.н., чл.-кор. РАН
А. Черных, PhD, профессор (Мексика)
П. Шумяцкий, PhD, профессор (Бразилия)



BULLETIN

OF THE SOUTH URAL STATE UNIVERSITY 2025
vol. 14, no. 1

SERIES

“COMPUTATIONAL
MATHEMATICS AND SOFTWARE
ENGINEERING”

ISSN 2305-9052

Vestnik Yuzhno-Ural'skogo Gosudarstvennogo Universiteta.
Seriya “Vychislitel'naya Matematika i Informatika”

South Ural State University

The scope of the journal:

- Numerical analysis and methods
- Mathematical optimization
- Pattern recognition
- Numerical methods of linear algebra
- Reverse and ill-posed problems solution
- Computer-assisted proofs
- Numerical solutions of differential and integral equations
- Operations research
- Game theory
- Approximation theory
- Computer science
- Artificial intelligence and machine learning
- System software
- Advanced multiprocessor architectures
- Cloud computing
- Software engineering
- Computer graphics
- Internet technologies
- E-learning
- Database processing
- Data mining

Editorial Board

L.B. Sokolinsky, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
M.L. Zymbler, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
Ya.A. Kraeva, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
A.I. Goglavchev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)

Editorial Council

S.M. Abdullaev, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
A. Andrzejak, Heidelberg University (Germany)
V.I. Berdyshev, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAS (Yekaterinburg, Russia)
J. Dongarra, University of Tennessee (USA)
M.Yu. Khachay, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAS (Yekaterinburg, Russia)
I.M. Kulikov, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of RAS (Novosibirsk, Russia)
D. Mallmann, Julich Supercomputing Centre (Germany)
A.V. Panyukov, South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)
R. Prodan, Alpen-Adria-Universität Klagenfurt (Austria)
G.I. Radchenko, Silicon Austria Labs (Graz, Austria)
P. Shumyatsky, University of Brasilia (Brazil)
A. Tchernykh, CICESE Research Center (Mexico)
V.N. Ushakov, Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of the RAS (Yekaterinburg, Russia)
V.V. Voevodin, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)
S.V. Zykin, Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the RAS (Omsk, Russia)

Содержание

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА БИНОКУЛЯРНОГО ФАСЕТОЧНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА И РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА НА ПЛОСКОСТИ К.Н. Белов, Э.А. Бибикова, И.В. Булдашев, Н.Д. Кундикова, Ю.В. Мухин, А.Н. Николаев, А.В. Портнов, Я.М. Ридный, Л.Б. Соколинский, А.Е. Старков, А.А. Шульгинов	5
ИНТЕГРАЦИЯ В РЕЛЯЦИОННУЮ СУБД СРЕДСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОПУСКОВ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ А.А. Юртин	30
КАМПУС МЕЖДУНАРОДНОГО УРОВНЯ: СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ИМПЛЕМЕНТАЦИИ ИНКЛЮЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКАДЕМИЧЕСКУЮ СРЕДУ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ Н.И. Шумакова, Е.В. Титова	47
ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОСИСТЕМА МЕЖУНИВЕРСИТЕТСКОГО КАМПУСА МИРОВОГО УРОВНЯ: УПРАВЛЕНЧЕСКИЙ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ АСПЕКТЫ Н.С. Конева, А.А. Суханова	63

Contents

INTELLIGENT BINOCULAR COMPOUND EYE VISION SYSTEM FOR DETECTING AZIMUTH AND DISTANCE TO OBJECT ON PLANE K.N. Belov, E.A. Bibikova, I.V. Buldashev, N.D. Kundikova, Y.V. Mukhin, A.N. Nikolaev, A.V. Portnov, Y.M. Ridnyi, L.B. Sokolinsky, A.E. Starkov, A.A. Shulginov	5
INTEGRATION OF MISSING DATA IMPUTATION TOOLS FOR TIME SERIES IN REAL-TIME MODE INTO A RELATIONAL DBMS A.A. Yurtin	30
INTERNATIONAL LEVEL CAMPUS: CREATING COMPLEX DIGITAL PLATFORMS FOR IMPLEMENTATION OF INCLUSIVE PROCESSES IN THE ACADEMIC ENVIRONMENT AND BEYOND N.I. Shumakova, E.V. Titova	47
INNOVATION ECOSYSTEM OF A WORLD-CLASS INTER-UNIVERSITY CAMPUS: MANAGEMENT AND EDUCATIONAL ASPECTS N.S. Koneva, A.A. Sukhanova	63



This issue is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА БИНОКУЛЯРНОГО ФАСЕТОЧНОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА И РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА НА ПЛОСКОСТИ

© 2025 К.Н. Белов¹, Э.А. Бибикина^{1,2}, И.В. Булдашев¹, Н.Д. Кундикова^{1,2},
Ю.В. Мухин^{1,2}, А.Н. Николаев¹, А.В. Портнов¹, Я.М. Ридный¹,
Л.Б. Соколинский¹, А.Е. Старков¹, А.А. Шульгинов¹

¹Южно-Уральский государственный университет
(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76),

²Институт электрофизики УрО РАН
(620016 Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 106)

E-mail: belovkn@susu.ru, bibikovaea@susu.ru, buldashviv@susu.ru, kundikovand@susu.ru,
mukhinyv@susu.ru, nikolaevan@susu.ru, portnovav@susu.ru, imridnyi@susu.ru,
leonid.sokolinsky@susu.ru, starkovae@susu.ru, shulginovaa@susu.ru

Поступила в редакцию: 10.03.2025

Статья посвящена прототипу системы искусственного бинокулярного зрения для определения азимута и расстояния до объекта на плоскости с использованием искусственной нейронной сети. Дается критический обзор современных систем определения расстояния и азимута на основе активных и пассивных сенсоров. Предлагается интеллектуальная система бинокулярного зрения, представляющая собой пассивный оптический датчик, позволяющий определять азимут и расстояние до круглого объекта произвольного размера, излучающего в видимом или инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. Рассматривается общая архитектура системы фасеточного зрения. Основными структурными элементами системы являются: оптический модуль, аппаратно-программный контроллер и нейросетевой модуль. Оптический модуль с помощью пары объективов преобразует световой сигнал от объекта в два пиксельных Фурье-изображения, которые поступают на вход аппаратно-программного контроллера. Контроллер выполняет первичную обработку пиксельных Фурье-изображений и преобразует их в две битовые маски, элементы которых соответствуют отдельным фасеткам (каждая фасетка интегрирует четыре смежные колонки пиксельного изображения). Полученные битовые маски поступают в нейросетевой модуль, который на основе их анализа определяет координаты объекта в виде расстояния и азимута.

Ключевые слова: фасеточное зрение, оптическая модель, определение расстояния и азимута, ПЗС-матрица, нейросетевая модель, прототип.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Белов К.Н., Бибикина Э.А., Булдашев И.В. и др. Интеллектуальная система бинокулярного фасеточного зрения для определения азимута и расстояния до объекта на плоскости // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2025. Т. 14, № 1. С. 5–29. DOI: 10.14529/cmse250101.

Введение

Одной из важных функций роботизированных систем, используемых в различных областях техники, является определение положения объекта относительно наблюдателя. Для этой цели в зависимости от поставленных задач может быть достаточно датчика определения расстояния и азимута. Сенсорные системы для определения расстояния можно разделить на активные или пассивные **1**.

Активный датчик излучает акустические или электромагнитные волны, которые отражаясь от объекта, попадают на приемник данного датчика. Анализ параметров волн, приобретенных при отражении, позволяет определить расстояние до объекта, скорость сближения, относительные координаты объекта. Существуют три основных вида таких датчиков.

Первым способом определения расстояния активным датчиком является, так называемый «времяпролетный» метод или метод dToF (direct time of flight), основанный на прямом измерении времени, которое проходит между отправкой сигнала и его приемом [2]. Данный метод может быть использован для зондирующих волн разной природы, генерируемых в импульсном режиме. Однако при использовании электромагнитных волн датчику требуется высокоскоростные, высокочувствительные приемники, быстродействующая электроника и источники коротких мощных импульсов излучения. Преимуществом метода является малое время излучения датчика, ввиду испускания редких и коротких импульсов, что при необходимости делает его хоть и не до конца, но достаточно скрытным, к тому же согласование времени работы приемника и источника приводит к возможности использования в одном месте большого количество устройств, не мешающих друг другу, и к исключению внешнего влияния, вносящее помехи.

Активные датчики расстояния, основанные на втором широко известном методе, называемом фазовым или iToF (indirect time of flight), испускают синусоидальный модулированный непрерывный электромагнитный сигнал и определяют сдвиг фаз между излученной и отраженной от объекта волнами [3]. Диапазон и точность измерения расстояния зависит от частоты модуляции сигнала. Для расширения этого диапазона может применяться волны с модуляцией на нескольких частотах. Недостатком этого метода является высокие требования на измерительную часть датчика, которая позволяла бы измерять сдвиг фаз волны модуляции с высокой точностью. К тому же датчик дает усредненную информацию о расстоянии до всех объектов, расположенных на пути волны, эта проблема может быть решена использованием узкого луча и сканированием пространства по углу. Датчик функционирует в режиме синхронного детектирования, то есть его приемная часть работает на частоте модуляции источника, и тем самым обеспечивается высокая помехозащищенность. Использование непрерывного излучения делает его заметным стороннему наблюдателю, затрудняет использование множества таких датчиков в одном месте и порождает высокое электромагнитное загрязнение пространства, что ограничивает сферы его применения. Следует отметить, что на обоих вышеперечисленных принципах (dToF и iToF) основана также работа 3D-приемников изображения [4][5].

Третьим способом определения расстояния до объекта с помощью активного датчика является метод триангуляции [6][7]. Детектор датчика, устанавливается на некотором расстоянии от его источника излучения, в результате вместе с объектом они образуют вершины треугольника (базисные точки). Детектор представляет собой ПЗС-матрицу, на которую с помощью линзы фокусируется отраженный от объекта свет. Место на матрице, где зафиксирована фокальная перетяжка, зависит от направления падающего на нее света. Расстояние до объекта и его расположение рассчитываются исходя из принципов геометрии. Излучает датчик как в импульсном, так и в непрерывном режимах, и имеет все соответствующие вышеперечисленные недостатки. К преимуществам метода относится высокая скорость обнаружения объекта и точность измерения.

Таким образом активные датчики измерения расстояния имеют два основных недостатка: во-первых, они потребляют дополнительную энергию для генерации излучения, а

во-вторых, их работа может быть обнаружена внешним наблюдателем, что не всегда допустимо. К тому же, если объект изготовлен из материалов, не позволяющих отражать излучение, испускаемое датчиком, он им не различим. Пассивный датчик лишен этих недостатков. Главное преимущество пассивного датчика измерения расстояния до объекта — это то, что он не излучает сигнал, а использует излучение, испущенное самим объектом, или излучение естественного происхождения (фоновое), отраженное или рассеянное от объекта. Разрешение приборов, работающих для оптического диапазона излучения выше, чем для радио диапазона, благодаря более короткой длине волны. Пассивные датчики для оптического диапазона излучения более предпочтительны в использовании, так как для оптической локации сложнее создать преднамеренные помехи, чем для радиолокации. Основным элементом пассивных оптических датчиков является цифровая камера регистрации изображений, ПЗС-матрица, которая используется в совокупности с оптической линзовой системой.

Один из простейших принципов оценки расстояния до приближающегося или отдаляющегося от камеры объекта является анализ информации, полученной на последовательно сделанных кадрах, например, оценка изменения размера изображения объекта. Этот подход требует дополнительной информации: начальное расстояние до объекта R_0 , его начальный размер A_0 . Текущее расстояние определяется через актуальный на данный момент размер объекта A по формуле: $R_A = R_0 \sqrt{A/A_0}$. Этот метод применим в случае достаточно крупного объекта (его изображение должно быть представлено большим количеством пикселей ПЗС-матрицы). Также на кадрах может оцениваться изменение интенсивности I излучения ближнего инфракрасного диапазона, исходящего от движущегося объекта и поглощенного в атмосфере по закону Бугера—Ламберта—Бера. Расстояние до объекта рассчитывается по формуле:

$$R_I = R_0 + \frac{1}{\sigma} \ln \frac{I_0}{I},$$

где R_0 и I_0 — начальное расстояние до объекта и интенсивность излучения на начальном кадре, σ — коэффициент поглощения атмосферы. Этот метод в отличие от предыдущего хорошо подходит для оценки дальности именно точечной цели. Еще один метод предполагает оценку изменения контраста изображения объекта, испускающего инфракрасное излучение. Изменение контраста на кадрах также зависит от поглощения ИК-излучения в атмосфере, поэтому для расчета расстояния до объекта используется схожее выражение:

$$R_C = R_0 + \frac{1}{\sigma} \ln \frac{C_0}{C}.$$

Здесь R_0 и C_0 — начальное расстояние до объекта и контраст изображения на начальном кадре, σ — коэффициент поглощения атмосферы, C — контраст изображения на текущем кадре. Контраст можно рассчитать по формуле: $C = (L_t - L_b)/L_b$, где L_t — значение яркости изображения объекта, а L_b — яркость фона. Случайные изменения яркости фона создают дополнительные погрешности при измерении расстояния этим методом, также когда объект близок к камере возможен эффект ее насыщения, как и в случае метода измерения расстояния от объекта по интенсивности его излучения. Эти три пассивных монокулярных метода ограничены в условиях применения, также требуют знания начальных условий, что не всегда возможно [8].

В исследованиях [9] предложена модель монокулярного зрения для определения трехмерного положения овальных и сферических объектов с известными размерами. Подобная

модель использует двумерное изображение, являющееся перспективной проекцией объекта, и эффективное фокусное расстояние камеры для определения местоположения объекта относительно камеры. Описанный метод может быть обобщен для трехмерных квадратичных объектов, таких как эллипсоид, параболоид, гиперболоид и цилиндроид, но не для объектов произвольной формы. Кроме того, этот метод обладает относительно высокой вычислительной сложностью и не может обеспечить достаточную точность измерения расстояния до наблюдаемого объекта, к тому же нужно заранее знать размеры объекта.

Также одним из простейших методов измерения расстояния до объекта и его азимута на основе пассивных оптических датчиков является измерение расстояния по пеленгу [10]. Этот метод позволяет вычислять расстояние d_0 до объекта от камеры, расположенной на известной высоте h_c от земли, по формуле $d_0 = \operatorname{tg}\varphi \cdot (h_c - h_0)$, где φ — угол наклона камеры и h_0 — высота объекта от земли. Такая модель достаточно проста, но применима только в том случае, если $h_c > h_0$ и $\varphi < 90^\circ$. Кроме того, необходимо знать высоту объекта, что не всегда выполнимо на практике. Таким образом, этот метод неприменим, когда высота расположения камеры сопоставима с высотой объекта или объект выше камеры.

Еще один метод пассивной локации, который также можно назвать монокулярным, основан на законах геометрической оптики, принцип действия заключается в том, что изображение объекта строится с помощью фокусирующей линзы с фокусным расстоянием F на ПЗС-матрице, которая передвигается на небольшое расстояние вдоль оптической оси линзы [11]. Задача заключается в поиске расположения плоскости, где изображение обладает наибольшей четкостью, то есть в определении расстояния d между линзой и матрицей, расположенной в этой плоскости. Тогда расстояние от линзы до объекта D можно рассчитать по формуле тонкой линзы: $1/F = 1/D + 1/d$, откуда $D = (d \cdot F)/(d - F)$. В качестве оптической системы может использоваться и более сложная система линз. Подобным образом можно также рассчитать расстояние при условии смещения объекта относительно оптической оси системы. Оптическая система должна обладать малой глубиной фокуса. Анализ изображений, полученных на разных расстояниях от линзы, с целью определения наиболее четкого из них занимает время и вычислительные мощности [11] [12]. К тому же датчик содержит движущиеся части, что также влияет на быстродействие, его надежность в процессе эксплуатации и делает его использование малоэффективным.

Схожий принцип определения расстояния до объекта, но обладающий большей точностью и быстродействием, описан в работе [13], в нем используется линзовая система с переменным фокусным расстоянием с известными граничными фокусными расстояниями f_1 и f_2 . Получаются два изображения объекта, обладающих размерами y_1 и y_2 , соответствующими этим фокусным расстояниям. Расстояние от линзовой системы до объекта находится по формуле:

$$D = f_2 \cdot \left(1 - \frac{y_1}{y_2}\right) / \left(\frac{y_1}{y_2} \cdot \frac{f_1}{f_2} - 1\right).$$

Другой пассивный метод измерения расстояния до объекта заключается в использовании пленоптической камеры. Пленоптическая камера или камера светового поля представляет собой массив микрокамер и регистрирует не распределение интенсивности света в плоскости ПЗС-матрицы, а векторное световое поле [14]. Между объективом камеры и ПЗС-матрицей располагается растр микролинз, каждая из которых строит на поверхности матрицы изображение, даваемое основным объективом под своим ракурсом. При анализе комплекса полученных изображений возможно создание полной картины векторного светового поля, содержащей информацию о направлении и интенсивности световых пучков в

пространстве изображений объектива. Недостатком является значительное снижение эффективного разрешения изображения. В работе [15] предложена оптико-геометрическая модель для измерения расстояния до объекта с использованием пленочной камеры. Расстояние d_{out} между основной линзой и объектом можно рассчитать по следующей формуле:

$$d_{\text{out}} = \frac{D}{2 \tan \varphi} + \sqrt{R^2 + D^2/4} - R + T/2,$$

где R , T и D — параметры основной линзы: радиус кривизны, толщина и диаметр зрачка соответственно, угол φ рассчитывается по формуле: $\varphi = \arcsin(n_1 \sin \psi) - \arcsin(D/2R)$, где n_1 — показатель преломления основной линзы, ψ — угол преломления лучей в основной линзе. Описанный метод также требует сложного процесса калибровки камеры [16], не обеспечивает высокую точность измерений больших расстояний [17] и плохо подходит для автономных мобильных роботов.

Распространенным методом определения расстояния до объекта и его азимута является пассивная оптическая триангуляция [18]. Расстояние до объекта может быть рассчитано с помощью принципов геометрии на основе визуальной информации, полученной из стереоизображения: пары изображений, полученных при различных ракурсах объекта. Для этого может быть использована одна ПЗС-матрица ориентированная по-разному в процессе съемки или одновременно две матрицы. Управление такой стереокамерой требует точной настройки таких параметров, как панорамирование, наклон, масштабирование, фокусировка, а также отслеживания перемещений движущегося объекта [19]. Количество используемых матриц может быть увеличено для повышения точности измерения и расширения видимой области поиска объекта.

В последнее время стало популярным использование нейросетей при работе датчиков. Это позволяет автоматизировать процесс распознавания объекта, который можно совместить с последующим автоматическим решением задач по использованию этой информации, что особенно актуально для роботизированных систем.

В настоящей работе реализована интеллектуальная система бинокулярного зрения, представляющая собой пассивный оптический датчик, позволяющий определять расстояние до круглого объекта произвольного размера, излучающего в видимом или инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, а также его азимут. Основным элементом этой системы является устройство, представляющее собой виртуальный фасеточный глаз, то есть его оптический аналог.

1. Архитектура системы фасеточного зрения

Обобщенная структурная схема интеллектуальной системы бинокулярного фасеточного зрения приведена на рис. 1. Основными структурными элементами системы являются: оптический модуль, аппаратно-программный контроллер и нейросетевой модуль. Оптический модуль с помощью пары объективов преобразует световой сигнал от объекта в два пиксельных Фурье-изображения, которые поступают на вход аппаратно-программного контроллера. Контроллер выполняет первичную обработку пиксельных Фурье-изображений и преобразует их в две битовые маски, элементы которых соответствуют отдельным фасеткам (каждая фасетка интегрирует четыре смежные колонки пиксельного изображения). Полученные битовые маски поступают в нейросетевой модуль, который на основе их анализа определяет координаты объекта в виде расстояния и азимута.



Рис. 1. Архитектура системы фасеточного зрения

2. Оптический модуль

В данном разделе дается обоснование возможности использования в качестве фасеточного глаза одиночной линзы или объектива.

Общепринято считать, что фасеточные (составные) глаза могут обеспечить лучшее временное разрешение в системах, которые регистрируют движение объекта. Хотя в живой природе такие глаза состоят из набора отдельных линзовых элементов — фасеток, функции такого глаза можно реализовать с помощью одной-единственной линзы, воспользовавшись тем фактом, что линза осуществляет Фурье-преобразование из координатной области в область направлений. Рассмотрим выражения, необходимые для расчета основных параметров оптического модуля, в котором в качестве фасеточного глаза используется одна линза и одна ПЗС-матрица. На рис. 2 приведена схема такого виртуального фасеточного глаза.

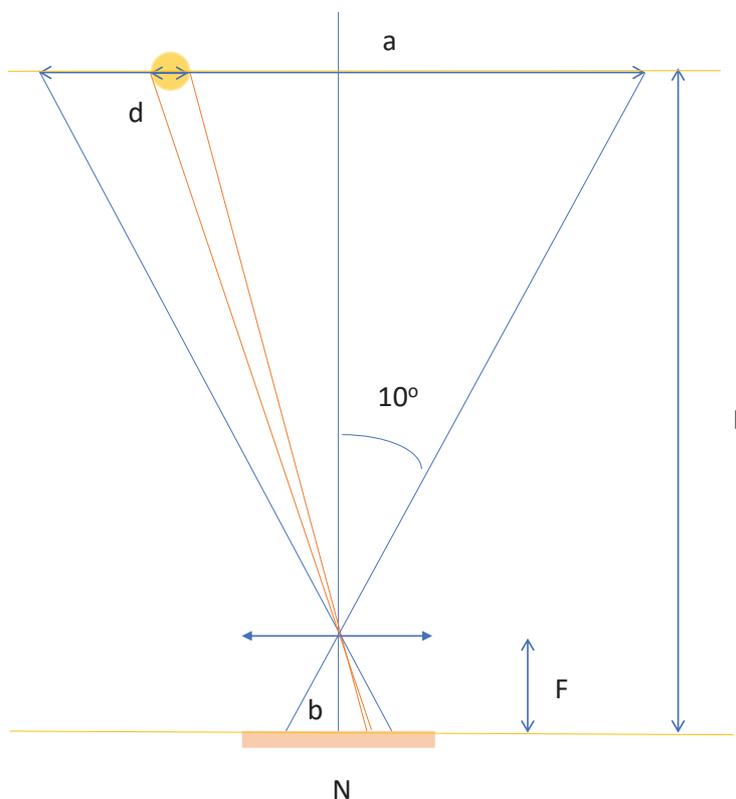


Рис. 2. Оптическая схема виртуального фасеточного глаза. L — расстояние от плоскости движения объекта до плоскости ПЗС-матрицы, F — фокусное расстояние линзы, b — размер рабочей области матрицы, N — количество пикселей матрицы по горизонтали, d — размер объекта

Рассмотрим основные соотношения между геометрическими размерами виртуального фасеточного глаза. Половина угла обзора α определяется половиной рабочей области матрицы $b/2$ и фокусным расстоянием линзы F , а именно, $\operatorname{tg}\alpha = b/(2F)$. Размер рабочей области матрицы b зависит от числа пикселей N и их размера l , а именно, $b = l \cdot N$, таким образом, половина угла обзора однозначно определяется параметрами приемника и фокусным расстоянием линзы:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{l \cdot N}{2F}. \quad (1)$$

Рассмотрим связь между размером объекта и его размером, регистрируемым в фокальной плоскости линзы. Размер объекта на матрице, то есть в фокальной плоскости линзы, M определяется углами видимости краев объекта β и γ , а именно, $M = F(\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\gamma)$, учитывая, что

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{D + d/2}{L - F} \quad (2)$$

и

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{D - d/2}{L - F}, \quad (3)$$

где d — размер объекта, D — положение центра объекта, L — расстояние от плоскости движения объекта до плоскости ПЗС-матрицы, окончательно получаем:

$$M = \frac{d \cdot F}{L - F}. \quad (4)$$

Размер изображения в пикселях m равен $m = M/l$. Если считать, что минимальное количество омматидиев, приходящихся на объект, равно трем, то количество пикселей на один омматидий равно $K = m/3$, тогда

$$K = \frac{d \cdot F}{3l \cdot (L - F)}. \quad (5)$$

Оценим основные параметры для двух виртуальных фасеточных глаз (далее — «глаз»), параметры которых приведены в табл. 1 размера объекта $d = 1.0$ см, половины угла обзора $\alpha = 10^\circ$ и количества омматидиев $NN = N/K = 82$.

Таблица 1. Параметры двух «глаз»

	Первый «глаз»	Второй «глаз»
N , пикс.	1024	1600
l , мкм	4.65	2.2
b , см	0.48	0.35
F , см	1.20 ± 0.01	0.80 ± 0.01

Если задан половинный угол обзора для первого «глаза», то для второго «глаза» активными будут не все пиксели матрицы, а только их часть, определяемая выражением (1):

$$N_2 = 2F \frac{\operatorname{tg}\alpha}{l}. \quad (6)$$

Если количество омматидиев $NN = 82$, то в среднем на один омматидий приходится $K = N/NN$ пикселей, или

$$K = 2F \frac{\operatorname{tg}\alpha}{NN \cdot l}. \quad (7)$$

Размер объекта в пикселях в соответствии с выражением (4) равен

$$m = \frac{M}{l} = \frac{d \cdot F}{l(L - F)}. \quad (8)$$

В табл. 2 приведены рассчитанные значения размера объекта в пикселях и количество пикселей на один омматидий для двух «глаз».

Таблица 2. Рассчитанные значения m и K

	Первый «глаз»	Второй «глаз»
m , пикс.	36	50
K , пикс.	11	16

Использование двух одинаковых однолинзовых фасеточных «глаз» позволяет определить положение объекта в декартовых координатах, а также расстояние и азимут. На рис. 3 представлена оптическая схема, необходимая для расчета положения объекта y_0 и x_0 , если известно расстояние от центра каждой матрицы до изображения объекта в фокальной плоскости на левой (a_L) и правой (a_R) ПЗС-матрицах, а также расстояние между центрами матриц $2b$ и фокусное расстояние используемой линзы. Простейшие тригонометрические

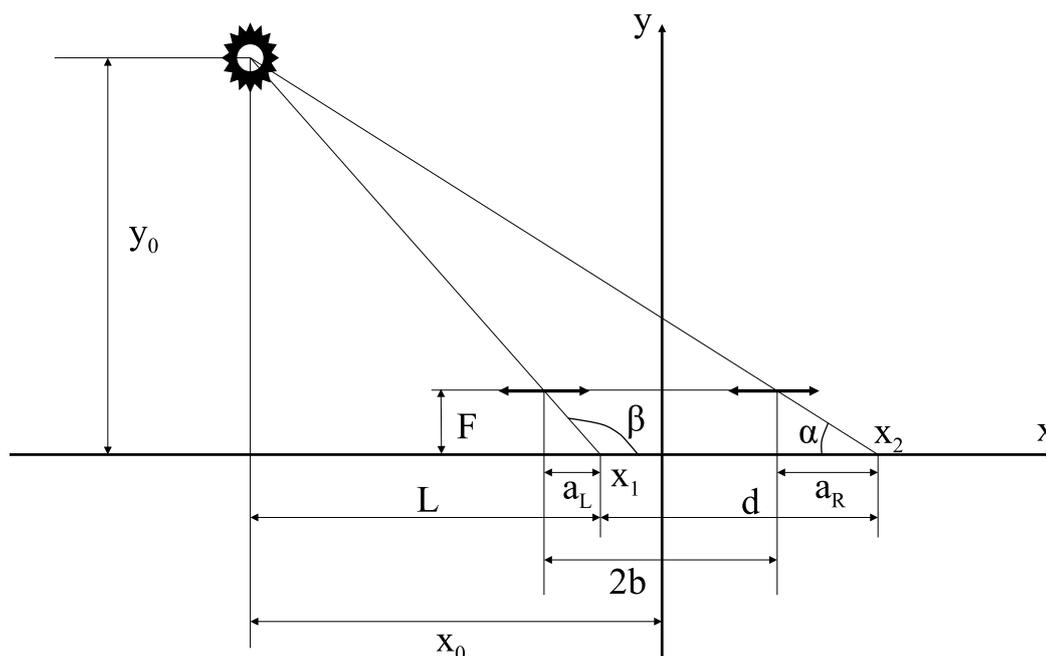


Рис. 3. Оптическая схема бинокулярного зрения на основе виртуальных фасеточных «глаз»

преобразования приводят к следующим значениям

$$x_0 = b \frac{a_R + a_L}{a_R - a_L}, \quad y_0 = F \frac{2b + a_R - a_L}{a_R - a_L}. \quad (9)$$

Выражения (9) позволяет определить расстояние до объекта и азимутальный угол по известным из тригонометрии соотношений.

3. Аппаратно-программный блок

Аппаратно-программный блок решает задачи первичной обработки информации в макете и обеспечивает интерфейс между оптическим и нейросетевым модулем. Основой аппаратно-программного блока является специализированный контроллер на базе отладочной платы с ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) Intel (Altera) CycloneV (модель 5CEFA5F23I7). Данная ПЛИС обладает логической емкостью 77000 элементов, имеет блочную память объемом 4460 Кб, 6 PLL (Phase-Locked Loop — внутренние генераторы со схемой подстройки частоты), а также 240 пользовательских входов/выходов. Тактовая частота ПЛИС составляет 50 МГц. Логика обработки реализована в виде программного обеспечения ПЛИС, функциональная схема которого представлена на рис. 4

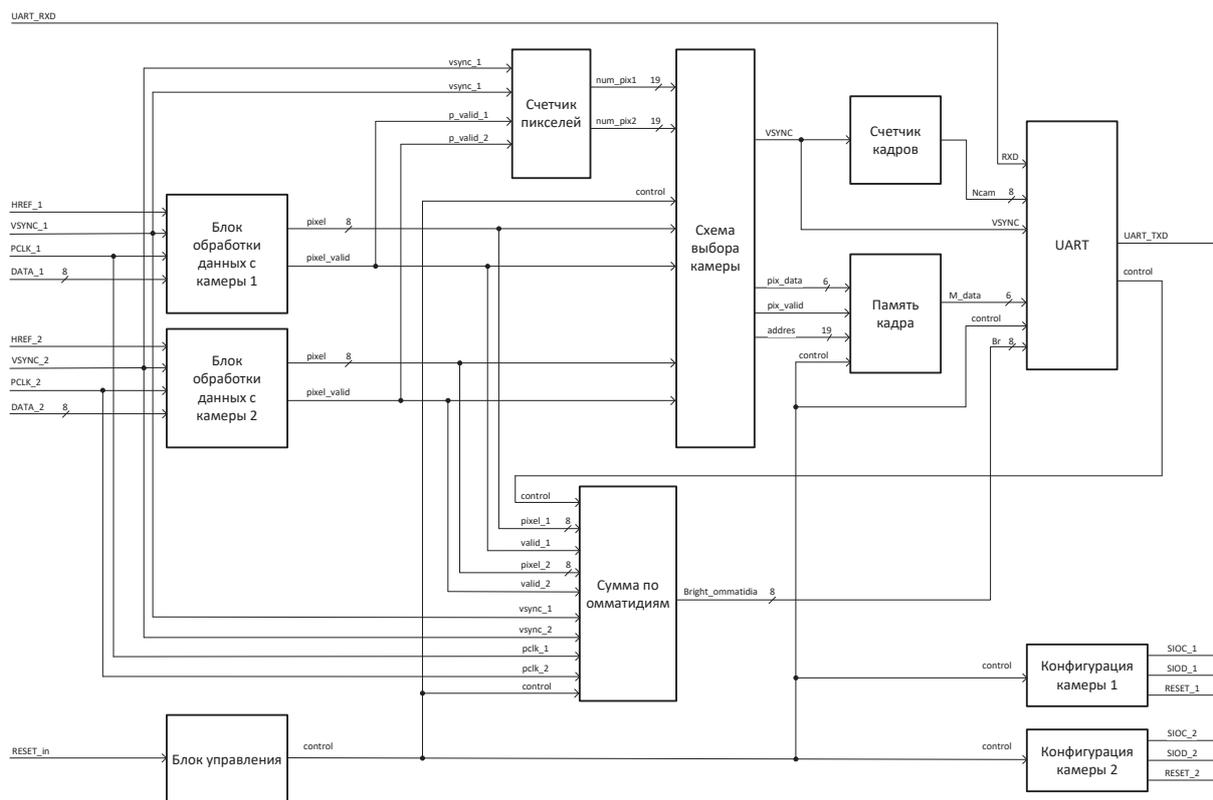


Рис. 4. Функциональная схема контроллера

Контроллер обеспечивает интерфейс информационного обмена с камерами типа OV2640 (или совместимыми) с протоколом обмена SCCB (Serial Camera Control Bus). Используемые камеры имеют формат информационного потока RGB565/555 (также возможны форматы YUV(422/420)/YCbCr422). Максимальное разрешение камер составляет 1600×1200 пикселей. Частота кадров при максимальном разрешении составляет 15 кадров в секунду. Максимальная частота синхронизации пикселей составляет 36 МГц. Контроллер имеет возможность принимать сигналы от оптических модулей, реализует первичную обработку принятых данных, а также производит кодирование выделенной из сигналов информации и передачу информационных посылок в нейросетевой модуль. Для этого реализованы соответствующие блоки управления и обработки. Для настройки камер служат блоки «Конфигурация камеры 1» и «Конфигурация камеры 2». Настройка подразумевает под собой запись необходимых параметров в соответствующие регистры.

Для приема данных с камер служат «Блок обработки данных с камеры 1» и «Блок обработки данных с камеры 2». На выходе данных блоков устанавливаются значения каждого пикселя, а также сигнал подтверждения правильности данных. «Счетчик пикселей» служит для формирования адреса, с помощью которого данные по каждому пикселю записываются в память (блок «Память кадра»). Для выбора камеры, с которой производится запись в память, служит блок «Схема выбора камеры», в котором происходит коммутация входных сигналов. Для контроля передачи кадров служит блок «Счетчик кадров», информация о номере текущего кадра позволяет оценивать количество пропущенных кадров при передаче в нейросетевой модуль. «Блок управления» формирует все сигналы синхронизации. Связь с нейросетевым модулем осуществляется по протоколу UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) с помощью блока «UART». Связь с контроллером возможна в обе стороны (настройка необходимых параметров и режима работы контроллера и передача данных для дальнейшей обработки).

Используемая отладочная плата также содержит разъем JTAG (Joint Test Action Group) для программирования ПЛИС и внешнюю память типа SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory) общим объемом 64 Мб. В качестве адаптера UART используется внешний модуль на базе преобразователя интерфейсов FT232RL. Органы управления и индикации представлены в виде двух пользовательских тактовых кнопок и светодиодов.

4. Нейросетевой модуль

В данном разделе приведено описание процессов проектирования, разработки и обучения нейросетевого модуля, включающего в себя две искусственные нейронные сети прямого распространения для определения расстояния и азимута до целевого объекта на плоскости, отдельно рассмотрены метрики и способы оценки обученных моделей. Раздел содержит алгоритм генерации обучающих множеств, результаты поиска лучших топологий ИНС и оценку точности полученных моделей.

Бинокулярная модель фасеточного зрения [20] включает в себя два круглых сложных глаза, расположенных симметрично относительно оси y , центры A и B , расположенных на оси x . Расстояние от начала координат до центра каждого глаза равно h . Сложный глаз состоит из m омматидиев, являющихся равнобедренными треугольниками равного размера. Стороны данных треугольников имеют длину l , а основания имеют длину s . Угол между сторонами равен γ .

Алгоритм 1 Generating uniform training data set.

```

1: input  $h, l, m, n, r_{min}, r_{max}, g_{max}$ ;
2:  $\mathcal{M}, DS := \emptyset$ 
3:  $k := 1$ ;
4: for  $i = r_{min} \dots r_{max}$  with step 5 do
5:    $DS := generate(h = h, l = l, m = m, r_{min} = i, r_{max} = i + g_{max},$ 
6:      $g_{max} = g_{max}, n = 1000 + 200 * k)$ 
7:    $\mathcal{M} := \mathcal{M} \cup DS$ 
8:    $k := k + 1$ 
9: end for
9: return  $\mathcal{M}$ .
```

На основе рассмотренной модели фасеточного зрения был разработан алгоритм [1] для параметризуемой генерации аннотированных синтетических обучающих наборов данных. Набор данных $\mathcal{M} \subset \mathbb{R}^2 \times \{0, 1\}^{m/2} \times \{0, 1\}^{m/2}$ состоит из записей вида $(r, \varphi, \Omega_A, \Omega_B)$. Каждая запись соответствует положению наблюдаемого целевого объекта. Значения (r, φ) определяют полярные координаты центра наблюдаемого объекта. Параметр Ω_A представляет собой битовую маску длиной $m/2$, полученную для левого глаза: $\Omega_A[i] = 1$ тогда и только тогда, когда i -й омматидий левого глаза наблюдает целевой объект ($i = 0, \dots, m/2 - 1$). Параметр Ω_B представляет собой битовую маску аналогичной длины ($m/2$), полученную для правого глаза: $\Omega_B[j] = 1$ тогда и только тогда, когда j -й омматидий правого глаза наблюдает целевой объект ($j = 0, \dots, m/2 - 1$). Итоговые характеристики подготовленных наборов данных приведены в табл. [3]

Кратко прокомментируем шаги разработанного алгоритма [1]. Шаг 1 осуществляет ввод параметров алгоритма:

- h : расстояние от центра координат до центра сложного глаза;
- l : радиус сложного глаза;
- m : количество омматидиев в глазе;
- n : количество записей в обучающем наборе;
- r_{min} : минимальное расстояние от центра системы до центра целевого объекта;
- r_{max} : максимальное расстояние от центра системы до центра целевого объекта;
- g_{max} : максимальный радиус целевого объекта.

Шаги 2, 3 инициализируют переменные \mathcal{M} , DS и счетчик k , необходимые для равномерной генерации набора данных. Шаги 4–8 реализуют цикл **for**, в котором итерационно генерируется обучающий набор данных \mathcal{M} . На 5 шаге алгоритма формируется промежуточный набор данных DS с помощью метода `generate`, подробно описанного в работе [20]. По завершении цикла **for**, алгоритм возвращает итоговый обучающий набор данных на шаге 9.

Для простоты было принято решение спроектировать две глубокие ИНС прямого пространства: первая для определения расстояния, а вторая для определения азимута целевого объекта. Для поиска оптимального набора гиперпараметров нейронной сети была построена общая гипермодель для обеих сетей. Гипермодель включает входной слой, три скрытых слоя и выходной слой. Все слои являются полносвязными. Для входного слоя и всех скрытых слоев доступны следующие функции активации: $[ReLU, Tanh, Sigmoid]$. Входной слой имеет 1476 нейронов, получающих внешние данные: 738-битное изображение от левого фасеточного глаза и 738-битовое изображение от правого фасеточного глаза. Выходной слой имеет единственный нейрон, дающий конечный результат: расстояние для первой ИНС и азимут для второй ИНС. Для первого скрытого слоя количество нейронов на выбор: $[2048, 3072, 4096, 5040, 5760]$. Для второго и третьего скрытых слоев количество нейронов на выбор: $[3072, 4096, 5120, 5760, 6480, 7200]$ и $[2160, 2880, 3600, 4096, 5120, 6144]$ соответственно.

На основе представленной гипермодели был выполнен ограниченный случайный поиск оптимальных наборов гиперпараметров нейронных сетей с использованием платформы W&B [21]. В качестве алгоритма оптимизации были протестированы SGD (*stochastic gradient descent*) и $RMSProp$ [22]. Размер батча варьировался в пределах от 4 до 64. В качестве функции потерь была использована метрика MAE (*mean absolute error*) [23], рас-

считываемая следующим образом:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i|,$$

где n — число записей в обучающем наборе данных, y_i — результат работы ИНС, x_i — истинное значение (расстояния/азимута).

Таблица 3. Наборы данных и результаты обучения нейросетевых моделей

Набор данных	Параметр	Определение азимута	Определение расстояния
ДС-1 ($g = 5$)	Оптимизатор	RMSProp	SGD
	Batch Size	32	32
	Learning rate	0.00015	0.00073
	MAE	0.0059	9.09
	MAPE	0.403	1.448
	R^2	0.9998	0.9969
	Train size	83000 (80%)	
Test size	25150 (20%)		
ДС-2 ($g = 10$)	Оптимизатор	RMSProp	SGD
	Batch Size	32	32
	Learning rate	0.00023	0.00037
	MAE	0.0079	12.36
	MAPE	0.506	1.951
	R^2	0.99975	0.995
	Train size	20750 (80%)	
Test size	6300 (20%)		

Для обучения и тестирования моделей нейронных сетей использовалась облачная платформа Google Colab [24], предоставляющая вычислительные ресурсы видеокарты $nVidia$ Tesla P4. Для оценки качества полученных нейросетевых моделей были использованы две дополнительные метрики: MAPE (*mean absolute percentage error*) [25], определяемая уравнением

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - x_i}{x_i} \right|,$$

и коэффициент детерминации R^2 [26], представляющий собой

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{mean})^2},$$

где

$$y_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i.$$

MAPE часто используется на практике по причине интуитивной интерпретации ошибки с точки зрения относительной погрешности. Коэффициент детерминации дает некоторую информацию о степени соответствия моделей нейронных сетей набору обучающих данных.

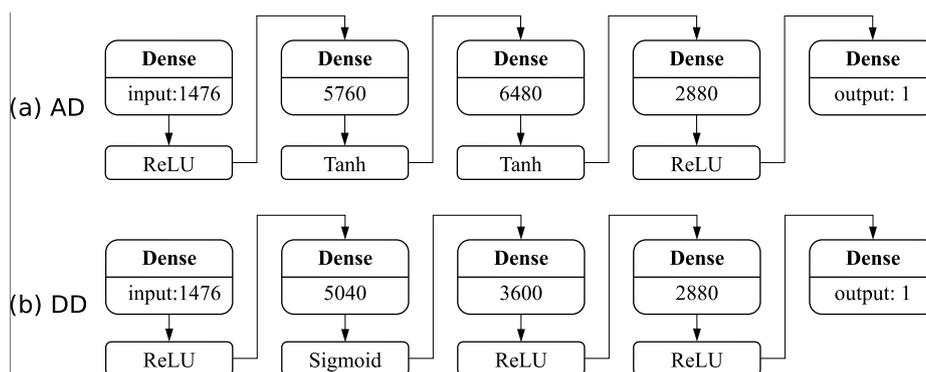


Рис. 5. Топология нейронных сетей для определения а) азимута; б) расстояния до целевого объекта

Для решения задачи определения положения целевого объекта на плоскости разработаны и обучены две нейронные сети прямого распространения для определения азимута и расстояния. Топологии разработанных нейронных сетей приведены на рис. 5. Лучшие результаты обучения разработанных нейронных сетей для различных наборов данных приведены в табл. 3.

5. Экспериментальный прототип системы фасеточного зрения

Фотоприемник системы фасеточного зрения выполнен в виде однолинзового фасеточного глаза. Фасеточный глаз состоит из задаваемого количества омматидиев, являющихся треугольниками имеющими одинаковое основание, т.е. одинаковым количеством пикселей приходящимися на один омматидий. Один омматидий — программно выбираемое количество пикселей ПЗС-матрицы. Для исследования возможности использования однолинзового фасеточного глаза для определения положения объекта была создана экспериментальная площадка, оптическая схема которой была приведена на рис. 2. На начальном этапе работы использовался светодиодный модуль, установленный в держателе на двух взаимно перемещаемых рельсах. В качестве однолинзового фасеточного глаза использовалась коммерчески доступная линза с фокусным расстоянием 1.2 см и ПЗС-матрица ThorLabs DCU223C. Изображения объекта, получаемые на ПЗС-матрице, расположенной в фокальной плоскости линзы, приведены на рис. 6 под буквами а), б), в) фотографии светящегося объекта с разницей в расстоянии 4 см.

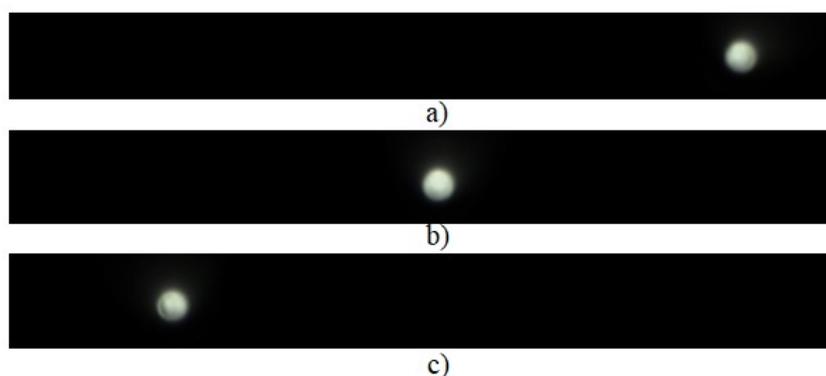


Рис. 6. Изображения объекта, получаемые на ПЗС-матрице, расположенной в фокальной плоскости линзы

Однолинзовый фасеточный глаз непригоден для измерений в реальных условиях. Если бы размер объекта был фиксирован, тогда его можно использовать, но в реальных условиях размеры объекта могут очень сильно отличаться. Для проведения исследований в реальном динамическом режиме был изготовлен прототип движущегося объекта. Эскиз конструкции прототипа показан на рис. 7

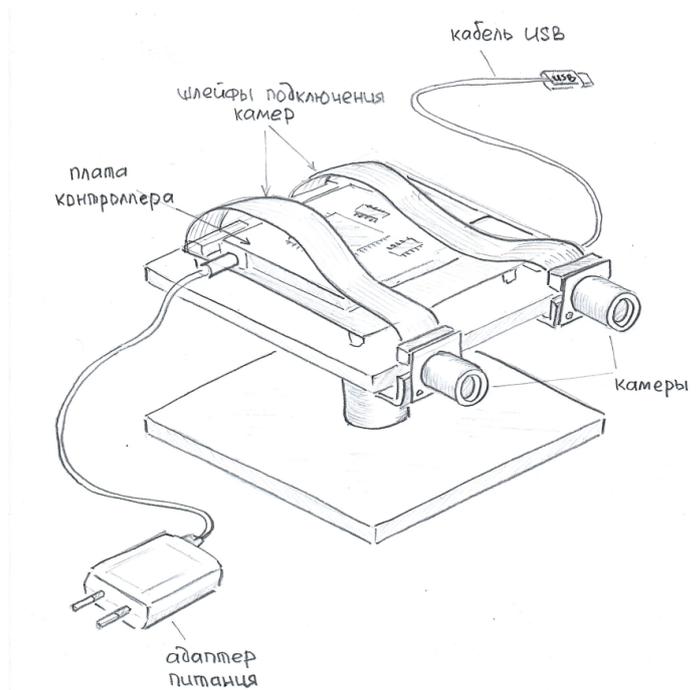


Рис. 7. Эскиз конструкции прототипа системы фасеточного зрения

Конструкция прототипа включает верхнюю металлическую платформу, на которую крепится модуль аппаратно-программного контроллера и оптические модули, нижнюю опорную платформу, опорный штوك с возможностью регулировки высоты установки верхней платформы. В конструкции предусмотрена возможность регулировки положения оптических модулей. Внешний вид изготовленного прототипа приведен на рис. 8

Объект устанавливается на тележку, которая приводится в движение электрическим двигателем. На рис. 9 приведена оптическая схема установки: а) ноутбук; б) плата «Плис» соединенная с двумя камерами; в) передвижная тележка со светодиодом. Скорость тележки можно регулировать. Движение тележки осуществляется по двутавру длиной 119 см. Свободный ход ~ 100 см. Источник напряжения — батарейка типа «Крона» + DC-DC-преобразователь напряжения.

В качестве объекта использовался светодиод, установленный на стойке. Питание от регулируемого источника напряжения (батарейка типа «Крона» + DC-DC-преобразователь напряжения) позволял регулировать яркость источника излучения. Исследования можно проводить с различными светодиодами, параметры которых представлены в табл. 4. Конструкция экспериментальной демонстрационной площадки позволяла вместо однолинзового фасеточного глаза установить макет системы фасеточного бинокулярного зрения.

Для определения ориентации матриц и юстировки фасеточных глаз макета была разработана специальная оптическая методика. Фасеточные глаза должны быть ориентированы на макете под определенным углом к друг другу. Это означает также, что должны быть

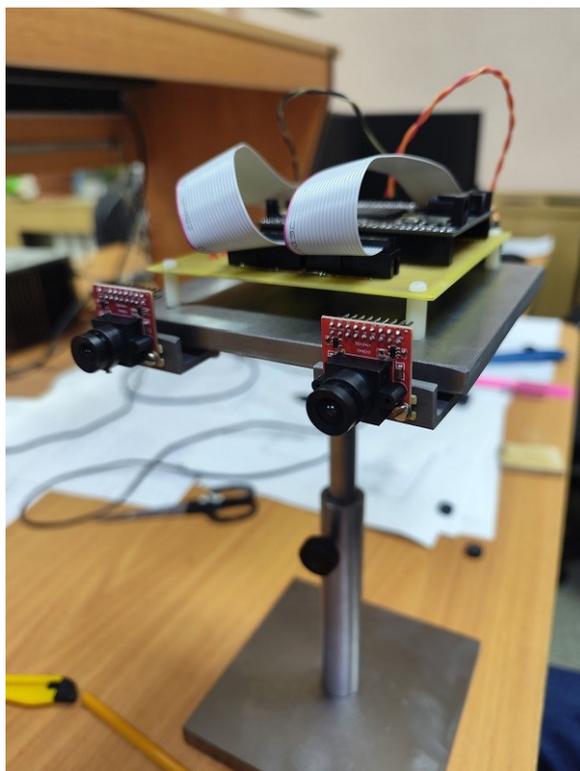


Рис. 8. Внешний вид прототипа системы фасеточного зрения

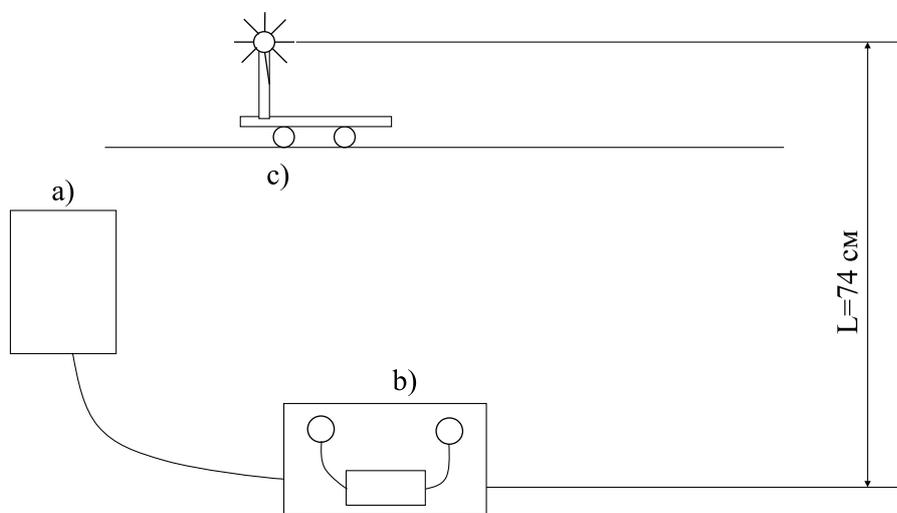


Рис. 9. Оптическая схема установки

определены оптические оси «глаз». Для двухмерного «глаза» необходимо определить плоскость перпендикулярную матрице, которая содержит оптическую ось объектива для каждого «глаза». Экспериментально это означает определение оптического центра ПЗС-матрицы, то есть определение номеров омматидиев «глаза» ближайших к оптическому центру. Плоскости матриц будут при этом перпендикулярны оптическим осям объективов. Проблематика создания такой методики заключается в двух факторах: а) необходимость осуществления ориентировки матриц одновременно для двух «глаз» с последующим выставлением

Таблица 4. Характеристики светодиодов

Цвет, диапазон длин волн	Мощность, Вт
Зеленый (520–540 нм)	1
Красный (600–625 нм)	3
Красный (620–625 нм)	1
ИК (850 нм)	3
Синий (460–465 нм)	1
Полный спектр (400–840 нм)	3

углов наклона «глаз» к друг другу; б) оптическая недоступность матриц мимо объективов для «глаз» в собранном виде. Первый фактор требует, таким образом, использование одного и того же опорного направления (опорного луча) для юстировки одновременно обоих «глаз». Второй фактор требует последовательной работы с каждым разобранным (без объектива) и собранным (с объективом) «глазом» с последующим выставлением фокальной плоскости объектива на поверхность матрицы для обоих «глаз». Такая методика была реализована на опытно-демонстрационном стенде в нашей оптической лаборатории. Процесс установки ориентации матриц продемонстрирован на рис. 10

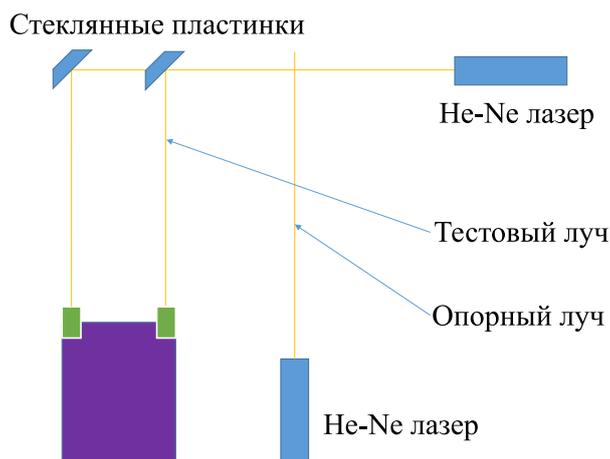


Рис. 10. Определение ориентации поверхностей матриц фасеточных глаз

Всегда использовался один и тот же опорный лазерный луч перпендикулярный установочному рельсу на опытно-демонстрационном стенде. На соседнем со стендом оптическом столе, на расстоянии примерно 330 см от рельса, выставлялся источник тестового луча (отражение лазерного луча от стеклянной пластинки). Тестовый луч всегда выставлялся параллельно опорному лучу, и его интенсивность минимизировалась серыми стеклянными фильтрами. Тестовые лучи направлялись (параллельно опорному лучу) на матрицы со снятыми объективами. Матрицы поворачивались так, чтобы отраженные лучи шли точно назад (параллельно опорному лучу). Положение матриц на макете жестко фиксировалось винтами. После этого объективы аккуратно наворачивались на фрамугу матриц, чтобы матрицы при этом не сдвигались, для чего макет жестко фиксировался на оптическом столе стенда в положении на боку. Потом проводилась юстировка объективов, чтобы их фокальные плоскости совпадали с поверхностью матриц. Для этого мы добивались получения резкого изображения объектов в дальней зоне (на расстоянии примерно 12 метров); при

этом, изображения объектов ближней зоны (около 1 метра) оставались размытыми. Оптические центры матриц определялись экспериментально следующим образом. После установки и юстировки объективов, макет устанавливался в исходное положение с матрицами перпендикулярно опорному лучу. Тестовые лучи направлялись на центры «своих» объективов параллельно опорному лучу. Изображения каустик на матрицах, таким образом, обозначали оптические центры матриц. Результаты определения оптических центров «глаз» оказались следующими. Оптический центр левого «глаза» расположен между 92-ой и 93-ей омматидиями слева направо. Оптический же центр правого «глаза» расположен между 112-ой и 113-ой омматидиями слева направо. Точность определения центров проверялась на вдвое большем числе омматидиев на матрицу, и оценивается меньше одной пятой доли рабочего омматидия. Заданный угловой размер омматидиев соответствует 41 омматидию на 10 градусов. Он также может быть выбран пользователем соответственно потребностям пользователя или измененным параметрам нейронной сети. Угловые размеры омматидиев определялись экспериментально следующим образом. Тестовые лучи (рис. 11) направлялись на центры «чужих» объективов, и измерялись смещения изображений каустик на каждой матрице. Они оказались одинаковыми по величине и разными по направлению. Угловой размер омматидиев оказался совпадающим с заданным размером с точностью около двух процентов. Практически, точное совпадение реальных угловых размеров омматидиев с заданным размером достигается при общем числе омматидиев в 204 на каждую матрицу.

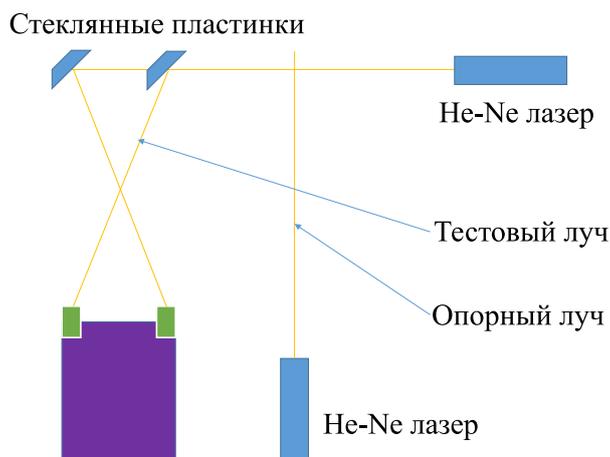


Рис. 11. Определение углового размера омматидиев

Заданное «косоглазие» макета в соответствии с оптико-геометрическими параметрами и требованиями разработанной нейронной сети было определено в 5.4 градуса. То есть каждый «глаз» должен быть повернут внутрь на 2.7 градуса. Подобный поворот «глаз» невозможно реализовать обычными инженерными способами с требуемой точностью. Только с применением оптических методов удастся этого добиться. Требуемая методика была разработана и реализована для нашего демонстрационного макета. Точный поворот «глаз» осуществлялся следующим образом. Стеклянные пластинки (рис. 12) смещались в противоположных направлениях перпендикулярно опорному лучу. Они смещались так, чтобы тестовые лучи, направленные на центры «своих» объективов, составляли одинаковые углы по отношению к опорному лучу в 2.7 градуса. Потом каждый «глаз» поворачивался так,

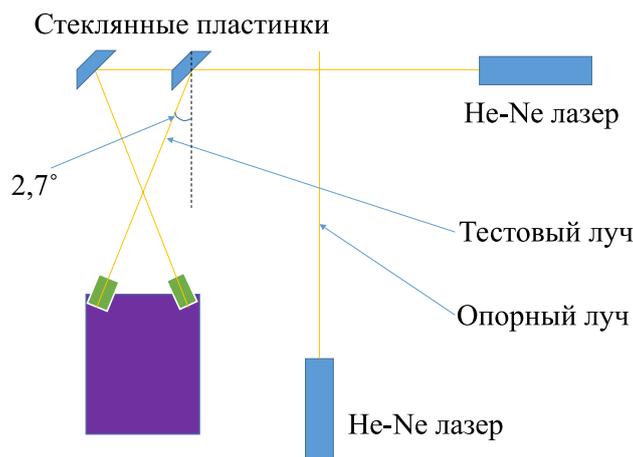


Рис. 12. Установка угловых поворотов фасеточных глаз

чтобы изображения каустик на матрицах совпадали с оптическими центрами матриц. После выставления углов фасеточных глаз крепеж «глаз» жестко фиксировался с помощью винтов. Данная методика выставления углов оказалась очень точной, обеспечивая суммарную погрешность в угле «косоглазия» не более 0.005 градуса.

Проведя настройку установки вычислено максимальное значение интенсивности света для различных положений светодиода. Расстояние от светодиода до матрицы камеры составило $L = 74$ см. Получена зависимость интенсивности света от номера омматидия для левой и правой камеры (рис. 13 а) левая камера, б) правая камера). Всего использовалось 200 омматидиев, линий по вертикали 600. Чтобы ускорить расчеты и ограничить ненужные детали проводилось суммирование не всех линий по горизонтали при вычислении интенсивности света, а только выбранных. В данной работе это названо «Прищур». На данном этапе, прищур равнялся 70. Использовался светофильтр «НС10». Анализ экспериментальных результатов проведен аппроксимацией полиномами второго порядка с коэффициентами $y = a * x^2 + b * x + c$. Значения коэффициентов полинома представлены в табл. 5. В экспериментах были задеты не все омматидии, а только по левой камере с 37 по 155, а по правой с 48 по 170.

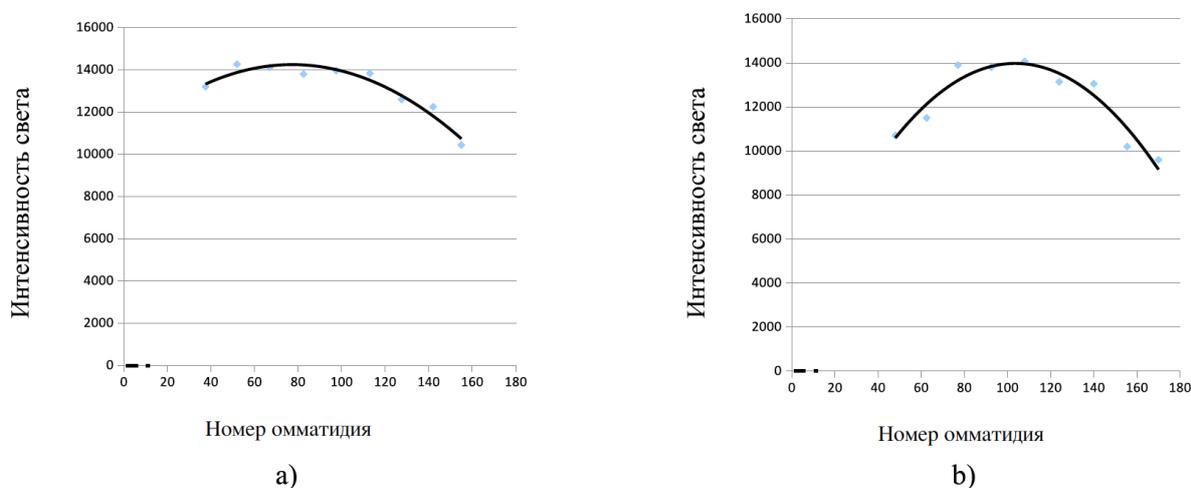


Рис. 13. График зависимости интенсивности света от номера омматидия

Таблица 5. Значения коэффициентов полинома второго порядка

Коэффициенты	a	b	c
Левая камера	-0.58	89.9	10772
Правая камера	-0.54	208.4	6868

Из анализа рис. 13 видно, что получились две параболы ветками направленными вниз. Однако, они не совсем симметричны. Поэтому был проведен следующий вариант обрезки.

Используя нейронные сети проведено сравнение результатов полученных из эксперимента с данными, выдаваемыми интеллектуальной системой бинокулярного фасеточного зрения (табл. 6). Расстояние до объекта измерялось в миллиметрах, азимут измерялся в градусах. Точность в таблице определяется в процентах по формуле $100 - MARE$.

Таблица 6. Сравнение реальных данных по расстоянию и азимуту с работой нейронных сетей

Координаты объекта	Расст-е (мм)	Предсказ. расст-е (мм)	Точность (%)	Азимут (градусы)	Предсказ. азимут (градусы)	Точность (%)
33 см, 70°	330	354.9	93.0	70	69.8	99.8
30 см, 90°	300	294.3	98.1	90	90.8	99.1
33 см, 110°	330	328.7	99.6	110	109.3	99.3
65 см, 70°	650	694.0	93.2	70	70.2	99.7
60 см, 90°	600	608.0	98.7	90	89.5	99.4
65 см, 110°	650	671.0	96.7	110	110.0	99.9
95 см, 70°	950	932.4	98.1	70	71.4	98.1
90 см, 90°	900	909.3	98.9	90	90.7	99.2
95 см, 110°	950	914.3	96.2	110	109.1	99.2

Таблица 6 показывает, что использование предложенных нейронных сетей позволяет получить координаты объекта с точностью 93% для расстояния и 98% для азимута.

Заключение

В статье представлен прототип системы бинокулярного фасеточного зрения для определения азимута и расстояния до объекта на плоскости. Искусственный фасеточный глаз моделируется на основе однолинзовой оптической схемы с использованием ПЗС-матрицы. Пиксели ПЗС-матрицы разбиваются на регулярные непересекающиеся области, каждая из которых соответствует отдельному омматидию. Основой аппаратно-программного блока является специализированный контроллер на базе отладочной платы с ПЛИС Intel Altera CycloneV, модель 5CEFA5F23I7. Контроллер обеспечивает интерфейс информационного обмена с камерами типа OV2640 (или совместимыми) с протоколом обмена SCCB. Нейросетевой модуль включает в себя две глубокие нейронные сети прямого распространения: первая для определения расстояния, а вторая для определения азимута целевого объекта. Конструкция прототипа включает верхнюю металлическую платформу, на которую крепится модуль аппаратно-программного контроллера и оптические модули, нижнюю опорную платформу, опорный штوك с возможностью регулировки высоты установки верхней плат-

формы. В конструкции предусмотрена возможность регулировки положения оптических модулей. Для проведения натуральных экспериментов был изготовлен испытательный стенд, включающий в себя ноутбук, прототип системы фасеточного зрения (плата «Плис», соединенная с двумя камерами), передвижная тележка со светодиодом. Скорость тележки можно регулировать. Движение тележки осуществляется по двутавру длиной 119 см. Свободный ход составляет 100 см. Расстояние от светодиода до камер равно 74 см. С использованием разработанного стенда были проведены натурные эксперименты, которые показали, что созданный интеллектуальный прототип позволяет получить координаты объекта с точностью 93% для расстояния и 98% для азимута.

Литература

1. Ben-Ari M., Mondada F. Elements of robotics. Springer Nature, 2017. 308 p. DOI: [10.1007/978-3-319-62533-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1).
2. Mahajan A., Walworth M. 3D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers // IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001. Vol. 17, no. 1. P. 91–94. DOI: [10.1109/70.917087](https://doi.org/10.1109/70.917087).
3. Journet B.A., Poujouly S. High-resolution laser rangefinder based on a phase-shift measurement method // Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection IV. Vol. 3520 / ed. by K.G. Harding, D.J. Svetkoff, K. Creath, J.S. Harris. International Society for Optics, Photonics. SPIE, 1998. P. 123–132. DOI: [10.1117/12.334326](https://doi.org/10.1117/12.334326).
4. Zhang C., Lindner S., Antolovic I.M., *et al.* A 30-frames/s, 252 × 144 SPAD Flash LiDAR With 1728 Dual-Clock 48.8-ps TDCs, and Pixel-Wise Integrated Histogramming // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2018. Vol. 54, no. 4. P. 1137–1151. DOI: [10.1109/JSSC.2018.2883720](https://doi.org/10.1109/JSSC.2018.2883720).
5. Bamji C., Godbaz J., Oh M., *et al.* A Review of Indirect Time-of-Flight Technologies // IEEE Transactions on Electron Devices. 2022. Vol. 69, no. 6. P. 2779–2793. DOI: [10.1109/TED.2022.3145762](https://doi.org/10.1109/TED.2022.3145762).
6. Dorsch R.G., Häusler G., Herrmann J.M. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement // Appl. Opt. 1994. Mar. Vol. 33, no. 7. P. 1306–1314. DOI: [10.1364/AO.33.001306](https://doi.org/10.1364/AO.33.001306).
7. Liebe C.C., Coste K. Distance Measurement Utilizing Image-Based Triangulation // IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13, no. 1. P. 234–244. DOI: [10.1109/JSEN.2012.2212428](https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2212428).
8. Bondžulić B.P., Mitrović S.T., Barbarić Ž.P., Andrić M.S. A comparative analysis of three monocular passive ranging methods on real infrared sequences // Journal of Electrical Engineering. 2013. Vol. 64, no. 5. P. 305–310. DOI: [10.2478/jee-2013-0044](https://doi.org/10.2478/jee-2013-0044).
9. Li L. Building an accurate 3D model of a circular feature for robot vision // Opto-Electronics Review. 2012. Vol. 20. P. 120–125. DOI: [10.2478/s11772-012-0017-y](https://doi.org/10.2478/s11772-012-0017-y).
10. Jüngel M., Mellmann H., Spranger M. Improving vision-based distance measurements using reference objects // RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI 11. Vol. 5001. Springer, 2008. P. 89–100. DOI: [10.1007/978-3-540-68847-1_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68847-1_8).
11. Гейдаров П.Ш.О. Алгоритм определения расположения и размеров объектов на основе анализа изображений объектов // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35, № 2. С. 275–280.

12. Witus G., Hunt S. Monocular visual ranging // Unmanned Systems Technology X. Vol. 6962. SPIE, 2008. P. 38–44. DOI: [10.1117/12.778686](https://doi.org/10.1117/12.778686).
13. Зуев С.В. Моностатический способ определения расстояния до объекта, его направления и скорости движения. 2008.
14. Lumsdaine A., Georgiev T. The focused plenoptic camera // 2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). IEEE, 2009. P. 1–8. DOI: [10.1109/ICCPHOT.2009.5559008](https://doi.org/10.1109/ICCPHOT.2009.5559008).
15. Chen Y., Jin X., Dai Q. Distance measurement based on light field geometry and ray tracing // Optics Express. 2017. Vol. 25, no. 1. P. 59–76. DOI: [10.1364/OE.25.000059](https://doi.org/10.1364/OE.25.000059).
16. Heinze C., Spyropoulos S., Hussmann S., Perwass C. Automated robust metric calibration algorithm for multifocus plenoptic cameras // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Vol. 65, no. 5. P. 1197–1205. DOI: [10.1109/TIM.2015.2507412](https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2507412).
17. Sardemann H., Maas H.-G. On the accuracy potential of focused plenoptic camera range determination in long distance operation // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 114. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.012).
18. Mahammed M.A., Melhum A.I., Kochery F.A. Object distance measurement by stereo vision // International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT). 2013. Vol. 2, no. 2. P. 05–08.
19. Jeong C.-J., Park G.-M. Real-time Auto Tracking System using PTZ Camera with DSP // International Journal of Advanced Smart Convergence. 2013. Vol. 2, no. 1. P. 32–35. DOI: [10.7236/IJASC.2013.2.1.032](https://doi.org/10.7236/IJASC.2013.2.1.032).
20. Starkov A.E., Sokolinsky L.B. Building 2D Model of Compound Eye Vision for Machine Learning // Mathematics. 2022. Vol. 10, no. 2. DOI: [10.3390/math10020181](https://doi.org/10.3390/math10020181).
21. Biewald L. Experiment Tracking with Weights and Biases. 2020. URL: <https://docs.wandb.ai/>.
22. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning). MIT Press, 2016. 800 p. URL: <http://www.deeplearningbook.org>.
23. Willmott C.J., Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance // Climate Research. 2005. Vol. 30, no. 1. P. 79–82. DOI: [10.3354/CR030079](https://doi.org/10.3354/CR030079).
24. Bisong E. Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform. Apress, 2019. 709, XXIX p. DOI: [10.1007/978-1-4842-4470-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8).
25. Myttenaere A., Golden B., Rossi F. Mean Absolute Percentage Error for regression models // Neurocomputing. 2016. Vol. 192. P. 38–48. DOI: [10.1016/J.NEUCOM.2015.12.114](https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2015.12.114).
26. Barten A.P. The coefficient of determination for regression without a constant term // The Practice of Econometrics. International Studies in Economics and Econometrics. Vol. 15 / ed. by R. Heijmans, H. Neudecker. Springer, 1987. P. 181–189. DOI: [10.1007/978-94-009-3591-4_12](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3591-4_12).

Белов Кирилл Николаевич, ассистент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Бибикова Эвелина Анатольевна, к.ф.-м.н., доцент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация); научный сотрудник Лаборатории нелинейной оптики, Институт электрофизики УрО РАН (Екатеринбург, Российская Федерация)

Булдашев Иван Владимирович, старший преподаватель кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Кундикова Наталия Дмитриевна, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация); главный научный сотрудник Лаборатории нелинейной оптики, Институт электрофизики УрО РАН (Екатеринбург, Российская Федерация)

Мухин Юрий Викторович, к.ф.-м.н., доцент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация); Институт электрофизики УрО РАН (Екатеринбург, Российская Федерация)

Николаев Андрей Николаевич, доцент кафедры радиоэлектроники и систем связи, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Портнов Андрей Владимирович, аспирант кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Ридный Ярослав Максимович, к.ф.-м.н., доцент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Соколинский Леонид Борисович, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Старков Артем Евгеньевич, аспирант кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Шульгинов Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., доцент кафедры оптоинформатики, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

INTELLIGENT BINOCULAR COMPOUND EYE VISION SYSTEM FOR DETECTING AZIMUTH AND DISTANCE TO OBJECT ON PLANE

© 2025 K.N. Belov¹, E.A. Bibikova^{1,2}, I.V. Buldashev¹, N.D. Kundikova^{1,2}, Y.V. Mukhin^{1,2}, A.N. Nikolaev¹, A.V. Portnov¹, Y.M. Ridnyi¹, L.B. Sokolinsky¹, A.E. Starkov¹, A.A. Shulginov¹

¹South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia),

²Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (st. Amundsen 106, Yekaterinburg, 620016 Russia)

E-mail: belovkn@susu.ru, bibikovaea@susu.ru, buldasheviv@susu.ru, kundikovand@susu.ru,
mukhinyv@susu.ru, nikolaevan@susu.ru, portnovav@susu.ru, imridnyi@susu.ru,
leonid.sokolinsky@susu.ru, starkovae@susu.ru, shulginovaa@susu.ru

Received: 10.03.2025

The article is devoted to the prototype of an artificial binocular compound eye vision system for detecting the azimuth and distance to an object on a plane using an artificial neural network. A analytical review of modern distance and azimuth detection systems based on active and passive sensors is given. An intelligent binocular vision system is proposed, which is a passive optical sensor that allows you to determine the azimuth and distance to a round object of arbitrary size, emitting in the visible or infrared ranges of the electromagnetic spectrum. The general architecture of the compound eye vision system is considered. The main structural elements of the system are: an optical module, a hardware and software controller and a neural network module. The optical module uses a pair of lenses to convert the light signal from the object into two pixel Fourier images, which are fed to the input of the hardware and software controller. The controller performs primary processing of pixel Fourier images and converts them into two bit masks, the elements of which correspond to separate facets (each facet integrates four adjacent columns of the pixel image). The resulting bit masks are fed into a neural network module, which, based on their analysis, determines the coordinates of the object in the form of distance and azimuth.

Keywords: compound eye vision, optical model, distance and azimuth detection, CCD image sensor, neural network model, prototype.

FOR CITATION

Belov K.N., Bibikova E.A., Buldashev I.V., *et al.* Intelligent Binocular Compound Eye Vision System for Detecting Azimuth and Distance to Object on Plane. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 5–29. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse250101.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Ben-Ari M., Mondada F. Elements of robotics. Springer Nature, 2017. 308 p. DOI: [10.1007/978-3-319-62533-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1).
2. Mahajan A., Walworth M. 3D position sensing using the differences in the time-of-flights from a wave source to various receivers. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 2001. Vol. 17, no. 1. P. 91–94. DOI: [10.1109/70.917087](https://doi.org/10.1109/70.917087).

3. Journet B.A., Poujouly S. High-resolution laser rangefinder based on a phase-shift measurement method. Three-Dimensional Imaging, Optical Metrology, and Inspection IV. Vol. 3520 / ed. by K.G. Harding, D.J. Svetkoff, K. Creath, J.S. Harris. International Society for Optics, Photonics. SPIE, 1998. P. 123–132. DOI: [10.1117/12.334326](https://doi.org/10.1117/12.334326).
4. Zhang C., Lindner S., Antolovic I.M., *et al.* A 30-frames/s, 252 × 144 SPAD Flash LiDAR With 1728 Dual-Clock 48.8-ps TDCs, and Pixel-Wise Integrated Histogramming. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2018. Vol. 54, no. 4. P. 1137–1151. DOI: [10.1109/JSSC.2018.2883720](https://doi.org/10.1109/JSSC.2018.2883720).
5. Bamji C., Godbaz J., Oh M., *et al.* A Review of Indirect Time-of-Flight Technologies. IEEE Transactions on Electron Devices. 2022. Vol. 69, no. 6. P. 2779–2793. DOI: [10.1109/TED.2022.3145762](https://doi.org/10.1109/TED.2022.3145762).
6. Dorsch R.G., Häusler G., Herrmann J.M. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. Appl. Opt. 1994. Mar. Vol. 33, no. 7. P. 1306–1314. DOI: [10.1364/AO.33.001306](https://doi.org/10.1364/AO.33.001306).
7. Liebe C.C., Coste K. Distance Measurement Utilizing Image-Based Triangulation. IEEE Sensors Journal. 2013. Vol. 13, no. 1. P. 234–244. DOI: [10.1109/JSEN.2012.2212428](https://doi.org/10.1109/JSEN.2012.2212428).
8. Bondžulić B.P., Mitrović S.T., Barbarić Ž.P., Andrić M.S. A comparative analysis of three monocular passive ranging methods on real infrared sequences. Journal of Electrical Engineering. 2013. Vol. 64, no. 5. P. 305–310. DOI: [10.2478/jee-2013-0044](https://doi.org/10.2478/jee-2013-0044).
9. Li L. Building an accurate 3D model of a circular feature for robot vision. Opto-Electronics Review. 2012. Vol. 20. P. 120–125. DOI: [10.2478/s11772-012-0017-y](https://doi.org/10.2478/s11772-012-0017-y).
10. Jüngel M., Mellmann H., Spranger M. Improving vision-based distance measurements using reference objects. RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI 11. Vol. 5001. Springer, 2008. P. 89–100. DOI: [10.1007/978-3-540-68847-1_8](https://doi.org/10.1007/978-3-540-68847-1_8).
11. Geidarov P. Algorithm for determining the position and size of objects based on image analysis. Computer Optics. 2011. Vol. 35, no. 2. P. 275–280. (in Russian).
12. Witus G., Hunt S. Monocular visual ranging. Unmanned Systems Technology X. Vol. 6962. SPIE, 2008. P. 38–44. DOI: [10.1117/12.778686](https://doi.org/10.1117/12.778686).
13. Zuev S.V. Monostatic method for measuring the distance to object, its direction and movement speed. 2008. (in Russian).
14. Lumsdaine A., Georgiev T. The focused plenoptic camera. 2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP). IEEE, 2009. P. 1–8. DOI: [10.1109/ICCPHOT.2009.5559008](https://doi.org/10.1109/ICCPHOT.2009.5559008).
15. Chen Y., Jin X., Dai Q. Distance measurement based on light field geometry and ray tracing. Optics Express. 2017. Vol. 25, no. 1. P. 59–76. DOI: [10.1364/OE.25.000059](https://doi.org/10.1364/OE.25.000059).
16. Heinze C., Spyropoulos S., Hussmann S., Perwass C. Automated robust metric calibration algorithm for multifocus plenoptic cameras. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2016. Vol. 65, no. 5. P. 1197–1205. DOI: [10.1109/TIM.2015.2507412](https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2507412).
17. Sardemann H., Maas H.-G. On the accuracy potential of focused plenoptic camera range determination in long distance operation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 114. P. 1–9. DOI: [10.1016/j.isprsjprs.2016.01.012](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.012).

18. Mahammed M.A., Melhum A.I., Kochery F.A. Object distance measurement by stereo vision. *International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT)*. 2013. Vol. 2, no. 2. P. 05–08.
19. Jeong C.-J., Park G.-M. Real-time Auto Tracking System using PTZ Camera with DSP. *International Journal of Advanced Smart Convergence*. 2013. Vol. 2, no. 1. P. 32–35. DOI: [10.7236/IJASC.2013.2.1.032](https://doi.org/10.7236/IJASC.2013.2.1.032).
20. Starkov A.E., Sokolinsky L.B. Building 2D Model of Compound Eye Vision for Machine Learning. *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 2. DOI: [10.3390/math10020181](https://doi.org/10.3390/math10020181).
21. Biewald L. Experiment Tracking with Weights and Biases. 2020. URL: <https://docs.wandb.ai/>.
22. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. *Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning)*. MIT Press, 2016. 800 p. URL: <http://www.deeplearningbook.org>.
23. Willmott C.J., Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*. 2005. Vol. 30, no. 1. P. 79–82. DOI: [10.3354/CR030079](https://doi.org/10.3354/CR030079).
24. Bisong E. *Building Machine Learning and Deep Learning Models on Google Cloud Platform*. Apress, 2019. 709, XXIX p. DOI: [10.1007/978-1-4842-4470-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8).
25. Myttenaere A., Golden B., Rossi F. Mean Absolute Percentage Error for regression models. *Neurocomputing*. 2016. Vol. 192. P. 38–48. DOI: [10.1016/J.NEUCOM.2015.12.114](https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2015.12.114).
26. Barten A.P. The coefficient of determination for regression without a constant term. *The Practice of Econometrics. International Studies in Economics and Econometrics*. Vol. 15 / ed. by R. Heijmans, H. Neudecker. Springer, 1987. P. 181–189. DOI: [10.1007/978-94-009-3591-4_12](https://doi.org/10.1007/978-94-009-3591-4_12).

ИНТЕГРАЦИЯ В РЕЛЯЦИОННУЮ СУБД СРЕДСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОПУСКОВ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© 2025 А.А. Юртин

Южно-Уральский государственный университет
(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: iurtinaa@susu.ru

Поступила в редакцию: 15.10.2024

В статье рассмотрена проблема интеграции восстановления временных рядов в реляционную СУБД. Предложен метод ImputeDB, обеспечивающий внедрение нейросетевых моделей восстановления пропусков в реальном времени в СУБД PostgreSQL. Восстановление пропусков осуществляется с помощью триггеров (храняемых функций, автоматически выполняемые ядром СУБД при наступлении события вставки новых данных). При активации триггера пропущенные значения заменяются синтетическими, генерируемыми обученной нейросетевой моделью. Используя предложенный метод, прикладной программист базы данных может внедрить процесс восстановления пропущенных значений в стандартный цикл обработки временных рядов, не прибегая к сторонним сервисам. Предложенный метод включает набор следующих программных компонентов, реализованных как пользовательские функции (UDF, user-defined functions) на языках Python и PL/Python: Конструктор триггеров, Менеджер моделей, Хранилище моделей и Восстановитель. Конструктор триггер используется для создания триггеров, которые автоматически выполняют восстановление пропущенных значений в вставляемых данных. Менеджер моделей отвечает за обучение нейросетевых моделей. Хранилище моделей используется для сохранения моделей в файловом хранилище. Восстановитель, в свою очередь, синтезирует пропущенные значения с помощью обученных моделей. В исследовании были проведены эксперименты для оценки производительности метода ImputeDB. В ходе экспериментов измерялось время обработки вставки данных с автоматическим восстановлением пропусков в зависимости от размерности временного ряда. Эксперименты проводились в двух сценариях (одиночная и множественная вставка). В качестве моделей восстановления использовались нейросетевые методы с различными архитектурами, включая рекуррентные нейросети, автоэнкодеры и трансформеры. Результаты экспериментов продемонстрировали, что в условиях увеличения размерности временного ряда, роста накладных расходов на сетевые запросы и передачу данных, ImputeDB показывает наилучшую производительность. В частности, система обеспечила прирост эффективности на 22.5% по сравнению с аналогом, при этом сохраняя точность восстановления используемых методов.

Ключевые слова: временной ряд, СУБД, PostgreSQL, восстановление пропущенных значений, нейронные сети.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Юртин А.А. Интеграция в реляционную СУБД средств восстановления пропусков временных рядов в режиме реального времени // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2025. Т. 14, № 1. С. 30–46. DOI: 10.14529/cmse250102.

Введение

Анализ временных рядов играет ключевую роль в различных областях, включая финансы [1], мониторинг сложных технических систем [2] и анализ потребительского спроса [3]. Рост объемов данных временных рядов и сложность их анализа делают базы данных неотъемлемым инструментом для хранения и обработки таких данных. Современные базы данных позволяют эффективно управлять временными рядами, предоставляя возможности для их масштабирования, организации и анализа. В последние годы активно исследуется интеграция методов интеллектуального анализа временных рядов непосредственно в систе-

мы управления базами данных (СУБД) [4][5]. Различные исследования предлагают способы решения задач анализа временных рядов: поиск аномалий [6], вычисление матричного профиля [7], прогноз и восстановление значений, и др. Например, базы данных ориентированные на хранение временных рядов, такие как TimeTravel [8], F2DB [9], tspDB [10], RecovDB [11] и др., используют различные аналитические методы для прогноза новых и восстановления пропущенных данных временных рядов.

Однако нейросетевые модели демонстрируют лучшую точность в задачах восстановления временных рядов по сравнению с традиционными методами. Одной из СУБД, внедряющей в работу баз данных глубокое обучение, является Lindorm TSDB [6]. СУБД позволяет производить обнаружение аномалий и прогнозирование временных рядов. Однако набор поддерживаемых моделей ограничен базовыми алгоритмами (ARIMA [12], DeepAR [13] и TFT [14]), которые уступают более передовым аналогам по точности.

Используя различные архитектуры (рекуррентные [15][16], автоэнкодеры [17], трансформеры [18][19] и др. [20][21]), модели способны эффективно обрабатывать сложные зависимости в данных. Применение нейронных сетей позволяет учитывать корреляции между различными временными рядами, повышая точность восстановления. В отличие от простых статистических методов (например, интерполяции или использования среднего значения), нейросетевые решения адаптируются к уникальным особенностям временного ряда. Сложные модели глубокого обучения в основном не интегрируются в системы баз данных. Восстановление данных выполняется вне базы данных с использованием сторонних сервисов до их вставки в таблицу. Процесс может включать извлечение данных, передачу на обработку, восстановление пропущенных значений и возврат в базу данных. Одна из проблем такого подхода — дополнительные накладные расходы связанные с пересылкой данных. Данные проходят через несколько систем, что увеличивает общее время обработки и усложняет управление инфраструктурой. Постоянный обмен данными между серверами замедляет процесс обработки и создает дополнительные требования к пропускной способности сети, что может стать узким местом в высоконагруженных системах. Задержки, возникающие при передаче больших объемов информации, особенно критичны для задач, требующих оперативного восстановления временных рядов. Необходимость интеграции нескольких сервисов усложняет инфраструктуру, повышает риски сбоев и затрудняет контроль качества восстановления. Когда скорость и точность обработки данных играют ключевую роль, такие ограничения становятся значимым фактором, влияющим на эффективность.

В данном исследовании предложен метод ImputeDB, позволяющий внедрять нейросетевые модели восстановления временных рядов в режиме реального времени в качестве составных частей СУБД PostgreSQL. Для внедрения используются встроенные триггеры, которые активируются при вставке новых данных. Метод реализуется как набор пользовательских функций (UDF) на языках Python и PL/Python. Для реализации предложенного метода предполагается наличие следующих компонентов. Конструктор, который создает триггеры для таблиц, используя параметры модели, таблицы и размер окна. Менеджер, отвечающий за подготовку данных, обучение моделей, их сохранение и загрузку из хранилища. Хранилище, которое реализуется как файловое хранилище, осуществляет извлечение моделей. Восстановитель, использующий модели для генерации синтетических значений, заменяющих пропуски. Для подтверждения эффективности предложенного метода, были проведены вычислительные эксперименты. В экспериментах оценивалась производительность вставки данных при восстановлении пропусков с использованием разных нейросете-

вых методов. В ходе экспериментов предложенный метод сравнивался с внешним сервисом, использующим базу данных Redis. Изучалось влияние числа координат, объема вставляемых данных и числа пользователей на производительность.

Статья организована следующим образом. В разделе 1 представлен новый метод внедрения моделей машинного обучения в СУБД PostgreSQL для восстановления временных рядов. Результаты вычислительных экспериментов, исследующих эффективность предложенного метода, приведены в разделе 2. Заключение содержит сводку полученных результатов и направления будущих исследований.

1. Внедрение моделей машинного обучения в СУБД PostgreSQL для восстановления временных рядов

1.1. Формальные определения и обозначения

Одномерный временной ряд представляет собой хронологически упорядоченную последовательность вещественных значений:

$$T = \{t_i\}_{i=1}^n, \quad t_i \in \mathbb{R}. \quad (1)$$

Длина временного ряда, n , обозначается как $|T|$.

Подпоследовательность $T_{i,m}$ одномерного временного ряда T — это непрерывный промежуток из m элементов ряда, начиная с i -го элемента:

$$T_{i,m} = \{t_k\}_{k=i}^{i+m-1}, \quad 1 \leq i \leq n - m + 1, \quad 3 \leq m \ll n. \quad (2)$$

Многомерный временной ряд — это набор семантически связанных одномерных временных рядов одинаковой длины, которые синхронизированы во времени. Обозначим размерность многомерного ряда (количество измерений в нем) как d ($d > 1$). Подобно одномерному случаю, многомерный временной ряд, его подпоследовательность и отдельные точки обозначим как \mathbf{T} , $\mathbf{T}_{i,m}$ и \mathbf{t}_i соответственно, и определим их следующим образом:

$$\mathbf{T} = [\{T^{(k)}\}_{k=1}^d]^\top, \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_{i,m} = [\{T_{i,m}^{(k)}\}_{k=1}^d]^\top, \quad (4)$$

$$\mathbf{t}_i = [\{t_i^{(k)}\}_{k=1}^d]^\top. \quad (5)$$

1.2. Архитектура предлагаемого решения.

Предполагается, что хранение временного ряда \mathbf{T} в СУБД организовано следующим образом. Каждая i -я многомерные точки \mathbf{t}_i представлена в виде отдельной записи в реляционной таблице, содержащей следующие столбцы: порядковый номер точки, отметка времени и d вещественных атрибутов. Структура таблицы обладает следующими свойствами. Каждый из d атрибутов соответствует одному из измерений многомерной точки. Все строки таблицы отсортированы по времени и не содержат пропусков. Вставка новых значений в таблицу осуществляется последовательно с равными временными интервалами. Каждая операция вставки добавляет в таблицу одну многомерную точку. Предполагается, что в СУБД обладает следующими свойствами. В СУБД реализован механизм триггеров. Данный механизм представляет собой встроенный инструмент, обеспечивающий автоматическое выполнение заданных процедур при возникновении событий, связанных с изме-

нением данных в таблице [22]. В СУБД поддерживается вызов PL/Python, позволяющий использовать язык Python для создания хранимых процедур и функций.

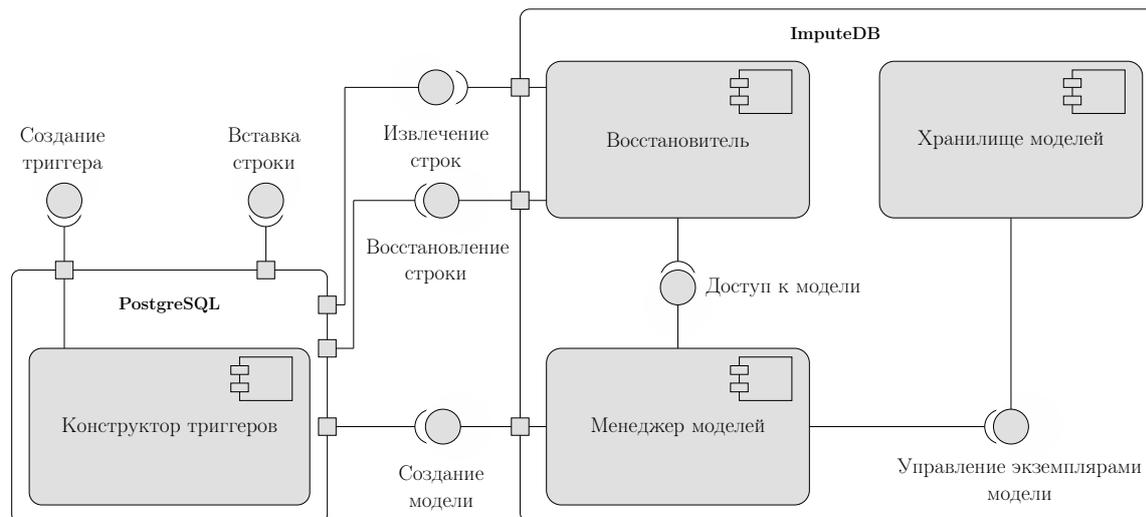


Рис. 1. Архитектура ImputeDB

Для внедрения нейросетевых моделей восстановления временных рядов в реляционные СУБД предлагается расширение ImputeDB, архитектура которого представлена на рис. 1. Процесс восстановления пропущенных значений реализуется с использованием механизма триггеров. При добавлении новой многомерной точки активируется триггер, в результате работы которого отсутствующие значения заменяются на синтетические данные, генерируемые обученной моделью восстановления. Предлагаемое расширение ImputeDB включает несколько ключевых компонентов, обеспечивающих управление моделями, их хранение и процесс восстановления. *Менеджер моделей* отвечает за полный жизненный цикл нейросетевых моделей, решая следующие задачи: создание, обучение и обновление нейросетевых моделей временного ряда. Данный компонент предоставляет интерфейс управления экземплярами, позволяя остальным компонентам системы запрашивать уже обученные модели для дальнейшего их применения. Обученные модели передаются в *Хранилище моделей*, которое отвечает за их долговременное хранение. Хранение реализуется путем записи данных в дисковое пространство, обеспечивая быстрый доступ к ним при необходимости. Восстановление пропущенных значений выполняется компонентом *Восстановитель*. Данный компонент системы принимает запросы на восстановление строк. После получения запроса на восстановление многомерной точки ряда T компонент *Восстановитель* выполняет следующие действия. Компонент запрашивает у *Менеджера моделей* обученную для ряда T модель. Далее *Восстановитель* выгружает из базы данных подпоследовательность $T_{n-m+1, n}$, представляющую собой $m - 1$ предыдущих строк восстанавливаемого ряда. Используя полученную модель, *Восстановитель* генерирует синтетические данные.

Для работы ImputeDB в исходной СУБД создается дополнительный компонент *Конструктор триггеров*. Данный компонент представляет собой хранимую UDF-процедуру, которая при вызове формирует и регистрирует триггеры, необходимые для реализации предлагаемого метода в СУБД. Сформированные триггеры активируются при вставке новых значений в таблицу. В момент их срабатывания выполняется обращение к интерфейсу *Восстановителя*, который отвечает за восстановление пропущенных данных в добавленной строке.

1.3. Реализация компонентов

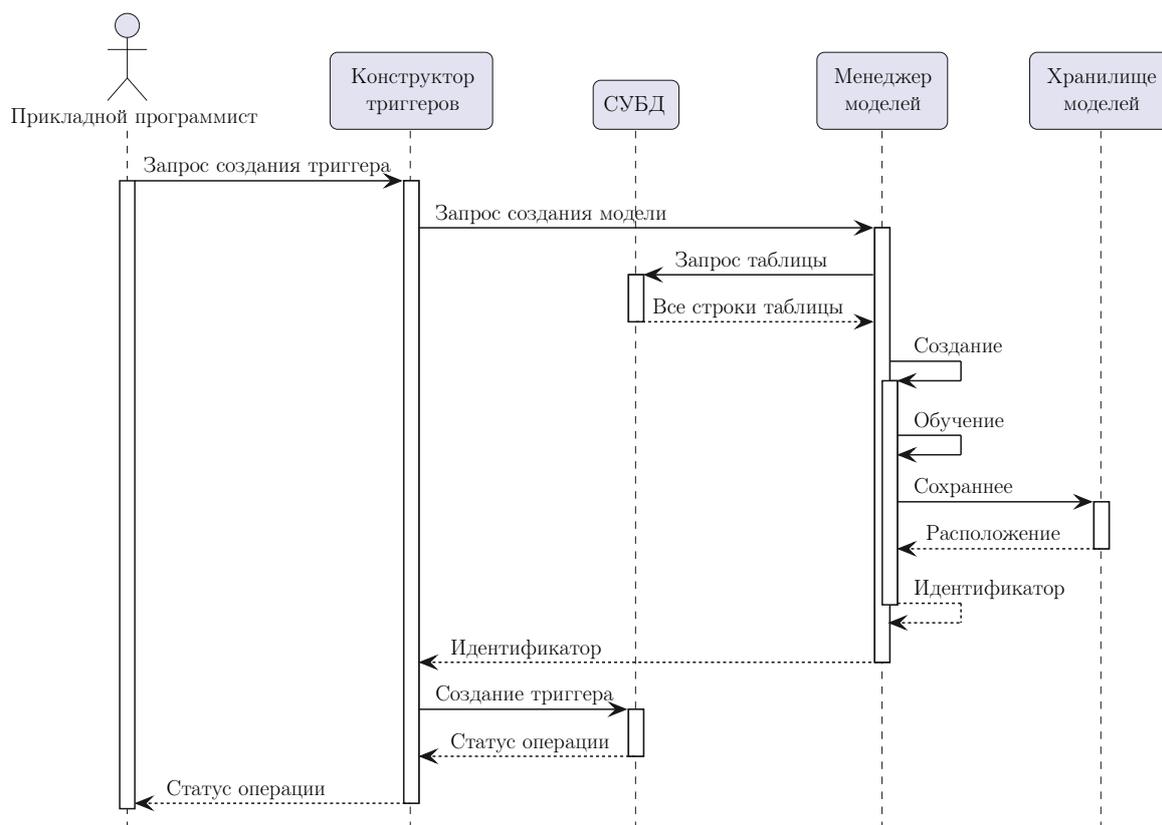


Рис. 2. Диаграмма последовательности создание триггера

На рис. 2 представлен процесс создания триггера. Для интеграции процесса восстановления данных прикладной программист отправляет запрос *Конструктору триггеров*, указывая необходимые параметры: название модели восстановления, целевую таблицу, содержащую временной ряд T и длину подпоследовательности m . *Конструктору триггеров* реализуется как набор пользовательских функций (UDF, user-defined functions), которые создают триггер для обработки событий вставки новой точки в таблицу. После получения запроса *Конструктор триггеров* формирует запрос для *Менеджера моделей*. Получив запрос, *Менеджера моделей* инициирует подготовку модели. *Менеджер моделей* выгружает все n строк временного ряда T из таблицы СУБД, указанной в запросе. Извлеченный временной ряд подвергается предварительной обработке и в дальнейшем используется для формирования обучающей выборки. Во время предварительной обработки ряда последовательно выполняются следующие операции: нормализация, разделение ряда на подпоследовательности фиксированной длины m и разделение подпоследовательностей на обучающую и тестовую выборки. В качестве нормализации используется минимаксная нормализация, которая приводит данные в каждом измерении к диапазону $[0, 1]$ и определяется следующим образом:

$$\hat{t}_i^{(k)} = \frac{t_i^{(k)} - \min_{1 \leq j \leq n} t_j^{(k)}}{\max_{1 \leq j \leq n} t_j^{(k)} - \min_{1 \leq j \leq n} t_j^{(k)}}, \quad 1 \leq k \leq d. \quad (6)$$

В зависимости от выбранной модели в процесс подготовки данных могут включаться различные дополнительные этапы предварительной обработки. Например, для моделей

SANNI [23] и SAETI [23] предварительная обработка должна включать выполнение алгоритма PSF [24], который реализует поиск типичных подпоследовательностей ряд (сниметов) [25].

Обучающая выборка формируется из нормализованной версии исходного временного ряда T . Обозначим обучающую выборку как $D = \langle X, Y \rangle$, где X и Y представляют собой входные и выходные данные нейросетевых моделей соответственно. Входные данные X представляют собой многомерные подпоследовательности длиной m временного ряда T , у которых последнее значение в каждом измерении было заменено на $NIL = -1$. Выходными данными полагаются последние многомерные точки входных подпоследовательностей до замены на NIL :

$$D_{\text{Reconstructor}} = \{ \langle X, Y \rangle \mid X^{(k)} = T_{i, m-1}^{(k)} \bullet NIL, NIL = -1, \\ Y^{(k)} = t_{i+m}^{(k)}, \\ 1 \leq i \leq n - m + 1, 1 \leq k \leq d \}. \quad (7)$$

Подпоследовательности временного ряда T разделяются на обучающую и тестовую выборки в соотношении 75% и 25% соответственно. После формирования обучающих выборок *Менеджер модели* создает экземпляр модели и иницирует процесс ее обучения. По завершении обучения модель сохраняется в *Хранилище моделей* — централизованном файловом хранилище, предназначенном для хранения всех обученных моделей метода. *Хранилище моделей* генерирует уникальный идентификатор для каждой модели, который представляет собой строку, состоящую из названия таблицы, названия модели и длины подпоследовательности. После сохранения модели ее идентификатор передается обратно в *Конструктор триггеров*. Получив идентификатор, *Конструктор триггеров* формирует SQL-скрипт для сохранения триггера в СУБД, который реагирует на события вставки новых строк в таблицу временного ряда.

На рис. [3] представлена диаграмма последовательности, иллюстрирующая процесс восстановления данных с пропусками. Процесс восстановления пропущенных значений начинается с того, что *Источник данных* иницирует операцию вставки новой строки в таблицу временного ряда T в СУБД. Вставляемая строка может быть представлена как вектор длины m . В случае если хотя бы одно значение отсутствует, СУБД направляет запрос в компонент *Восстановитель* для генерации синтетических значений вместо пропусков. Получив запрос, *Восстановитель* извлекает из СУБД последние $m - 1$ строк таблицы временного ряда. Извлеченные строки формируют подпоследовательность, которая используется как вход модели для восстановления пропущенных значений. Входная строка с пропуском становится m -м элементом этой подпоследовательности.

Сформировав подпоследовательность, *Восстановитель* запрашивает у *Менеджера моделей* модель, которая была обучена на данных временного ряда T . Если запрашиваемая модель не была ранее загружена в оперативную память *Менеджера моделей*, направляется запрос в *Хранилище моделей* для извлечения модели. *Хранилище моделей* извлекает модель из файлового хранилища и передает ее экземпляр обратно *Менеджеру моделей*. После получения модели *Менеджер моделей* передает ее экземпляр в *Восстановитель*. *Восстановитель* применяет модель для восстановления пропущенных значений в строке. Затем восстановленные данные передаются в СУБД, которая выполняет вставку новой строки с восстановленными значениями в таблицу. В завершение СУБД возвращает статус операции, завершая процесс вставки данных.

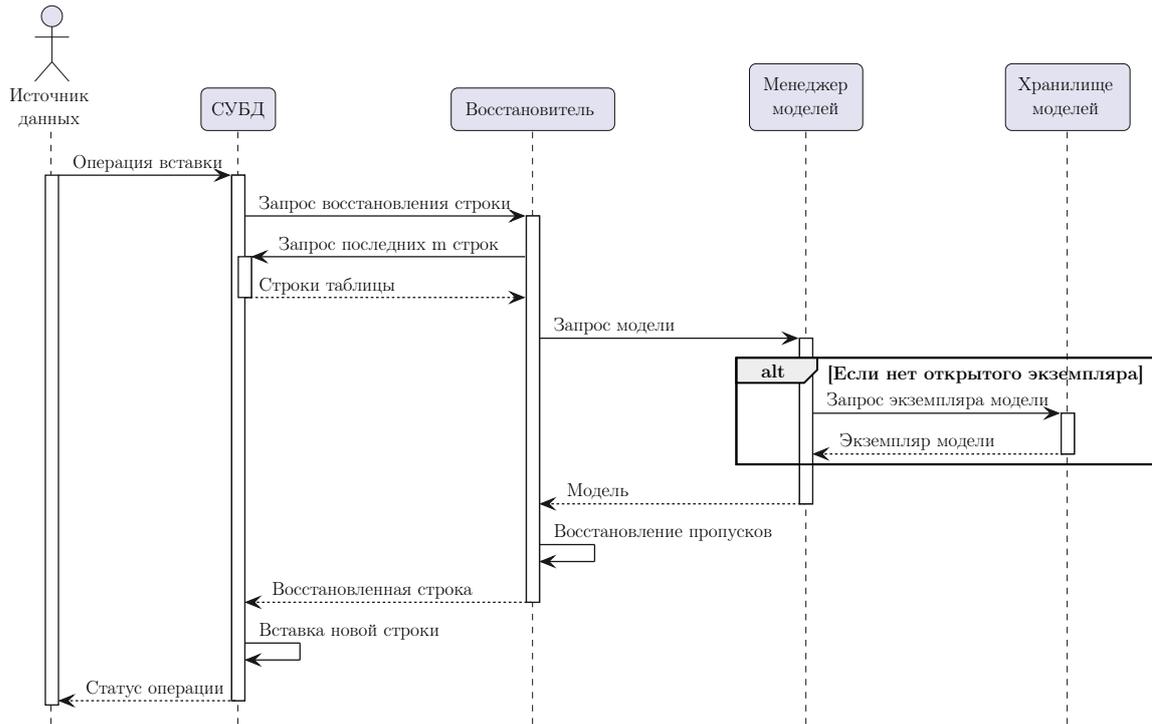


Рис. 3. Диаграмма последовательности восстановления данных с пропусками

```

1  -- Запрос на создание триггера для таблицы TestTable
2  -- на основе среднего за последние 100 точек
3
4  SELECT create_impute_trigger(TestTable, mean, 100);
5
6  -- Последовательность запросов, выполняемых функцией create_impute_trigger
7  -- с заданными параметрами
8
9  SELECT create_model(TestTable, mean, 100);
10
11 CREATE OR REPLACE FUNCTION TestTable_mean_100_impute_func()
12 RETURNS TRIGGER AS func_impute
13 FROM pipy import execute
14 FROM sys import path
15 path.append('/opt/scripts/app')
16 FROM triggers.trigger_helpers import impute_point
17 TD['new'] = impute_point(TD['new'], mean, TestTable, 100)
18 return 'MODIFY'
19 func_impute LANGUAGE plpython3u;
20
21 CREATE TRIGGER TestTable_mean_100_impute_trigger
22 BEFORE INSERT ON TestTable
23 FOR EACH ROW
24 EXECUTE FUNCTION TestTable_mean_100_impute_func();
25

```

Рис. 4. Пример выполнения запроса на создание триггера

На рис. 4 приведен пример выполнения запроса на создание триггера, который будет инициировать восстановление пропущенных значений в таблице *TestTable* с использова-

нием среднего значения последних 100 точек. Прикладной программист инициирует вызов функции `create_impute_trigger`, которая принимает в качестве аргументов следующие параметры: имя таблицы, метод восстановления (в данном случае среднее значение) и размер подпоследовательности $m = 100$. Во время выполнения функции вызывается вспомогательная функция `creat_model(TestTable, mean, 100)`, предназначенная для создания и обучения модель восстановления, которая будет использоваться для восстановления переданный в качестве аргумента метод. После завершения обучения модель сохраняется в хранилище. Для реализации логики восстановления используется расширение PostgreSQL `plpython3u`, которое обеспечивает возможность выполнения кода на языке Python непосредственно внутри базы данных. Затем создается пользовательская функция восстановления, которая будет вызываться триггером. В процессе работы созданной функции происходит вызов процедуры восстановления значений, основанной на использовании обученной модели. Завершающим этапом является создание триггера `TestTable_mean_100_impute_trigger`, который будет активироваться при вставке новых строк в таблицу `TestTable`.

2. Вычислительные эксперименты

Разработанный подход был реализован для свободной СУБД PostgreSQL 13.2. Для исследования эффективности предложенного метода были проведены вычислительные эксперименты на оборудовании Лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ [26]. Сбор результатов осуществлялся на платформе рабочей станции со следующими характеристиками: процессор Intel Xeon Gold 6254 4 ГГц, оперативная память 64 Гб, дисковая память 1 Тб, одно графическое ядро A30.

2.1. Исходные данные

В рамках вычислительных экспериментов была проведена оценка производительности операций вставки данных в таблицы с применением различных нейросетевых методов восстановления пропущенных значений. В ходе эксперимента измерялось время выполнения операции вставки (в секундах) в зависимости от количества измерений временного ряда d . В качестве d рассматривались следующие значения: 10, 25, 50 и 100. Эксперимент проводился в двух различных сценариях. В первом сценарии (одиночная вставка) новые точки данных добавлялись в таблицу из единственного источника. Во втором сценарии (множественная вставка) данные поступали одновременно от 1000 независимых источников в различные таблицы. В качестве моделей восстановления рассматривались нейросетевые методы с различными архитектурами, включая рекуррентные нейросети (BRITS [15] и SANNI [27]), автоэнкодеры (SAETI [23]) и трансформеры (SAITS [18]). Производительность предложенного метода сравнивалась с альтернативным подходом, основанным на использовании внешнего сервиса, предоставляющего API для восстановления пропусков в данных. Внешний сервис использовал идентичные модели восстановления. Для хранения обученных моделей внешний сервис использовал базу данных Redis. В сценарии, предполагающем использование внешнего сервиса, восстановление пропущенных значений выполнялось посредством HTTP-запросов, выполняемых непосредственно перед вставкой данных в основную базу. С целью минимизации влияния сетевых задержек на результаты эксперимента, внешняя сервисная инфраструктура и база данных размещались на одном сервере.

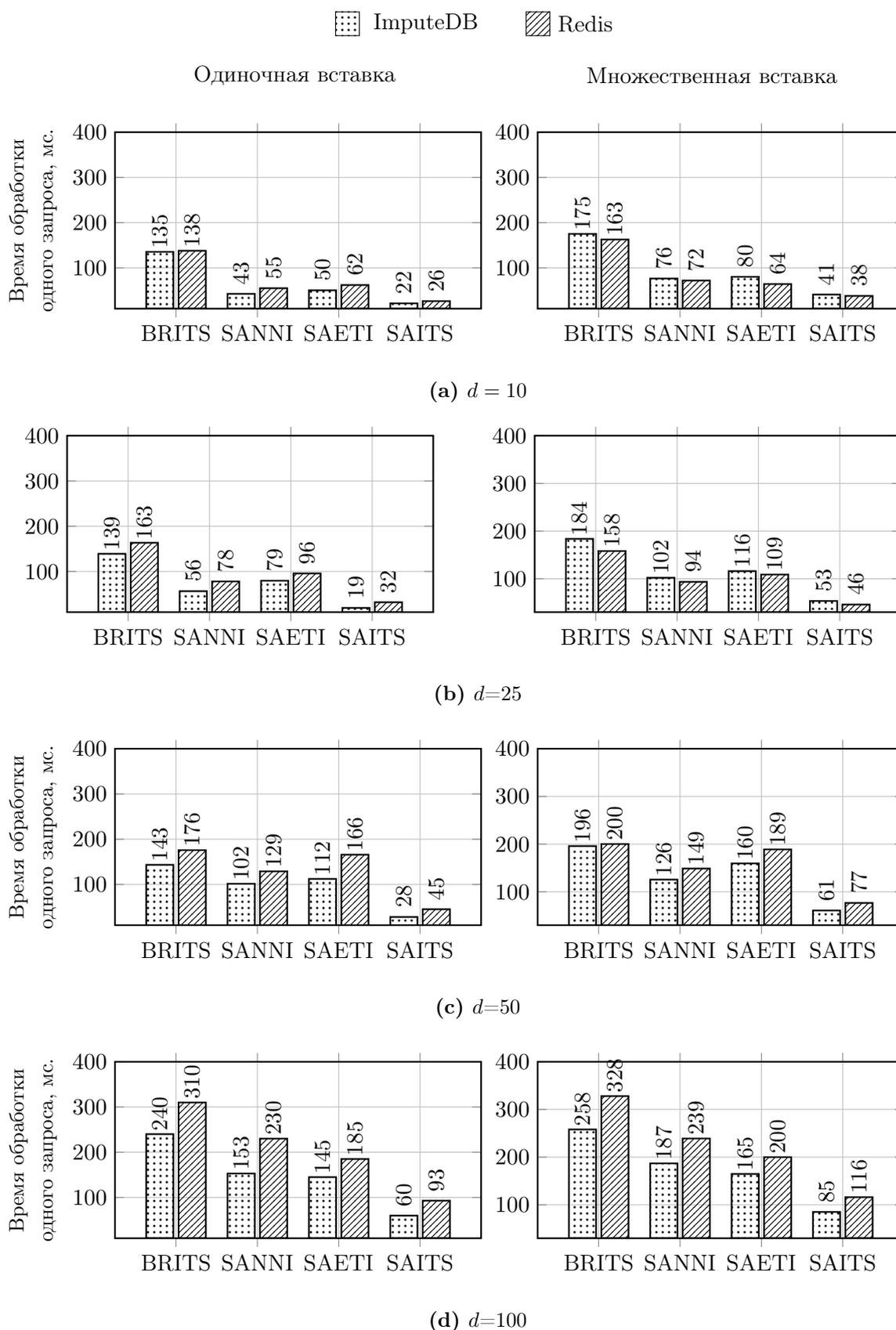


Рис. 5. Сравнение производительность различных способов организации восстановления

2.2. Анализ производительности

На рис. 5 представлено сравнительное исследование производительности различных методов восстановления пропущенных данных в базе данных. Рассмотрим более подробно результаты для одиночной вставки. Для временных рядов с небольшим числом измерений, например при $d = 10$, разница во времени обработки между ImputeDB и Redis минимальна. В данном случае объем передаваемых данных через сеть незначителен, что означает, что накладные расходы на сетевое взаимодействие имеют минимальное влияние. Вследствие этого преимущество, которое демонстрирует предлагаемый метод, незначительное и составляет в среднем 15%. С увеличением размерности временного ряда, например при $d = 25$, разница в производительности становится более выраженной. Для Redis накладные расходы на отправку HTTP-запросов начинают существенно расти, что приводит к увеличению времени обработки. В результате ImputeDB демонстрирует прирост производительности на уровне 19%. При дальнейшем увеличении размерности временного ряда разница в производительности становится еще более заметной: при $d = 50$ достигается прирост на 27%, а при $d = 100$ на 28%. С ростом размерности временного ряда накладные расходы, связанные с сетевыми запросами и процессами сериализации и десериализации данных, оказывают все более значительное влияние на работу сервиса на, использующего Redis. В то время как ImputeDB сохраняет стабильность работы и значительно выигрывает по времени обработки.

Для сценария множественной вставки результаты демонстрируют, что влияние размерности временного ряда на производительность ImputeDB и внешнего сервиса, использующего Redis, различается. При малых значениях d , таких как $d = 10$ и $d = 25$, внешний сервис показывает более высокую эффективность, обеспечивая ускорение обработки на 11% и 12% соответственно. В случае использования Redis, модели загружаются непосредственно из оперативной памяти, что обеспечивает минимальное время доступа. В отличие от этого, в ImputeDB модели хранятся в файловой системе, что приводит к дополнительным задержкам при их извлечении. Однако с увеличением размерности временного ряда эффективность ImputeDB возрастает. Для $d = 50$ производительность ImputeDB оказывается выше на 13.5%, для $d = 100$ преимущество увеличивается до 21.48%. Такой рост обусловлен тем, что при больших d накладные расходы на загрузку моделей из файлового хранилища становятся незначительными в сравнении с задержками, возникающими при передаче данных через сеть во внешнем сервисе.

Таким образом, полученные в ходе экспериментов результаты, демонстрируют зависимость производительности ImputeDB и внешнего сервиса, использующего Redis, от размерности временного ряда и характеристик операции вставки данных. Для малых значений d (например, $d = 10$ и $d = 25$) внешний сервис показывает более высокую эффективность за счет использования оперативной памяти для хранения моделей, что ускоряет их доступ и обработку. Однако при увеличении размерности временного ряда ImputeDB демонстрирует значительное преимущество. Рост значения d приводит к увеличению накладных расходов на обработку HTTP-запросов и передачу данных во внешнем сервисе, тогда как ImputeDB, работая локально, минимизирует сетевые задержки. Средний прирост производительности ImputeDB по сравнению с Redis составляет 22.25%. Возможным направлением дальнейшей оптимизации ImputeDB является интеграция Redis в качестве механизма кэширования моделей. Внедрение Redis позволит снизить накладные расходы на их извлечение и повысить эффективность системы при обработке временных рядов малой размерности, объединяя преимущества локального хранения и быстрого доступа к данным.

Заключение

В данном исследовании затронута проблема интеграции методов восстановления временных рядов в СУБД, которая является актуальной в широком спектре предметных областей. Предложен метод ImputeDB, обеспечивающий интеграцию нейросетевых моделей восстановления пропущенных значений в реляционную СУБД PostgreSQL. Процесс восстановления пропущенных значений в ImputeDB реализуется с использованием триггеров, которые активируются при добавлении новых многомерных точек данных в таблицу. Предложенный метод включает следующие ключевые компоненты: Менеджер моделей, Хранилище моделей и Восстановитель. Менеджер моделей управляет жизненным циклом нейросетевых моделей, включая их создание, обучение и обновление. Обученные модели сохраняются в Хранилище моделей для долговременного хранения. Восстановитель отвечает за обработку запросов на восстановление пропущенных значений, применяя обученные модели для генерации синтетических данных. Процесс создания триггера начинается с запроса прикладного программиста баз данных в Конструктор триггеров, который генерирует соответствующий SQL-скрипт для создания триггера в СУБД. При вставке новых строк в таблицу, если в данных обнаружены пропущенные значения, СУБД инициирует запрос в компонент Восстановитель. Данный компонент извлекает последние строки временного ряда и использует заранее обученную модель для восстановления пропущенных значений. В ходе экспериментов была проведена оценка производительности операций вставки данных при использовании различных нейросетевых методов восстановления пропущенных значений, таких как рекуррентные сети, автоэнкодеры и трансформеры. Проведен сравнительный анализ с внешним сервисом, использующим Redis и те же модели восстановления через API. Результаты показали, что при малых значениях размерности временного ряда внешний сервис демонстрирует меньшее время отклика за счет быстрого извлечения моделей из оперативной памяти. Однако с увеличением размерности временного ряда, ImputeDB показал значительный прирост производительности, так как минимизирует сетевые задержки, работая локально. Средний прирост производительности ImputeDB составляет 22.25%. Будущие направления исследований включают адаптацию метода для работы с другими задачами интеллектуального анализа данных, расширение набора поддерживаемых моделей и улучшения производительности на малых значениях размерности временного ряда за счет использования Redis в качестве кэширования моделей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-21-00465).

Литература

1. Majumdar S., Laha A.K. Clustering and classification of time series using topological data analysis with applications to finance // Expert Syst. Appl. 2020. Vol. 162. P. 113868. DOI: [10.1016/j.eswa.2020.113868](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113868).
2. Kumar S., Tiwari P., Zymbler M.L. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review // J. Big Data. 2019. Vol. 6. P. 111. DOI: [10.1186/S40537-019-0268-2](https://doi.org/10.1186/S40537-019-0268-2).
3. Seyedan M., Mafakheri F. Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting: methods, applications, and research opportunities // J. Big Data. 2020. Vol. 7, no. 1. P. 53. DOI: [10.1186/S40537-020-00329-2](https://doi.org/10.1186/S40537-020-00329-2).

4. Jensen S.K., Pedersen T.B., Thomsen C. Time Series Management Systems: A Survey // IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 2017. Vol. 29, no. 11. P. 2581–2600. DOI: [10.1109/TKDE.2017.2740932](https://doi.org/10.1109/TKDE.2017.2740932).
5. Иванова Е.В., Цымблер М.Л. Обзор современных систем обработки временных рядов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2020. Т. 9, № 4. С. 79–97. DOI: [10.14529/cmse200406](https://doi.org/10.14529/cmse200406).
6. Shen C., Ouyang Q., Li F., *et al.* Lindorm TSDB: A Cloud-native Time-series Database for Large-scale Monitoring Systems // Proc. VLDB Endow. 2023. Vol. 16, no. 12. P. 3715–3727. DOI: [10.14778/3611540.3611559](https://doi.org/10.14778/3611540.3611559).
7. Иванова Е.В., Цымблер М.Л. Внедрение концепции матричного профиля в реляционную СУБД для интеллектуального анализа временных рядов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2021. Т. 10, № 3. С. 72–87. DOI: [10.14529/cmse210305](https://doi.org/10.14529/cmse210305).
8. Khalefa M.E., Fischer U., Pedersen T.B., Lehner W. Model-based Integration of Past & Future in TimeTravel // Proc. VLDB Endow. 2012. Vol. 5, no. 12. P. 1974–1977. DOI: [10.14778/2367502.2367551](https://doi.org/10.14778/2367502.2367551).
9. Fischer U., Rosenthal F., Lehner W. F2DB: The Flash-Forward Database System // IEEE 28th International Conference on Data Engineering (ICDE 2012), Washington, DC, USA (Arlington, Virginia), 1-5 April, 2012 / ed. by A. Kementsietsidis, M.A.V. Salles. IEEE Computer Society, 2012. P. 1245–1248. DOI: [10.1109/ICDE.2012.117](https://doi.org/10.1109/ICDE.2012.117).
10. Agarwal A., Alomar A., Shah D. tspDB: Time Series Predict DB // NeurIPS 2020 Competition and Demonstration Track, 6-12 December 2020, Virtual Event, Vancouver, BC, Canada. Vol. 133 / ed. by H.J. Escalante, K. Hofmann. PMLR, 2020. P. 27–56. Proceedings of Machine Learning Research. URL: <http://proceedings.mlr.press/v133/agarwal21a.html>.
11. Arous I., Khayati M., Cudré-Mauroux P., *et al.* RecovDB: Accurate and Efficient Missing Blocks Recovery for Large Time Series // 35th IEEE International Conference on Data Engineering, ICDE 2019, Macao, China, April 8-11, 2019. IEEE, 2019. P. 1976–1979. DOI: [10.1109/ICDE.2019.00218](https://doi.org/10.1109/ICDE.2019.00218).
12. Ariyo A.A., Adewumi A.O., Ayo C.K. Stock Price Prediction Using the ARIMA Model // UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UKSim 2014, Cambridge, United Kingdom, March 26-28, 2014 / ed. by D. Al-Dabass, A. Orsoni, R.J. Cant, *et al.* IEEE, 2014. P. 106–112. DOI: [10.1109/UKSIM.2014.67](https://doi.org/10.1109/UKSIM.2014.67).
13. Salinas D., Flunkert V., Gasthaus J., Januschowski T. DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks // International Journal of Forecasting. 2020. Vol. 36, no. 3. P. 1181–1191. DOI: [10.1016/j.ijforecast.2019.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.07.001).
14. Lim B., Arik S.Ö., Loeff N., Pfister T. Temporal Fusion Transformers for Interpretable Multi-horizon Time Series Forecasting // CoRR. 2019. Vol. abs/1912.09363. arXiv: [1912.09363](https://arxiv.org/abs/1912.09363). URL: <http://arxiv.org/abs/1912.09363>.

15. Cao W., Wang D., Li J., *et al.* BRITS: Bidirectional Recurrent Imputation for Time Series // Advances in Neural Information Processing Systems 31: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2018, NeurIPS 2018, December 3-8, 2018, Montréal, Canada / ed. by S. Bengio, H.M. Wallach, H. Larochelle, *et al.* 2018. P. 6776–6786. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2018/hash/734e6bfd358e25ac1db0a4241b95651-Abstract.html>.
16. Yoon J., Zame W.R., Schaar M. van der Estimating Missing Data in Temporal Data Streams Using Multi-Directional Recurrent Neural Networks // IEEE Trans. Biomed. Eng. 2019. Vol. 66, no. 5. P. 1477–1490. DOI: [10.1109/TBME.2018.2874712](https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2874712).
17. Fortuin V., Baranchuk D., Rätsch G., Mandt S. GP-VAE: Deep Probabilistic Time Series Imputation // The 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, AISTATS 2020, 26-28 August 2020, Online [Palermo, Sicily, Italy]. Vol. 108 / ed. by S. Chippa, R. Calandra. PMLR, 2020. P. 1651–1661. Proceedings of Machine Learning Research. URL: <http://proceedings.mlr.press/v108/fortuin20a.html>.
18. Du W., Côté D., Liu Y. SAITS: Self-attention-based imputation for time series // Expert Syst. Appl. 2023. Vol. 219. P. 119619. DOI: [10.1016/J.ESWA.2023.119619](https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2023.119619).
19. Oh E., Kim T., Ji Y., Khyalia S. STING: Self-attention based Time-series Imputation Networks using GAN // CoRR. 2022. Vol. abs/2209.10801. DOI: [10.48550/ARXIV.2209.10801](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2209.10801). arXiv: [2209.10801](https://arxiv.org/abs/2209.10801).
20. Fang C., Wang C. Time Series Data Imputation: A Survey on Deep Learning Approaches // CoRR. 2020. Vol. abs/2011.11347. arXiv: [2011.11347](https://arxiv.org/abs/2011.11347). URL: <https://arxiv.org/abs/2011.11347>.
21. Wang J., Du W., Cao W., *et al.* Deep Learning for Multivariate Time Series Imputation: A Survey // CoRR. 2024. Vol. abs/2402.04059. DOI: [10.48550/ARXIV.2402.04059](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2402.04059). arXiv: [2402.04059](https://arxiv.org/abs/2402.04059).
22. Silberschatz A., Korth H.F., Sudarshan S. Database System Concepts, Seventh Edition. McGraw-Hill Book Company, 2020. URL: <https://www.db-book.com/>.
23. Юртин А.А. Восстановление многомерных временных рядов на основе выявления поведенческих шаблонов и применения автоэнкодеров // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2024. Т. 13, № 2. С. 39–55. DOI: [10.14529/cmse240203](https://doi.org/10.14529/cmse240203).
24. Zymbler M., Goglavchev A. Fast summarization of long time series with graphics processor // Mathematics. 2022. Vol. 10, no. 10. P. 1781. DOI: [10.3390/math10101781](https://doi.org/10.3390/math10101781).
25. Imani S., Madrid F., Ding W., *et al.* Introducing time series snippets: A new primitive for summarizing long time series // Data Min. Knowl. Discov. 2020. Vol. 34, no. 6. P. 1713–1743. DOI: [10.1007/s10618-020-00702-y](https://doi.org/10.1007/s10618-020-00702-y).
26. Биленко Р.В., Долганина Н.Ю., Иванова Е.В., Рекачинский А.И. Высокопроизводительные вычислительные ресурсы Южно-Уральского государственного университета // Вычислительные методы и программирование. 2022. Т. 11, № 1. С. 15–30. DOI: [10.14529/cmse220102](https://doi.org/10.14529/cmse220102).
27. Цымблер М.Л., Полонский В.А., Юртин А.А. Об одном методе восстановления пропущенных значений потокового временного ряда в режиме реального времени // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2021. Т. 10, № 4. С. 5–25. DOI: [10.14529/cmse210401](https://doi.org/10.14529/cmse210401).

Юртин Алексей Артемьевич, программист, Лаборатория больших данных и машинного обучения, аспирант кафедры системного программирования, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse250102

INTEGRATION OF MISSING DATA IMPUTATION TOOLS FOR TIME SERIES IN REAL-TIME MODE INTO A RELATIONAL DBMS

© 2025 A.A. Yurtin

South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: iurtinaa@susu.ru

Received: 15.10.2024

The article addresses the problem of integrating time series imputation into relational database management systems (RDBMS). A method called ImputeDB is proposed, which enables the real-time integration of neural network-based imputation models into the PostgreSQL RDBMS. The imputation of missing values is carried out through triggers (stored functions automatically executed by the RDBMS kernel when new data is inserted). When a trigger is activated, missing values are replaced by synthetic ones generated by a neural network model. Using the proposed method, a database application programmer can integrate the process of imputing missing values into the standard time series processing pipeline within the PostgreSQL RDBMS, without relying on external services. The proposed approach includes a set of components implemented as user-defined functions (UDFs) in Python and PL/Python: Trigger Constructor, Model Manager, Model Storage, and Imputer. The Trigger Constructor is used to create triggers that automatically perform imputation of missing values in inserted data. The Model Manager is responsible for training neural network models, while the Model Storage is used to save these models in a file-based repository. The Imputer, in turn, synthesizes missing values using the trained models. Experiments were conducted to evaluate the performance of the ImputeDB method. The experiments measured the processing time of data insertion with automatic gap imputation as a function of the time series dimensionality. Experiments were performed under two scenarios: single and multiple insertions. Neural network-based imputation models with various architectures, including recurrent neural networks, autoencoders, and transformers, were employed. The experimental results demonstrated that under conditions of increasing time series dimensionality and rising overhead from network requests and data transfer, ImputeDB exhibits superior performance. Specifically, the system achieved an efficiency gain of 22.5% compared to another approach, while maintaining the accuracy of the employed imputation methods.

Keywords: time series, DBMS, PostgreSQL, missing value imputation, neural networks.

FOR CITATION

Yurtin A.A. Integration of Missing Data Imputation Tools for Time Series in Real-Time Mode into a Relational DBMS. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 30–46. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse250102.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Majumdar S., Laha A.K. Clustering and classification of time series using topological data analysis with applications to finance. *Expert Syst. Appl.* 2020. Vol. 162. P. 113868. DOI: [10.1016/j.eswa.2020.113868](https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113868).
2. Kumar S., Tiwari P., Zymbler M.L. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. *J. Big Data.* 2019. Vol. 6. P. 111. DOI: [10.1186/S40537-019-0268-2](https://doi.org/10.1186/S40537-019-0268-2).
3. Seyedan M., Mafakheri F. Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting: methods, applications, and research opportunities. *J. Big Data.* 2020. Vol. 7, no. 1. P. 53. DOI: [10.1186/S40537-020-00329-2](https://doi.org/10.1186/S40537-020-00329-2).
4. Jensen S.K., Pedersen T.B., Thomsen C. Time Series Management Systems: A Survey. *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.* 2017. Vol. 29, no. 11. P. 2581–2600. DOI: [10.1109/TKDE.2017.2740932](https://doi.org/10.1109/TKDE.2017.2740932).
5. Ivanova E.V., Zymbler M.L. Overview of Modern Time Series Management Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering.* 2020. Vol. 9, no. 4. P. 79–97. DOI: [10.14529/cmse200406](https://doi.org/10.14529/cmse200406).
6. Shen C., Ouyang Q., Li F., *et al.* Lindorm TSDB: A Cloud-native Time-series Database for Large-scale Monitoring Systems. *Proc. VLDB Endow.* 2023. Vol. 16, no. 12. P. 3715–3727. DOI: [10.14778/3611540.3611559](https://doi.org/10.14778/3611540.3611559).
7. Ivanova E.V., Zymbler M.L. Embedding of the Matrix Profile Concept Into a Relational DBMS for Time Series Mining. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering.* 2021. Vol. 10, no. 3. P. 72–87. DOI: [10.14529/cmse210305](https://doi.org/10.14529/cmse210305).
8. Khalefa M.E., Fischer U., Pedersen T.B., Lehner W. Model-based Integration of Past & Future in TimeTravel. *Proc. VLDB Endow.* 2012. Vol. 5, no. 12. P. 1974–1977. DOI: [10.14778/2367502.2367551](https://doi.org/10.14778/2367502.2367551).
9. Fischer U., Rosenthal F., Lehner W. F2DB: The Flash-Forward Database System. *IEEE 28th International Conference on Data Engineering (ICDE 2012)*, Washington, DC, USA (Arlington, Virginia), 1-5 April, 2012 / ed. by A. Kementsietsidis, M.A.V. Salles. IEEE Computer Society, 2012. P. 1245–1248. DOI: [10.1109/ICDE.2012.117](https://doi.org/10.1109/ICDE.2012.117).
10. Agarwal A., Alomar A., Shah D. tspDB: Time Series Predict DB. *NeurIPS 2020 Competition and Demonstration Track*, 6-12 December 2020, Virtual Event, Vancouver, BC, Canada. Vol. 133 / ed. by H.J. Escalante, K. Hofmann. PMLR, 2020. P. 27–56. *Proceedings of Machine Learning Research*. URL: <http://proceedings.mlr.press/v133/agarwal21a.html>.
11. Arous I., Khayati M., Cudré-Mauroux P., *et al.* RecovDB: Accurate and Efficient Missing Blocks Recovery for Large Time Series. *35th IEEE International Conference on Data Engineering, ICDE 2019*, Macao, China, April 8-11, 2019. IEEE, 2019. P. 1976–1979. DOI: [10.1109/ICDE.2019.00218](https://doi.org/10.1109/ICDE.2019.00218).

12. Ariyo A.A., Adewumi A.O., Ayo C.K. Stock Price Prediction Using the ARIMA Model. UKSim-AMSS 16th International Conference on Computer Modelling and Simulation, UK-Sim 2014, Cambridge, United Kingdom, March 26-28, 2014 / ed. by D. Al-Dabass, A. Orsoni, R.J. Cant, *et al.* IEEE, 2014. P. 106–112. DOI: [10.1109/UKSIM.2014.67](https://doi.org/10.1109/UKSIM.2014.67).
13. Salinas D., Flunkert V., Gasthaus J., Januschowski T. DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks. *International Journal of Forecasting*. 2020. Vol. 36, no. 3. P. 1181–1191. DOI: [10.1016/j.ijforecast.2019.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.07.001).
14. Lim B., Arik S.Ö., Loeff N., Pfister T. Temporal Fusion Transformers for Interpretable Multi-horizon Time Series Forecasting. *CoRR*. 2019. Vol. abs/1912.09363. arXiv: [1912.09363](https://arxiv.org/abs/1912.09363). URL: <http://arxiv.org/abs/1912.09363>.
15. Cao W., Wang D., Li J., *et al.* BRITS: Bidirectional Recurrent Imputation for Time Series. *Advances in Neural Information Processing Systems 31: Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2018, NeurIPS 2018, December 3-8, 2018, Montréal, Canada* / ed. by S. Bengio, H.M. Wallach, H. Larochelle, *et al.* 2018. P. 6776–6786. URL: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2018/hash/734e6bfd358e25ac1db0a4241b95651-Abstract.html>.
16. Yoon J., Zame W.R., Schaar M. van der Estimating Missing Data in Temporal Data Streams Using Multi-Directional Recurrent Neural Networks. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 2019. Vol. 66, no. 5. P. 1477–1490. DOI: [10.1109/TBME.2018.2874712](https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2874712).
17. Fortuin V., Baranchuk D., Rätsch G., Mandt S. GP-VAE: Deep Probabilistic Time Series Imputation. *The 23rd International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, AISTATS 2020, 26-28 August 2020, Online [Palermo, Sicily, Italy]*. Vol. 108 / ed. by S. Chappa, R. Calandra. PMLR, 2020. P. 1651–1661. *Proceedings of Machine Learning Research*. URL: <http://proceedings.mlr.press/v108/fortuin20a.html>.
18. Du W., Côté D., Liu Y. SAITS: Self-attention-based imputation for time series. *Expert Syst. Appl.* 2023. Vol. 219. P. 119619. DOI: [10.1016/J.ESWA.2023.119619](https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2023.119619).
19. Oh E., Kim T., Ji Y., Khyalia S. STING: Self-attention based Time-series Imputation Networks using GAN. *CoRR*. 2022. Vol. abs/2209.10801. DOI: [10.48550/ARXIV.2209.10801](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2209.10801). arXiv: [2209.10801](https://arxiv.org/abs/2209.10801).
20. Fang C., Wang C. Time Series Data Imputation: A Survey on Deep Learning Approaches. *CoRR*. 2020. Vol. abs/2011.11347. arXiv: [2011.11347](https://arxiv.org/abs/2011.11347). URL: <https://arxiv.org/abs/2011.11347>.
21. Wang J., Du W., Cao W., *et al.* Deep Learning for Multivariate Time Series Imputation: A Survey. *CoRR*. 2024. Vol. abs/2402.04059. DOI: [10.48550/ARXIV.2402.04059](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2402.04059). arXiv: [2402.04059](https://arxiv.org/abs/2402.04059).
22. Silberschatz A., Korth H.F., Sudarshan S. *Database System Concepts*, Seventh Edition. McGraw-Hill Book Company, 2020. URL: <https://www.db-book.com/>.
23. Yurtin A.A. Imputation of Multivariate Time Series Based on the Behavioral Patterns and Autoencoders. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering*. 2024. Vol. 13, no. 2. P. 39–55. DOI: [10.14529/cmse240203](https://doi.org/10.14529/cmse240203).
24. Zymbler M., Goglachev A. Fast summarization of long time series with graphics processor. *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 10. P. 1781. DOI: [10.3390/math10101781](https://doi.org/10.3390/math10101781).

25. Imani S., Madrid F., Ding W., *et al.* Introducing time series snippets: A new primitive for summarizing long time series. *Data Min. Knowl. Discov.* 2020. Vol. 34, no. 6. P. 1713–1743. DOI: [10.1007/s10618-020-00702-y](https://doi.org/10.1007/s10618-020-00702-y).
26. Bilenko R.V., Dolganina N.Y., Ivanova E.V., Rekachinsky A.I. High-performance Computing Resources of South Ural State University. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering.* 2022. Vol. 11, no. 1. P. 15–30. DOI: [10.14529/cmse220102](https://doi.org/10.14529/cmse220102).
27. Zymbler M.L., Polonsky V.A., Yurtin A.A. On One Method of Imputation Missing Values of a Streaming Time Series in Real Time. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering.* 2021. Vol. 10, no. 4. P. 5–25. DOI: [10.14529/cmse210401](https://doi.org/10.14529/cmse210401).

КАМПУС МЕЖДУНАРОДНОГО УРОВНЯ: СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ЦИФРОВЫХ ПЛАТФОРМ ДЛЯ ИМПЛЕМЕНТАЦИИ ИНКЛЮЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В АКАДЕМИЧЕСКУЮ СРЕДУ И ЗА ЕЕ ПРЕДЕЛАМИ

© 2025 Н.И. Шумакова, Е.В. Титова

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: shumakovani@susu.ru, titovaev@susu.ru

Поступила в редакцию: 20.02.2025

Основной гипотезой данного исследования является необходимость цифровизации кампуса международного уровня посредством создания комплексной цифровой платформы на его базе. В качестве компонентов такой платформы предлагаются следующие: внутренняя социальная сеть, образовательные сервисы и юниты, сервисы и юниты специального назначения, информационная панель управления кампусом и онлайн взаимодействия с городом (представителями бизнес-сообщества, индустрий и гражданами). Отталкиваясь от результатов новейших мультидисциплинарных исследований отечественных и зарубежных ученых, авторы доказывают, что внедрение таких компонентов будет способствовать повышению эффективности реализации инклюзивных процессов в академическую среду и за ее пределы, росту престижности и конкурентоспособности бенефициаров, академической мобильности, улучшению психологического благополучия обучающихся, а также привлечению дополнительного финансирования, как самой платформы, так и входящих в межвузовское объединение образовательных учреждений. Новизна проведенного в рамках данной статьи исследования заключается в возможности использования уже существующих отечественных программ для создания работающих в режиме единого окна новых типов многокомпонентных цифровых платформ, функционал которых будет способен удовлетворить ряд потребностей населения, бизнеса и государства, отраженных в национальных и региональных стратегических программах развития.

Ключевые слова: информационные технологии, цифровое образование, инклюзия, цифровые платформы, безбарьерная среда, кампус международного уровня.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Шумакова Н.И., Титова Е.В. Кампус международного уровня: создание комплексных цифровых платформ для имплементации инклюзивных процессов в академическую среду и за ее пределами // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2025. Т. 14, № 1. С. 47–62. DOI: 10.14529/cmse250103.

Введение

В эпоху новых цифровых технологий, когда уровень развития той или иной страны во многом определяется эффективностью их внедрения в ней во все сферы жизни общества и государства [1], очевидным является факт, что реализация любых федеральных проектов должна сопровождаться их интеграцией с процессом цифровизации. Не может составлять исключения и Федеральный проект «Создание сети современных кампусов» (распоряжение Правительства РФ от 16.12.2023 N 3702-р), включающий в себя создание инновационной структуры, культурных объектов, новых практико-ориентированных партнерских программ, сетевых образовательных программ для проведения учебного процесса на территории кампуса и так далее (Распоряжение Правительства РФ от 06.05.2008 N 671-р в ред. от 19.12.2024 «Об утверждении Федерального плана статистических работ» вместе с «Федеральным планом статистических работ»), где ожидаемыми результатами являются

положения, отраженные в Национальном проекте «Наука и университеты» (Указ Президента РФ от 07.09.2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», Указ Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»), такие как повышение конкурентоспособности отечественного образования, устранение кадрового голода, развитие новаторских образовательных программ, обеспечение доступности образования, развитие академической мобильности (как внутренней, так и внешней) и подготовка специалистов в инновационных областях. Ключевым этапом для достижения указанных результатов здесь видится формирование прогрессивной модели объединения высших учебных заведений (далее — ВУЗ), подразумевающее наращивание включенности профессорско-преподавательского состава, обучающихся и третьих лиц (в том числе представителей бизнеса, региональных индустрий и промышленности) как непосредственно в академическую среду, так и в функционирование межвузовского кампуса в нее ее пределов.

Обратившись к результатам предыдущих исследований, можно увидеть, что ученые связывают именно неноминальную (с развитым функционалом, качественным наполнением, включая большой выбор полезных сервисов, и понятным интерфейсом, удобным для работы вне зависимости от наличия или отсутствия особых потребностей у пользователя, в том числе скрытых и связанных с нейроотличностью, в привычном понимании не являющейся ограничением возможностей здоровья [2]) цифровизацию межвузовских объединений с созданием полноценного инклюзивного, безбарьерного пространства с учетом гетерогенной среды [3], то есть ликвидацией социального неравенства и обеспечением равного доступа к образованию, учитывающего нужды обучающихся с особыми потребностями посредством объединения физической и высокотехнологической составляющих [4]. Такой подход соответствует стандартам высокорейтинговых ВУЗов и возводит инклюзию в статус ценности, способной обеспечить рост числа абитуриентов и профессиональных кадров, в то же время, выводя ее за пределы образовательного процесса и акцентируя внимание на общении и взаимодействии [3]. Релевантные научные работы российских ученых в области социологии подтверждают, что студенты ВУЗов в нашей стране испытывают проблемы, связанные с недостаточной включенностью в социальные процессы, что может негативно сказываться как на обучении, так и на их социально-психологическом благополучии в целом [5].

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о необходимости создания комплексных, многокомпонентных цифровых платформ на базе кампусов международного уровня, внутри которых будет развиваться экологичная среда, способствующая дальнейшей имплементации инклюзивных процессов как всеобщей включенности в академические процессы и вне их, что будет способствовать эффективному решению задач, поставленных в перечисленных федеральных проектах, национальных целях развития Российской Федерации (Указ Президента РФ от 21.07.2020 г. № 474 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года»), региональных программах («Стратегия социально-экономического развития Челябинской области на период до 2035 года»), а также в глобальных проектах Организации Объединенных Наций [6] [7], что обуславливает актуальность настоящего исследования. Подтверждением также служит и уже представленный проект цифровизации межвузовского кампуса «Будущее Пармы», где, в отличие от предлагаемой в настоящей статье концепции комплексной цифровой платформы, основной акцент сделан на технические решения, связанные с управлением доступом на территорию, документо-

оборотом, навигацией, информационной безопасностью и иными умными решениями для удовлетворения потребностей ВУЗов-бенефициаров и обучающихся в них, что уже охарактеризовано Заместителем главы Министерства науки высшего образования Российской Федерации Андреем Омельчуком как важный шаг в направлении цифровой трансформации ключевых отраслей, необходимой для достижения текущих задач экономики страны [8].

Целью проведенного исследования является разработка концепции комплексной цифровой платформы межвузовского кампуса международного уровня, позволяющей повысить эффективность имплементации инклюзивных процессов в академическую среду и за ее пределы. Это отвечает стратегическим интересам государства, делая такой кампус инклюзивной организацией с безбарьерной средой, что в свою очередь, способно не только повысить престижность межвузовского объединения, но и повысить его экономическую эффективность [9]. Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) разработать содержание компонентов цифровой платформы межвузовского кампуса;
- 2) предложить способы взаимовыгодного взаимодействия межвузовского объединения с предприятиями и жителями региона на базе цифровой платформы.

В разделе [1] «Компоненты цифровой платформы на базе кампуса международного уровня» доказывается необходимость включения таких компонентов как 1) внутренняя социальная сеть; 2) образовательные сервисы и юниты; 3) сервисы и юниты специального назначения. Отталкиваясь от результатов новейших научных исследований в релевантных областях, авторы доказывают гипотезу, что, с одной стороны, наличие данных компонентов способно повысить экономическую эффективность и конкурентноспособность ВУЗов-бенефициаров, входящих в объединение, с другой — способствовать дальнейшей имплементации инклюзии, включающей решение социально-культурных проблем в гетерогенной среде кампуса мирового уровня и заботу о психологическом благополучии обучающихся, от которого, в том числе, зависит успеваемость студентов и сохранение контингента обучающихся. Особое внимание уделяется возможности выстраивать новые связи внутри межвузовского объединения с целью повышения внутренней академической мобильности и реализации совместных проектов на базе внутренней социальной сети, предназначенной для профессорско-преподавательского состава, обучающихся и иных лиц, аффилированных с ВУЗами-бенефициарами. Отдельный акцент сделан на peer-to-peer обучении и peer-to-peer поддержке в онлайн режиме как формату, наиболее комфортному для молодого поколения.

В разделе [2] «Управление кампуса» рассматриваются способы повышения прозрачности и эффективности в кооперации между ВУЗами-бенефициарами посредством создания информационной панели управления кампусом, предлагаются новые варианты выстраивания взаимоотношений между межвузовским объединением и бизнес-сообществом. Основной гипотезой в данном разделе является двойное назначение цифровой платформы кампуса, вследствие которого она должна приносить пользу не только входящим в него ВУЗам, но также и региону, что невозможно без наращивания прямого взаимодействия с представителями бизнеса и индустрий, а также без предоставления доступа к отдельным ее компонентам населению, что, в свою очередь, создаст дополнительные источники финансирования.

В заключении приводится краткий обзор потенциала многокомпонентной цифровой платформы на базе межвузовского кампуса мирового уровня. Авторы еще раз подчеркивают, что по отдельности предлагаемые компоненты уже внедряются в различных сферах и с применением отечественного программного обеспечения, что указывает на реалистичность воплощения предлагаемой концепции.

1. Компоненты цифровой платформы на базе кампуса международного уровня

1.1. Внутренняя социальная сеть

Первым компонентом такой платформы авторами предлагается сделать внутреннюю социальную сеть. На сегодняшний день в России проведено достаточно исследований, доказывающих, что социальные сети при надлежащем использовании оказывают положительный эффект на образовательный процесс, развитие взаимодействия студентов с профессорско-преподавательским составом для оперативного обмена информацией в режиме реального времени, развития образовательных ресурсов, объединения кадрового потенциала и качество информационной поддержки [10]. Кроме того, социальные сети способны выполнять функцию инструмента реализации образовательных и культурных проектов, разрушать психологические барьеры между обучающимися и обучающими, способствовать установлению полезных связей, социокультурной адаптации (в том числе адаптации иностранцев, студентов с ОВЗ и иных представителей групп, включенных ЮНЕСКО в категории недопредставленных и имеющих особые нужды [11]), развитию опыта сотрудничества посредством взаимодействия в онлайн-чатах. Притом недостатком популярных социальных сетей является отсутствие в них необходимых инструментов для проведения полноценных дистанционных занятий [12]. Посредством работы в социальной сети также может быть организована и проектная деятельность учащихся, в частности, их совместная работа с преподавателями над созданием сетевых образовательных ресурсов, позволяющая обучающимся получать метапредметные компетенции [13]. При этом, ВУЗы, с одной стороны, вынуждены создавать множество аккаунтов во всевозможных социальных сетях и мессенджерах, зачастую не имея в штате соответствующих специалистов по маркетингу, обладающих достаточной компетенцией для продвижения страниц ВУЗа, его институтов и кафедр в условиях их постоянного изменения [14], с другой — текущая массовая блокировка социальных сетей и мессенджеров неизбежно приводит не только к разрывам установленных связей, но и к зачастую невозможной потере материалов (далее — контента). Если мы обратимся к Вконтакте как к единственной разрешенной социальной сети, которая популярна среди молодежи, то увидим, что ее нынешний функционал позволяет вести имиджевую страницу ВУЗа (при условии дополнительного найма кадров, обладающих специальными компетенциями, такими как написание сценариев, режиссура видео-роликов, монтаж, работа с графическими редакторами и т.д.), но не использовать в образовательных целях и/или для распространения научно-образовательных материалов, поскольку формула видимой публикации на сегодняшний день выглядит следующим образом:

$$p = v + m, \quad (1)$$

где

$$v = i + c + d, \quad (2)$$

$$m = t - s. \quad (3)$$

В формуле [1] p — видимость публикации, v и m — визуальная и текстовая составляющие соответственно, где $v > m$ — наперед заданный критерий останова вычислений, поскольку платформа отдает предпочтение визуальному контенту и позволяет продвигать только такой формат. Визуальная составляющая v представляет собой сумму из следующих слагаемых: 1) i — привлекающее внимание изображение; 2) c — короткое видео

(«смешной или интригующий ролик»¹) 3) d — пояснения, размещенные на изображениях по принципу развивающих карточек для малолетних. Текстовая составляющая m вычисляется как разность между непосредственно самим текстовым содержанием t и смысловой нагрузкой s , включающей научно-образовательные материалы и предполагающей наличие длинного текстового сообщения. Тем не менее, приведенную формулу нельзя считать совершенной вследствие непрозрачности действующих алгоритмов, не позволяющих оценить важность того или иного слагаемого. Приведенные же рекомендации представителей платформы лишь позволяют сделать вывод о том, что s ведет к отрицательному значению, то есть убирает публикацию из поля видимости большинства пользователей, включая подписчиков.

Более того, на основании указанных в рекомендациях категорий авторов (музыканты, создатели видео, авторы подкастов, медиа и клиперы) можно заключить, что данная социальная сеть изначально не предназначена для образовательных и академических целей. Дополнительным минусом работы ВУЗа на площадке третьих лиц являются анонимность пользователей, вероятность утечки данных и возможность имперсонализации пользователей, создающие благоприятную среду для кибербуллинга, мошенничества и иных противоправных деяний. Внутренняя социальная сеть при наличии должного функционала, вместо попыток конкурировать с развлекательными материалами и контентом лидеров мнений, позволит объединению ВУЗов работать исключительно на свою целевую аудиторию и сосредоточиться на эффективном достижении собственных целей. На базе такой социальной сети должны быть возможности:

- 1) регистрировать аккаунты индивидуальных пользователей, являющихся абитуриентами, обучающимися, представителями профессорско-преподавательского состава, представителей бизнеса и инфраструктур (заинтересованных в сотрудничестве с межвузовским объединением);
- 2) публиковать контент на зарегистрированной странице с возможностью выбора аудитории (в открытом доступе или только для пользователей межвузовской социальной сети);
- 3) обмениваться сообщениями, писать комментарии и создавать чаты;
- 4) создавать группы для работы над совместными проектами и исследованиями;
- 5) проводить опросы, в том числе анонимные;
- 6) подписываться на персональные страницы и страницы проектов/институтов/кафедр;
- 7) рекомендовать отдельные записи;
- 8) добавлять отдельные записи в избранное;
- 9) автоматически переводить текст на другой язык;
- 10) сообщать о нарушении правил пользования социальной сети и законодательства Российской Федерации.

Важным элементом является предоставление доступа для незарегистрированных пользователей к части публикуемых материалов (публикации об успехах студентов и выпускников, достижениях ВУЗа, его институтов и профессорско-преподавательского состава, уникальности кампуса). При понятном интерфейсе и привлекательном оформлении это будет способствовать повышению репутации и росту интереса к входящим в объединение ВУЗам со стороны потенциальных абитуриентов и иных лиц ¹⁴.

¹См. Карточки — это удобный формат для подачи информации. URL: https://vk.com/wall-76477496_282567.

Положительные результаты выделения академического сегмента в отдельную социальную сеть позволяют вывести опыт развития децентрализованной платформы BlueSky, стремительно набирающей популярность среди представителей академического сообщества со всего мира, научных журналов, университетов, исследовательских институтов и иных организаций [15]. Это обусловлено тем, что она не только дает возможность повышать цитируемость, обмениваться информацией и формировать новые научные сообщества, но также позволяет изолировать себя от дезинформации, материалов деструктивной идеологической направленности, а отсутствие встроенного алгоритма, направленного на создание охватов только для определенных типов контента, разрешает свободно в режиме реального времени делиться результатами исследований, обмениваться научным опытом, тем самым приблизившись к «специализированному месту, где ученые могут общаться друг с другими» [16]. Формула видимости публикации в такой сети будет предельно проста и иметь следующий вид:

$$p = s + u. \quad (4)$$

В формуле (4) видимость публикации p обусловлена двумя факторами: количеством подписчиков s и общим количеством пользователей платформы u . При этом $s > u$ — наперед заданный критерий останова вычислений, поскольку подписчикам публикация видна всегда.

Для создания социальной сети межвузовского объединения имеет смысл изучение опыта использования федеративного протокола [17], что позволит каждому ВУЗу иметь свой собственный сервер, а значит усилит безопасность, распределив риски и ответственность между ними, сохранив притом возможность для их пользователей коммуницировать друг с другом [18]. Использование протокола данного типа также способно одновременно упростить модерацию и повысить ее эффективность [17], что, в свою очередь, должно способствовать психологическому благополучию пользователей платформы благодаря исключению вмешательства алгоритмов автоматического принятия решений и третьих лиц в процесс обмена информацией и распространения материалов [19].

1.2. Образовательные сервисы и юниты

В качестве второго компонента предлагается включить сеть образовательных сервисов и юнитов специального назначения. Для дальнейшей трансформации академической среды в безбарьерную необходимо обеспечить дистанционный доступ обучающимся к открытым лекциям, учебной литературе, научным исследованиям, а также предоставить возможность получения дополнительной квалификации онлайн, в том числе посредством создания совместных онлайн-курсов для дальнейшего их размещения на платформе межвузовского объединения. Среди сегментов платформы важным также представляется учреждение специальных юнитов, направленных на социальную и культурную адаптацию обучающихся.

В рамках доступного образования на платформе должны быть представлены:

- расписание открытых лекций в онлайн и гибридном режимах;
- расписание образовательных мероприятий в онлайн и гибридном режимах;
- записи открытых лекций и других материалов;
- возможность подключения к открытым лекциям и иным мероприятиям;
- возможность создания и размещения учебных и научных материалов;

- возможность записи на программы дополнительного образования и повышения квалификации, предоставляемые либо межвузовским объединением, либо каждым из входящих в него ВУЗов;
- возможность оплаты в случаях, когда она предусмотрена;
- каталог образовательных программ и курсов, доступных для освоения в онлайн формате.

В части безбарьерного распространения знаний и повышения грамотности населения представляет интерес опыт Норвегии. На сегодняшний день все десять ВУЗов королевства входят в единую некоммерческую ассоциацию, в ведении которой находится открытая энциклопедия, где материалы либо создаются научными сотрудниками и преподавателями, либо проходят экспертную оценку, что обуславливает их высокое качество и позволяет использовать в качестве источника знаний. Более того, энциклопедия имеет удобный интерфейс и специальный раздел с адаптированными текстами, доступными для понимания носителям языка, обучающимся младшего возраста и гражданами с ОВЗ [20]. Включение такого сервиса в платформу межвузовского объединения имеет потенциал по продвижению и повышению престижности входящих в него учебных заведений, привлечению абитуриентов, а также к повышению интереса к научным направлениям и проектам ВУЗов-бенефициаров, в том числе к научным работам профессорско-преподавательского состава, работающего над созданием статей для такой энциклопедии на добровольной основе. Основным отличием такой виртуальной энциклопедии от уже существующих проектов, включая РУВИКИ, здесь станет именно «ручная» (без использования технологий искусственного интеллекта) редакционная проверка, запрет на перенос материалов со сторонних ресурсов и исключение анонимности. Это одновременно обеспечит высокое качество представленной в энциклопедии информации и повысит доверие к ней. Для удобства пользователей контент должен быть разделен на тематические секции и быть доступным для поиска как внутреннего, так и внешних поисковых систем.

Еще одним юнитом, направленным на повышение эффективности освоения обучающимися новых навыков и компетенций, способен стать сервис по peer-to-peer обучению, в рамках которого будут формироваться виртуальные классы и проходить различные тренинги. Основываясь на теории социального конструктивизма Выгодского, согласно которой люди генерируют знания и смысл из взаимодействия между опытом и идеями и, следовательно, конструируют свои собственные знания, где в конечном счете обучающийся, не обладающий определенными компетенциями, входит в новую сферу посредством взаимодействия с тем, кто ими обладает. Кроме того, специалисты в области педагогики доказывают, что peer-to-peer помогает снизить уровень тревожности у студентов, способствовать их социализации, а также развитию организационных способностей и ответственного отношения к учебе [21]. Учитывая инновационную направленность межвузовского кампуса, стоит обратить внимание на результаты мультидисциплинарных исследований в области повышения конкурентноспособности учебных заведений посредством внедрения таких новых технологий, как использование метавселенной (виртуальной и дополненной реальности) для дальнейшего устранения барьеров на пути к высшему и дополнительному образованию. Образовательная метавселенная — это тип виртуальной реальности, включающий виртуальные классы, учебные симуляции и виртуальные лаборатории, позволяющие создать динамичную среду обучения, открывающую возможности взаимодействия между обучающимися и обучающими вне зависимости от их местонахождения. Иными словами, конвергенция циф-

рового и человеческого в данном случае открывает новые возможности для эффективного обмена знаниями, приобретения опыта и потенциала научных открытий вне привязки ко времени и пространству [22]. Перенос части учебного процесса, особенно, когда это касается peer-to-peer обучения в цифровую среду имеет большое значение также и вследствие изменений восприятия реальности молодым поколением, которое все чаще характеризуется как «цифровые аборигены», то есть люди, проводящие большое количество времени онлайн и более привыкшие к непрерывному использованию цифровых технологий в своей ежедневной жизни, тогда как взаимодействия офлайн могут вызывать у них дополнительные трудности и препятствовать эффективному обучению [23].

Поскольку межвузовское объединение является новой моделью взаимоотношений в первую очередь между самими ВУЗами, необходимо предусмотреть общий доступ к учебным ресурсам университетов, в том числе библиотечным фондам. К электронным книгам он может быть обеспечен в личном кабинете пользователя и/или посредством ввода универсального идентификационного номера, подтверждающего аффилиацию с одним из входящих в объединение ВУЗов. Здесь же в режиме единого окна пользователь должен иметь возможность поиска и оставления заявки на необходимую литературу, чтобы в дальнейшем ознакомиться с ее физической копией. Пользователям, не имеющим аффилиации с входящими в объединение ВУЗами, доступ может быть открыт за разумную плату, что будет служить дополнительным источником финансирования платформы.

1.3. Сервисы и юниты специального назначения

К сервисам и юнитам специального назначения относятся цифровизированные службы поддержки, без которых невозможно эффективное внедрение инклюзивных процессов в их международном понимании, а именно в создании комфортной и безопасной среды для всех без исключения. В Российской Федерации такие юниты уже активно внедряются в ведущих ВУЗах страны. Например, НИУ ВШЭ запустили цифровую службу поддержки для студентов и абитуриентов с инвалидностью и ОВЗ, в рамках которой работает горячая линия и помощь оказывают специально обученные студенты-ассистенты, оказывающие консультации по широкому ряду вопросов, включая медицинское обслуживание и психологическую поддержку [24]. Стоит отметить, что такой подход признан одним из наиболее эффективных, особенно, когда речь идет о психологическом благополучии молодежи — peer-to-peer психологическая поддержка противодействует стигматизации, позволяет молодым людям общаться друг с другом, делиться опытом, искать и предоставлять информацию, советы и эмоциональную поддержку в привычном для них формате онлайн-общения [25]. Учитывая же гетерогенность среды на кампусе международного уровня, такая поддержка должна предоставляться не только студентам и абитуриентам с ОВЗ и инвалидностью, но и другим инклюзивным группам, таким как иностранные студенты, студенты-беженцы и вынужденные переселенцы, студенты-дети ветеранов военных действий, студенты без попечения родителей и так далее. Как следует из новейших научных исследований в релевантных областях, профилактика, предотвращение психологических расстройств и раннее вмешательство на кампусе тьюторами-ровесниками, которые отражают демографический и культурный фон обучающихся, имеет высокую эффективность, в том числе в области предотвращения нервных срывов и самоубийств среди студентов учебных заведений [26].

Кроме того, поскольку отнесенные к инклюзивным группам студенты нуждаются в социальной, а иногда и культурной адаптации, резонным представляется включение юнитов

для совместного проведения досуга. Это могут быть как виртуальные кинозалы со встроенными чатами для совместного просмотра лицензированного видео-контента, направленного на взаимную социокультурную адаптацию, так и иные юниты, включая площадки для киберспортивных соревнований, участие в которых доступно аффилированным с межвузовским кампусом лицам.

2. Управление кампусом

2.1. Информационная панель управления

В России активно внедряется формат информационных панелей управления регионами, в рамках которых отражаются стратегии развития, результаты стратегического управления, онлайн-сопровождение заседаний и совещаний, размещаются мультимедийные материалы и так далее [27]. Данный формат подходит и для цифровизации управления межвузовским объединением. Исходя из того, что объединение будет иметь общий орган кооперации, оперативная визуализация будет способствовать:

- 1) реализации принципу прозрачности сотрудничества между ВУЗами-бенефициарами;
- 2) созданию и реализации совместных проектов;
- 3) решению задач по управлению;
- 4) предотвращению нетипичных конфликтов, связанных со спецификой модели объединения (конфликт лидерства, конкуренция и т.д.);
- 5) своевременному разрешению конфликтов;
- 6) противодействию недоверия между бенефициарами;
- 7) управлению рисками.

Учитывая, что одним из направлений жизнедеятельности кампуса международного уровня является студенческое самоуправление, ограниченное право доступа к такой информационной панели должно быть предоставлено его органам. В частности, для возможности разработки проектов, связанных с учетом особых нужд обучающихся, которые зачастую оказываются либо скрытыми, либо не до конца понятыми представителями иных возрастных и культурных групп, к которым относятся профессорско-преподавательский состав и руководство ВУЗов.

Ограниченный доступ к информационной панели управления предлагается предоставить партнерам ВУЗов-бенефициаров, в число которых могут быть включены органы местного самоуправления, предприятия и иные лица. Таким образом, они не только получат возможность в режиме реального времени ознакамливаться с релевантной для них информацией, к примеру, относящейся к совместным проектам, но также размещать и удалять собственные разделы. Основной потенциал здесь заключается в оперативном сотрудничестве по принципу «запрос-ответ» для всех сторон: для ВУЗов — возможность получения финансирования конкретных проектов, удовлетворяющих запросы заказчика, а для последнего — своевременное удовлетворение кадрового голода и потребностей в технических и иных разработках.

2.2. Взаимодействие кампуса и города

Обратившись к международному опыту, можно увидеть, что во взаимоотношениях кампус-город город определен как совокупность местных, профессиональных и деловых сообществ, с которыми ВУЗ или объединение ВУЗов выстраивает многосторонние партнерские отношения, выгодные каждой из сторон [28]. Многокомпонентная платформа кампуса

в данном случае должна стать цифровым воплощением таких отношений, в основе которых лежит готовность передаче научного знания внешним потребителям и поиску дополнительных источников финансирования [29]. Развивая дальнейшее стратегическое партнерство между ВУЗами-бенефициарами и бизнес-сообществом, в качестве компонентов платформы могут быть включены:

- 1) корпоративные онлайн учебные центры для переподготовки работников на базе профессионального образования, созданные на коммерческой основе;
- 2) корпоративные онлайн курсы для повышения квалификации работников за счет финансирования заказчика;
- 3) совместные с ВУЗами онлайн конкурсы, тренинги и мастер-классы возможностью дальнейшего трудоустройства отличившихся выпускников [30].

Коммерческое сотрудничество с заказчиками в онлайн формате может также происходить в сфере проведения социологических исследований, тестировании программного обеспечения, этичного обучения искусственного интеллекта и других.

Будучи частью цифрового пространства города, платформа кампуса должна иметь и такое практическое назначение, как возможность создания личных кабинетов для лиц, не аффилированных с межвузовским объединением, с одной стороны, с целью поддержания интереса к высшему образованию, высокого уровня культуры и здоровья населения, с другой — с целью привлечения дополнительного финансирования. За адекватную денежную плату заинтересованным лицам могут быть предоставлены не только, как было указано в пунктах 1.2 и 1.3 доступ к оцифрованным учебным и научным материалам, возможность получить новые знания и освоить необходимые компетенции, поучаствовать в соревнованиях по киберспорту и так далее, но и способы взаимодействия с кампусом в реальности, например, регистрация на спортивные мероприятия.

Заключение

Эффективная реализация проектов создания сети кампусов международного уровня невозможна без их воплощения в цифровом пространстве. При этом, цифровая платформа такого межвузовского объединения должна решать не только технические вопросы, но и стать частью безбарьерной и безопасной среды для студентов, профессорско-преподавательского состава и иных аффилированных лиц. Многообразие компонентов создает:

- 1) потенциал для повышения престижа и конкурентноспособности ВУЗов-бенефициаров;
- 2) повышение экономической эффективности ВУЗов-бенефициаров;
- 3) дополнительные способы взаимной социальной и культурной адаптации обучающихся;
- 4) новые варианты взаимодействия учебных заведений с бизнес сообществами и представителями индустрий;
- 5) новые источники финансирования.

Предложенная в настоящей статье концепция является теоретической и нуждается в проведении дальнейших исследований, направленных на поиск способов ее практического воплощения. Тем не менее, все из предложенных компонентов в той или иной степени уже внедряются по отдельности на территории Российской Федерации, что, во-первых, указывает на реалистичность предлагаемой модели, а, во-вторых, на возможность использования отечественного программного обеспечения в процессе ее реализации.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-20273, <https://rscf.ru/project/24-28-20273/> «Организационно-правовая модель социальной и научно-образовательной инклюзии на базе современных кампусов научной кооперации организаций Челябинской области с использованием новой региональной инфраструктуры научно-образовательной среды (кампуса международного уровня)».

Литература

1. Begishev I.R., Zharova A.K., Zaloilo M.V., Filipova I.A., Shutova A.A. Technological Transformation: Growing Opportunities and Legal Response to Emerging Risks // Journal of Digital Technologies and Law. Dec. 2024. Vol. 4, no. 2. P. 735–740. DOI: [10.21202/jdtl.2024.37](https://doi.org/10.21202/jdtl.2024.37).
2. Hutson J., Hutson P. Digital Inclusion for People with Autism Spectrum Disorders: Review of the Current Legal Models and Doctrinal Concepts // Journal of Digital Technologies and Law. Dec. 2023. Vol. 1, no. 4. P. 851–879. DOI: [10.21202/jdtl.2023.37](https://doi.org/10.21202/jdtl.2023.37).
3. Волосникова Л.М., Загвязинский В.И., Кукуев Е.А., Федина Л.В., Огороднова О.В. Конвергенция концепций академического и инклюзивного совершенства исследовательских университетов // Образование и наука. 2021. Т. 23, № 4. С. 67–69. DOI: [10.17853/1994-5639-2021-4-43-78](https://doi.org/10.17853/1994-5639-2021-4-43-78).
4. Деточенко Л.С. Современные тенденции обеспечения инклюзивности в парадигме высшего образования // Социология. 2022. № 4. С. 145–152.
5. Кантор В.З., Проект Ю.Л. Инклюзивное высшее образование: социально-психологическое благополучие студентов // Образование и наука. 2019. Т. 21, № 2. С. 51–73. DOI: [10.17853/1994-5639-2019-2-51-73](https://doi.org/10.17853/1994-5639-2019-2-51-73).
6. Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: https://ggim.un.org/documents/a_res_71_313.pdf (дата обращения: 20.10.2024).
7. Making Higher Education more inclusive. URL: <https://media.unesco.org/sites/default/files/webform/ed3002/Making%2520Higher%2520Education%2520more%2520inclusive.pdf> (дата обращения: 20.10.2024).
8. В Перми представили проект цифровизации межвузовского кампуса «Будущее Пармы». URL: <https://www.newsko.ru/news/nk-8091141.html> (дата обращения: 20.10.2024).
9. Агентство стратегических инициатив Проект «Открыто для всех». URL: https://asi.ru/upload/docs/openforall1/%D0%9E%D1%82%D0%BA%D1%80%D1%8B%D1%82%D0%BE%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%B2%D1%81%D0%B5%D1%85_2024.pdf (дата обращения: 20.10.2024).
10. Чванова М.С., Храмова М.В., Лыскова В.Ю., Михайлова Д.И., Моргунова А.Ю., Молчанов А.А. Развитие социальных сетей и их интеграция в систему образования России // Образовательные технологии и общество. 2014. Т. 17, № 3. С. 472–493.
11. Policy guidelines on inclusion in education. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000177849_rus (дата обращения: 20.10.2024).
12. Закиева Р.Р., Хадиуллина Р.Р., Худакова Л.В., Ентураева Н.В. Механизмы взаимодействия образования, науки и социальных сетей // Высшее образование сегодня. 2020. № 9. С. 20–23. DOI: [10.25586/RNU.HET.20.09.P.20](https://doi.org/10.25586/RNU.HET.20.09.P.20).

13. Имомова Ш.М., Норова Ф.Ф. Роль социальных сетей в образовании // *Universum: технические науки*. 2022. № 10(103). С. 30–32.
14. Exploring the significance of social media for universities. URL: <https://thebrandeducation.com/blog/social-media-for-universities/> (дата обращения: 20.10.2024).
15. Kupferschmidt K. Like ‘old Twitter’: The scientific community finds a new home on Bluesky. *Science*. URL: <https://www.science.org/content/article/old-twitter-scientific-community-finds-new-home-bluesky> (дата обращения: 20.11.2024).
16. Kupferschmidt K. As academic Bluesky grows, researchers find strengths—and shortcomings. *Science*. URL: <https://www.science.org/content/article/academic-bluesky-grows-researchers-find-strengths-and-shortcomings> (дата обращения: 07.01.2025).
17. Kleppmann M., Frazee P., Gold J., *et al.* Bluesky and the AT Protocol: Usable Decentralized Social Media // *Proceedings of the ACM Conext-2024 Workshop on the Decentralization of the Internet (DIN’24)*. Association for Computing Machinery, 2024. P. 1–9. DOI: [10.1145/3694809.3700740](https://doi.org/10.1145/3694809.3700740).
18. Beyond distributed and decentralized: what is a federated network? URL: <https://networkcultures.org/unlikeus/resources/articles/what-is-a-federated-network/> (дата обращения: 20.10.2024).
19. Divon T., Are C., Briggs P. Platform gaslighting: A user-centric insight into social media corporate communications of content moderation // *Platforms & Society*. Jan. 2025. Vol. 2. DOI: [10.1177/29768624241303109](https://doi.org/10.1177/29768624241303109).
20. Om Store norske leksikon. URL: https://meta.sn1.no/Om_Store_norske_leksikon (дата обращения: 20.10.2024).
21. Stigmar M. Peer-to-peer Teaching in Higher Education: A Critical Literature Review // *Mentoring & Tutoring: Partnership in Learning*. 2016. Vol. 24, no. 2. P. 124–136. DOI: [10.1080/13611267.2016.1178963](https://doi.org/10.1080/13611267.2016.1178963).
22. Onu P., Pradhan A., Mbohwa C. Potential to use metaverse for future teaching and learning // *Educ. Inf. Technol.* 2024. No. 29. P. 8893–8924. DOI: [10.1007/s10639-023-12167-9](https://doi.org/10.1007/s10639-023-12167-9).
23. Heidenreich S., Breukers S. Who is telling whose story? The effectiveness of peer-to-peer approaches as inclusive participatory interventions towards sustainability // *Sustainable Production and Consumption*. Jan. 2020. Vol. 21. P. 216–227. DOI: [10.1016/j.spc.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.10.001).
24. Запущена цифровая служба поддержки студентов и абитуриентов с инвалидностью и ОВЗ. URL: <https://it.hse.ru/news/933854602.html> (дата обращения: 20.10.2024).
25. Ali K., Farrer L., Gulliver A., Griffiths K.M. Online Peer-to-Peer Support for Young People With Mental Health Problems: A Systematic Review // *JMIR Ment Health*. 2015. Vol. 2, no. 2. P. e19. DOI: [10.2196/mental.4418](https://doi.org/10.2196/mental.4418).
26. Tsong Y., Young J.T., Killer J.D., Takemoto M.A., Compliment B. Suicide Prevention Program on a Diverse College Campus: Examining the Effectiveness of a Peer-to-Peer Model // *Journal of College Student Psychotherapy*. 2018. Vol. 2, no. 33. P. 131–144. DOI: [10.1080/87568225.2018.1434716](https://doi.org/10.1080/87568225.2018.1434716).

27. Информационные панели для управления регионом. URL: https://iac.spb.ru/proekty-i-sistemy/detail.php/?ELEMENT_ID=418 (дата обращения: 20.10.2024).
28. Скалабан И.А., Дебрени М., Колесова О.В., Погорельская А.М. Стратегическое взаимодействие города и университета: роль кампуса в интернационализации высшего образования // Вестник Томского государственного университета. Философия. Социология. Политология. 2021. № 59. С. 180–188. DOI: [10.17223/1998863X/59/17](https://doi.org/10.17223/1998863X/59/17).
29. Афасижев Т.И., Тешев В.А. Механизмы финансирования научных исследований в вузах (из опыта зарубежных университетов). URL: http://vestnik.adygnet.ru/files/2007.1/420/afasizhev2007_1.pdf (дата обращения: 20.10.2024).
30. Балынская Н.Р., Кузнецова Н.В. Стратегические аспекты взаимодействия образовательной организации с бизнес-сообществом // Вопросы управления. 2018. № 6 (36). С. 224–231.

Шумакова Наталья Игоревна, старший преподаватель кафедры конституционного и административного права, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Титова Елена Викторовна, д.ю.н., профессор, директор Юридического института, заведующий кафедрой конституционного и административного права, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

DOI: [10.14529/cmse250103](https://doi.org/10.14529/cmse250103)

INTERNATIONAL LEVEL CAMPUS: CREATING COMPLEX DIGITAL PLATFORMS FOR IMPLEMENTATION OF INCLUSIVE PROCESSES IN THE ACADEMIC ENVIRONMENT AND BEYOND

© 2025 N.I. Shumakova, E.V. Titova

South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: shumakovani@susu.ru, titovaev@susu.ru

Received: 20.02.2025

The study's major hypothesis suggests the presence of a need for digitalization of an international-level campus by creating a complex digital platform on its basis. The following are proposed as components of such a platform: an internal social network, educational services and units, special-purpose services and units, a campus dashboard with possibility of online interaction with the city (representatives of the business community, industries and citizens). Based on the results of the latest multidisciplinary studies by domestic and foreign scientists, the authors prove that the introduction of such components will contribute to increasing the efficiency of the implementation of inclusive processes in the academic environment and beyond, increasing the prestige and competitiveness of beneficiaries, academic mobility, improving the psychological well-being of students, as well as attracting additional funding for both the platform itself and the educational institutions included in the inter-university union. The novelty of the research conducted within the framework of this article lies in the possibility of using existing domestic programs to create new types of multi-component digital platforms operating in a single window mode, the functionality of which will be able to satisfy a number of needs of the population, business and the state, reflected in national and regional strategic development programs.

Keywords: informational technologies, digital education, inclusion, digital platforms, barrier-free environment, international-level campus.

FOR CITATION

Shumakova N.I., Titova E.V. International Level Campus: Creating Complex Digital Platforms for Implementation of Inclusive Processes in the Academic Environment and Beyond. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 47–62. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse250103.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Begishev I.R., Zharova A.K., Zaloilo M.V., Filipova I.A., Shutova A.A. Technological Transformation: Growing Opportunities and Legal Response to Emerging Risks. Journal of Digital Technologies and Law. Dec. 2024. Vol. 4, no. 2. P. 735–740. DOI: [10.21202/jdtl.2024.37](https://doi.org/10.21202/jdtl.2024.37).
2. Hutson J., Hutson P. Digital Inclusion for People with Autism Spectrum Disorders: Review of the Current Legal Models and Doctrinal Concepts. Journal of Digital Technologies and Law. Dec. 2023. Vol. 1, no. 4. P. 851–879. DOI: [10.21202/jdtl.2023.37](https://doi.org/10.21202/jdtl.2023.37).
3. Volosnikova L.M., Zagvyazinskiy V.I., Kukuev E.A., Fedina L.V., Ogorodnova O.V. The convergence of the concepts of academic and inclusive excellence at research universities. The Education and Science Journal. 2021. Vol. 23, no. 4. P. 67–69. (in Russian) DOI: [10.17853/1994-5639-2021-4-43-78](https://doi.org/10.17853/1994-5639-2021-4-43-78).
4. Detochenko L.S. Modern Trends in Ensuring Inclusiveness in the Paradigm of Higher Education. Sociology. 2022. No. 4. P. 145–152. (in Russian)
5. Kantor V.Z., Proekt Yu.L. Inclusive Higher Education: Socio-Psychological Well-Being of Students. The Education and Science Journal. 2019. Vol. 21, no. 2. P. 51–73. (in Russian) DOI: [10.17853/1994-5639-2019-2-51-73](https://doi.org/10.17853/1994-5639-2019-2-51-73).
6. Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development. URL: https://ggim.un.org/documents/a_res_71_313.pdf (accessed: 20.10.2024).
7. Making Higher Education more inclusive. URL: <https://media.unesco.org/sites/default/files/webform/ed3002/Making%2520Higher%2520Education%2520more%2520inclusive.pdf> (accessed: 20.10.2024).
8. In Perm, presented a project for digitalization of the inter-university campus “The Future of Parma”. URL: <https://www.newsko.ru/news/nk-8091141.html> (accessed: 20.10.2024).
9. The Agency for Strategic Initiatives Project “Open for All”. URL: https://asi.ru/upload/docs/openforall/%D0%9E%D1%82%D0%BA%D1%80%D1%8B%D1%82%D0%BE%20%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D0%B2%D1%81%D0%B5%D1%85_2024.pdf (accessed: 20.10.2024).
10. Chvanova M.S., Khramova M.V., Lyskova V.Yu., Mikhailova D.I., Morgunova A.Yu., Molchanov A.A. Development of social networks and their integration into the Russian education system. Educational Technologies and Society. 2014. Vol. 17, no. 3. P. 472–493. (in Russian)
11. Policy guidelines on inclusion in education. URL: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000177849_rus (accessed: 20.10.2024).

12. Zakieva R.R., Khadiullina R.R., Khudakova L.V., Enturayeva N.V. Mechanisms of Interaction between Education, Science and Social Networks. Higher Education Today. 2020. No. 9. P. 20–23. (in Russian) DOI: [10.25586/RNU.HET.20.09.P.20](https://doi.org/10.25586/RNU.HET.20.09.P.20).
13. Imomova Sh.M., Norova F.F. The Role of Social Networks in Education. Universum: Technical Sciences. 2022. No. 10 (103). P. 30–32. (in Russian)
14. Exploring the significance of social media for universities. URL: <https://thebrandeducation.com/blog/social-media-for-universities/> (accessed: 20.10.2024).
15. Kupferschmidt K. Like ‘old Twitter’: The scientific community finds a new home on Bluesky. Science. URL: <https://www.science.org/content/article/old-twitter-scientific-community-finds-new-home-bluesky> (accessed: 20.11.2024).
16. Kupferschmidt K. As academic Bluesky grows, researchers find strengths—and shortcomings. Science. URL: <https://www.science.org/content/article/academic-bluesky-grows-researchers-find-strengths-and-shortcomings> (accessed: 07.01.2025).
17. Kleppmann M., Frazee P., Gold J., *et al.* Bluesky and the AT Protocol: Usable Decentralized Social Media. Proceedings of the ACM Conext-2024 Workshop on the Decentralization of the Internet (DIN’24). Association for Computing Machinery, 2024. P. 1–9. DOI: [10.1145/3694809.3700740](https://doi.org/10.1145/3694809.3700740).
18. Beyond distributed and decentralized: what is a federated network? URL: <https://networkcultures.org/unlikeus/resources/articles/what-is-a-federated-network/> (accessed: 20.10.2024).
19. Divon T., Are C., Briggs P. Platform gaslighting: A user-centric insight into social media corporate communications of content moderation. Platforms & Society. Jan. 2025. Vol. 2. DOI: [10.1177/29768624241303109](https://doi.org/10.1177/29768624241303109).
20. Om Store norske leksikon. URL: https://meta.sn1.no/Om_Store_norske_leksikon (accessed: 20.10.2024).
21. Stigmar M. Peer-to-peer Teaching in Higher Education: A Critical Literature Review. Mentoring & Tutoring: Partnership in Learning. 2016. Vol. 24, no. 2. P. 124–136. DOI: [10.1080/13611267.2016.1178963](https://doi.org/10.1080/13611267.2016.1178963).
22. Onu P., Pradhan A., Mbohwa C. Potential to use metaverse for future teaching and learning. Educ. Inf. Technol. 2024. No. 29. P. 8893–8924. DOI: [10.1007/s10639-023-12167-9](https://doi.org/10.1007/s10639-023-12167-9).
23. Heidenreich S., Breukers S. Who is telling whose story? The effectiveness of peer-to-peer approaches as inclusive participatory interventions towards sustainability. Sustainable Production and Consumption. Jan. 2020. Vol. 21. P. 216–227. DOI: [10.1016/j.spc.2019.10.001](https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.10.001).
24. Digital support service for students and applicants with disabilities and health restrictions is launched. URL: <https://it.hse.ru/news/933854602.html> (accessed: 20.10.2024).
25. Ali K., Farrer L., Gulliver A., Griffiths K.M. Online Peer-to-Peer Support for Young People With Mental Health Problems: A Systematic Review. JMIR Ment Health. 2015. Vol. 2, no. 2. P. e19. DOI: [10.2196/mental.4418](https://doi.org/10.2196/mental.4418).
26. Tsong Y., Young J.T., Killer J.D., Takemoto M.A., Compliment B. Suicide Prevention Program on a Diverse College Campus: Examining the Effectiveness of a Peer-to-Peer

- Model. Journal of College Student Psychotherapy. 2018. Vol. 2, no. 33. P. 131–144. DOI: [10.1080/87568225.2018.1434716](https://doi.org/10.1080/87568225.2018.1434716).
27. Dashboards for region management. URL: https://iac.spb.ru/proekty-i-sistemy/detail.php/?ELEMENT_ID=418 (accessed: 20.10.2024).
28. Skalaban I.A., Debrenne M., Kolesova O.V., Pogorelskaya A.M. The Role of the City in Higher Education Internationalization: French and Russian Regional Context Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta Ekonomika. Philosophy. Sociology. Politology. 2021. No. 59. P. 180–188. (in Russian) DOI: [10.17223/1998863X/59/17](https://doi.org/10.17223/1998863X/59/17).
29. Afasizhev T.I., Teshev V.A. Mechanisms for financing scientific research in universities (from the experience of foreign universities). URL: http://vestnik.adygnet.ru/files/2007.1/420/afasizhev2007_1.pdf (accessed: 20.10.2024).
30. Balynskaya N.R., Kuznetsova N.V. Strategic Aspects of the Interaction of the Educational Organization with the Business Community. Management Issues. 2018. No. 6 (36). P. 224–231. (in Russian)

ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОСИСТЕМА МЕЖУНИВЕРСИТЕТСКОГО КАМПУСА МИРОВОГО УРОВНЯ: УПРАВЛЕНЧЕСКИЙ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ АСПЕКТЫ

© 2025 Н.С. Конева, А.А. Суханова

Южно-Уральский государственный университет

(454080 Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76)

E-mail: konevans@susu.ru, sukhanovaaa@susu.ru

Поступила в редакцию: 20.02.2025

Настоящая статья посвящена актуальным вопросам формирования экосистемы современного междуниверситетского кампуса мирового уровня. В статье сакцентировано внимание на значении кампуса как важного элемента системы научно-технологического развития Российского государства; рассмотрен процесс моделирования эффективной системы управления междуниверситетским кампусом мирового уровня на примере кампуса Челябинской области; изложена потенциальная структура инновационной экосистемы такого кампуса, обеспечивающей успешность образовательных и управленческих процессов, реализуемых в рамках проекта кампуса его участниками и партнерами в интересах экономического, промышленного и социального развития региона. Авторы подробно анализируют Стратегию научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденную Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145, материалы стратегической сессии «Формирование эффективных моделей управления кампусами», прошедшей 11–13 декабря 2024 года в г. Уфа, а также предпринимают обзор существующих моделей цифровых платформ и инновационных экосистем, используемых для реализации управленческих и иных процессов в различных масштабных проектах. По результатам проведенного исследования сделаны выводы о необходимости и направлениях совершенствования изучаемой экосистемы, ее управленческих и образовательных аспектов, а также о необходимости дальнейшего научного осмысления указанных вопросов, что в конечном итоге призвано способствовать, в том числе достижению технологического суверенитета Российской Федерации.

Ключевые слова: научно-технологическое развитие Российской Федерации, междуниверситетский кампус мирового уровня, система управления междуниверситетским кампусом, образовательная экосистема междуниверситетского кампуса, симулятор создания и управления кампусом.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Конева Н.С., Суханова А.А. Инновационная экосистема междуниверситетского кампуса мирового уровня: управленческий и образовательный аспекты // Вестник ЮУрГУ. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2025. Т. 14, № 1. С. 63–74. DOI: 10.14529/cmse250104.

Введение

Актуальность проблематики, определившей тему предпринятого исследования, обусловлена процессами цифровизации, информатизации и технологизации, пронизывающими все сферы жизни современных общества и государства, включая, вне всякого сомнения, и сферу образования, важным элементом которой на текущем этапе является создание в ряде субъектов Российской Федерации, включая Челябинскую область, междуниверситетских кампусов.

Целью данного исследования выступает формирование комплексного представления об инновационной экосистеме междуниверситетского кампуса мирового уровня, ее управленче-

ских и образовательных аспектах. Достижению указанной цели способствует ряд задач, получивших решение в структурных элементах статьи.

Так, настоящая статья состоит из четырех разделов. В рамках первого раздела обосновывается, что междуниверситетские кампусы мирового уровня выступают элементом системы обеспечения научно-технологического развития Российской государства. Второй раздел посвящен рассмотрению процесса моделирования системы управления кампусом посредством симулятора «Создание и управление кампусом». Третий раздел содержит обзор существующих моделей цифровых платформ и инновационных экосистем, используемых для реализации управленческих и иных процессов в различных масштабных проектах, аналогичных проекту кампуса мирового уровня. Четвертый раздел призван сформировать представление о потенциально применимой инновационной платформе управления кампусом мирового уровня. В заключении отражены основные выводы по результатам проведенного исследования.

1. Кампусы мирового уровня как элемент системы обеспечения научно-технологического развития Российской Федерации

Достижение технологического суверенитета Российской Федерации — одна из важнейших и актуальнейших задач, стоящих перед Российским государством, обозначенная в Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации, утвержденной Указом Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 года № 145 [11].

Данная стратегия в качестве цели научно-технологического развития определяет обеспечение независимости и конкурентоспособности государства, достижения национальных целей развития и реализации стратегических национальных приоритетов путем создания эффективной системы наращивания и наиболее полного использования интеллектуального потенциала нации. Указанная цель предполагает решение ряда соответствующих задач: сформировать эффективную систему взаимодействия науки, технологий и производства; создать инфраструктуру и условия для проведения научных исследований и разработок, внедрения наукоемких технологий, отвечающие современным принципам организации научной, научно-технической и инновационной деятельности; создать возможности для выявления и воспитания талантливой молодежи, построения успешной карьеры в области науки, технологий и технологического предпринимательства; сформировать эффективную систему управления в области науки, технологий и производства и осуществления инвестиций в эту область; способствовать формированию модели международного научно-технического сотрудничества и международной интеграции в области научных исследований и разработок и пр.

В числе путей достижения названной цели и решения перечисленных задач видится эффективная реализация национального проекта «Наука и университеты», структура которого включает в себя следующие направления: развитие человеческого капитала в интересах регионов, отраслей и сектора исследований и разработок; развитие масштабных научных и научно-технологических проектов по приоритетным исследовательским направлениям; развитие интеграционных процессов в сфере науки, высшего образования и индустрии; развитие инфраструктуры для научных исследований и подготовки кадров [8]. Успешному движению по каждому из направлений способствует одна из важнейших инициатив проекта: создание современных кампусов для комфортной жизни и работы студентов и уче-

ных **3**. Осуществление данной инициативы позволит реализовать основные национальные приоритеты в сфере научно-технологического развития России: обеспечить технологический суверенитет по наиболее значимым отраслям за счет разработки собственных технологий и создать благоприятную среду для их внедрения; сформировать инновационную инфраструктуру научных исследований и разработок на основе интеграции университетов и научных организаций, их кооперации с организациями реального сектора экономики; создать высокотехнологическую среду для проведения новых научных исследований и разработок, а также целостную систему подготовки и профессионального роста научных и научно-педагогических кадров. Кроме того, реализация национального проекта «Наука и университеты» посредством осуществления его основных инициатив, таких как создание межвузовских кампусов, оказывает значительное влияние на достижение смежных по сфере национальных целей: создание возможностей для самореализации и развития талантов, условий для достойного, эффективного труда и успешного предпринимательства, а также на достижение ряда важнейших для государства целевых показателей: обеспечение присутствия России в числе 10 ведущих стран мира по объему научных исследований и разработок, в том числе за счет создания эффективной системы высшего образования; обеспечение темпа роста валового внутреннего продукта страны выше среднемирового при сохранении макроэкономической стабильности; обеспечение темпа устойчивого роста доходов населения и уровня пенсионного обеспечения не ниже инфляции.

2. Моделирование системы управления кампусом мирового уровня

Современные межвузовские кампусы мирового уровня призваны стать мощным интеллектуальным ресурсом для развития регионов государства и повышение качества жизни в этих регионах. Создание прогрессивной образовательной и исследовательской инфраструктуры межвузовских кампусов позволит сделать существенный шаг вперед в развитии системы российского образования.

Межвузовские кампусы предполагают формирование современных пространств, оснащенных передовым оборудованием для реализации образовательных и исследовательских задач, а также отработки практических навыков. Кроме того, проекты кампусов должны учитывать потребности отраслей экономики и предпринимательства конкретного региона, что позволит обеспечить решение приоритетных задач региона. Разрабатываемые в рамках межвузовских кампусов объекты должны быть согласованы с перспективами развития конкретного субъекта Российской Федерации, синхронизированы со стратегиями социально-экономического и научно-технологического развития региона, выступая элементом его инструментальной системы.

Создание системы кампусов выходит за рамки строительства инфраструктуры исключительно для высших учебных заведений, а позволяет сформировать среду для новых актуальных исследований, образовательных моделей и практик, для развития технологического предпринимательства и реализации успешных и эффективных коммерческих проектов.

В декабре 2024 года в г. Уфа при поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации состоялась стратегическая сессия «Формирование эффективных моделей управления кампусами», в которой приняли участие 17 команд кампусов — участников федерального проекта «Создание сети современных кампусов», включая команду Челябинской области **7**. В рамках данной сессии обозначено, что к 2030 году будут сфор-

мированы 44 объекта инновационной инфраструктуры, созданных на территории кампусов (технопарки, бизнес-инкубаторы и пр.), а также 266 сетевых образовательных программ, разработанных для реализации учебного процесса в объектах кампусов [6].

Однако достижение заявленных показателей возможно лишь при условии функционирования эффективной модели управления кампусами, что является сложной, многогранной задачей, требующей системного подхода и учета множества факторов. Успешное функционирование инфраструктуры в рамках кампусов обусловлено грамотным выстраиванием механизмов взаимодействия, четко сформулированной стратегией развития и гибкой системой управления, адаптивной по отношению к постоянно изменяющимся условиям. Согласованная совместная деятельность, как внутри отдельно взятого кампуса, так и между ними, способна выступить основой будущей инновационной среды и успешного развития кампусов как эффективных и динамичных образовательных и инновационных центров.

Эффективная модель управления кампусом должна предполагать формирование согласованного видения по всем управленческим процессам, развитие управленческих компетенций и разнонаправленных связей для повышения качества совместной деятельности.

При разработке модели управления кампусом целесообразным видится использование симулятора «Создание и управление кампусом», что было реализовано в рамках обозначенной стратегической сессии.

В качестве основы такого симулятора выступает базовая математическая модель, используемая для обеспечения однозначного соответствия между элементами модели и реальными объектами моделирования. Результаты реализации каждой игровой сессии зависят от взаимосвязи показателей, заложенных в математическую модель, и конкретных настроек игрового сценария. В рамках игровой сессии возможно смоделировать процесс создания и управления кампусом на срок от трех до шести лет, а также сделать акцент на какую-либо конкретную задачу, стоящую перед конкретным кампусом.

Применение симулятора создает возможности для выработки на основе анализа исходных данных (объекты кампуса, стартовый бюджет, образовательные программы, различные показатели конкретного региона, партнеры) тактики принятия стратегических решений для достижения ожидаемых социально-экономических эффектов; для определения оптимальных социально-экономических параметров функционирования кампуса; для тестирования гипотезы управленческих решений и их последствий в безопасной интерактивной среде согласно заданным сценариям.

Результаты применения симулятора для анализа междуниверситетского кампуса Челябинской области свидетельствуют о его высокой эффективности, однако вместе с тем демонстрируют и направления деятельности, нуждающиеся в совершенствовании: проработка финансовой модели взаимосвязи участников системы управления и горизонтальных связей между участниками процесса управления.

3. Обзор существующих моделей цифровых платформ и инновационных экосистем, используемых для реализации управленческих и иных процессов в различных масштабных проектах, аналогичных проекту кампуса мирового уровня

В рамках обзора существующих моделей цифровых платформ и инновационных экосистем, используемых для реализации управленческих и иных процессов в масштабных

проектах, можно выделить ключевые аспекты, основываясь на анализе научных статей и практических примеров. Путем анализа основных моделей цифровых платформ и экосистем, а также выявления аспектов выбора подходящих моделей управления можно заключить, что к основным моделям цифровых платформ и инновационных экосистем могут быть отнесены:

1. Платформенные экосистемы (Platform-Based Ecosystems), основанные на цифровой архитектуре, включающей модули, интерфейсы и данные. Модульность таких экосистем обеспечивает гибкость и возможность интеграции различных участников экосистемы [15]. Примерами являются платформы для совместной разработки (например, SDK или API), которые позволяют партнерам создавать новые продукты или услуги, повышая внутреннюю и внешнюю ценность экосистемы. При этом в рамках процессов управления владельцы платформы играют ключевую роль как в координации взаимодействия между участниками, так и в создании их общих ценностей.
2. Модель портфеля инновационной экосистемы (Lund Model) разработана для управления сложными проектами через отслеживание инвестиций, партнерств и ключевых событий в экосистеме и включает в себя несколько уровней финансирования и стратегического взаимодействия между городами, университетами, бизнесом и другими участниками [13]. Особенностью такой модели является достаточная гибкость в адаптации под конкретные нужды экосистемы и акцент на возможную долгосрочную трансформацию системы.
3. Экосистемы устойчивых инноваций ориентированы на достижение целей устойчивого развития (например, Agenda 2030), объединяют экономическую, социальную и экологическую ценности, особенностями управленческого компонента в них является коллаборативная модель с вовлечением всех участников в процессы принятия решений [14]. Примерами могут быть названы цифровые алгоритмы для соединения разработчиков «зеленых» технологий с их пользователями.
4. Экосистемы по Boston Consulting Group (BCG), в типологии которых выделяются три разновидности экосистем: сети оцифровки (digitiser networks), платформы (platforms) и суперплатформы (super platforms) — выбор типа зависит от стратегических целей пользователей и от их начальных возможностей. Так, например, суперплатформы подходят для масштабных проектов со множеством участников [17].
5. Гибридные модели управления проектами предполагают сочетание традиционных и гибких подходов (например, Scaled Agile Framework) и используются для проектов с динамическими требованиями и сложной структурой участников. Именно гибридные модели все чаще используются в таких проектах как межуниверситетские кампусы, что обусловлено особенностями их инфраструктуры и составом участников.

Анализ специальной литературы и практики реализации конкретных моделей управления позволяет назвать критерии выбора таких моделей, к которым относятся: цели проекта — если проект направлен на устойчивое развитие или масштабное сотрудничество, предпочтительны модели с открытым управлением и акцентом на экологическую ценность; структура (состав) участников — для проектов со множеством заинтересованных сторон важна гибкость управления и четкое определение ролей участников (например, “orchestrator” в модели BCG обеспечивает координацию всех процессов); технологическая архитектура — модульность платформ способствует интеграции различных компонентов и упрощает внедрение инноваций; гибкость и адаптивность — гибридные модели управления подходят для проектов с изменяющимися требованиями или неопределенностью в долго-

срочной перспективе; инструменты отслеживания прогресса — использование моделей типа «слоев» (Layer Model) позволяет отслеживать инвестиции, ключевые события и их влияние на развитие экосистемы.

Применительно к моделям управления междуниверситетскими кампусами мирового уровня эти критерии могут быть дополнены следующими: цифровые двойники, обеспечивающие создание цифровых копий зданий и инфраструктуры для оптимизации управления и эксплуатации [5]; интеграция с ИИ и IoT — использование искусственного интеллекта и Интернета вещей для прогнозирования потребностей и автоматизации процессов [12]; создание виртуальных пространств для дистанционного взаимодействия и обучения [5]; разработка комплексных платформ для управления имущественным комплексом и сервисами [12].

Кроме того, существенными условиями эффективной реализации модели экосистемы университетского кампуса могут быть названы эффективность использования образовательных пространств (кампусы способствуют экономическому росту, локализуя обучение, науку, инновации и бизнес в едином пространстве, что требует эффективного управления и использования ресурсов) (см. [9]); цифровизация для комплексного управления, безопасности и эффективности учебного процесса, включая цифровые сервисы, системы навигации и единые расписания [4]; интеграция с городской средой, что предполагает доступность кампусов не только для студентов, но и для горожан и развитие инновационной среды.

Таким образом, современные цифровые платформы и инновационные экосистемы предлагают широкий спектр возможностей для реализации управленческих процессов в масштабных проектах. Выбор подходящей модели зависит от целей проекта, структуры участников, технологической базы и уровня необходимой гибкости. Для кампусов мирового уровня наиболее релевантными могут быть гибридные подходы, сочетающие модульную архитектуру платформ с коллаборативным управлением экосистемой. В настоящее время инновационные цифровые модели управления междуниверситетскими кампусами в СНГ фокусируются на интеграции передовых технологий для повышения эффективности и комфорта. Использование цифровых двойников, ИИ и IoT позволяет оптимизировать эксплуатацию и управление инфраструктурой, а виртуальные кампусы расширяют возможности дистанционного взаимодействия. Эти модели не только улучшают качество образовательных услуг, но и способствуют экономии ресурсов и повышению удовлетворенности пользователей.

4. Инновационная платформа управления кампусом мирового уровня

Представляется, что в реальности система управления междуниверситетским кампусом мирового уровня должна базироваться на мультифункциональной образовательной платформе, предоставляющей доступ к разнообразному контенту, экспертным курсам, эффективным практикам ведущих университетов и компаний российского и мирового уровня. Работа на такой платформе способна обеспечить расширение доступа к качественному онлайн-образованию, раскрытие человеческого потенциала, развитие навыков и микроквалификаций, необходимых работодателям, сокращение разрыва между образованием и рынком труда через синергию академической и практической составляющих в цифровой экосистеме, повышение ценности и конкурентоспособности академического образования, дополнительного профессионального образования и курсов университета, установление коммуникаций и обмен опытом, что в полной мере соотносится с пониманием миссии современного университета (см., например, [1][2][10]).

Эффективная инновационная экосистема кампуса позволяет создать в рамках кампуса единое междуниверситетское пространство, существующее во взаимосвязи с работодателями-партнерами кампуса, что обуславливает стабильное усиление кадрового потенциала и развитие экономики региона, а также единую цифровую среду для всех участников кампуса с единым образовательным и иным контентом: мероприятия, коммуникации, базы знаний и пр. и навигатором по всем элементам контента. Платформа системного управления кампусом подразумевает функционирование совместных сетевых образовательных программ университетов-партнеров с ведущими компаниями региона, системы личных кабинетов для различных ролей участников, системы для дистанционных образовательных и иных процессов с возможностями управления новостями, мероприятиями, загрузкой контента, доступа к аналитике и прочим данным, создания курсов и программ и т.п. Отдельным направлением реализации возможностей экосистемы выступает тесное взаимодействие с работодателями — партнерами кампуса, предполагающее прямой доступ к соответствующим кейсам, стажировкам и вакансиям. Помимо указанного, платформа, обеспечивающая информационно-технологическое управление кампусом, включает в себя автономный интернет-ресурс кампуса с выстроенной маркетинговой системой, обеспечивающей стабильный приток пользователей экосистемы.

Представляется, что рассматриваемая экосистема структурно должна быть разделена на четыре основных составных модуля.

Первый модуль предполагается посвященным единой системе знаний для всех участников и партнеров кампуса. Данный модуль включает в себя цифровой формат учебно-методического обеспечения образовательного процесса на базе кампуса: учебные, научные и практико-ориентированные издания по ключевым направлениям деятельности образовательных организаций и партнеров, входящих в проект кампуса, электронно-библиотечные системы, коллекции онлайн-курсов, программ дополнительного образования, открытых лекций, кейсов от компаний-партнеров.

Второй модуль следует ориентировать на процессы непосредственно онлайн-обучения для всех участников и партнеров кампуса. Модульная платформа онлайн-обучения должна включать в себя разнообразные конструкторы: для создания курсов и программ дополнительного профессионального образования с возможностью встраивания готового лицензионного контента, для проектной деятельности по реализации практико-ориентированных кейсов от работодателей, для образовательных программ по приоритетным направлениям деятельности и исследований университетов — участников проекта кампуса, для создания тестов и практических заданий, для загрузки scorm-пакетов, обеспечивающих высокие стандарты дистанционного обучения.

Третий модуль целесообразно посвятить процессам персонализации платформы под конкретные задачи, настройке и кастомизации выделенной виртуальной академической среды под специальные требования для увеличения эффективности использования доступных ресурсов и функционала платформы. В рамках данного модуля платформа должна предоставлять возможности для создания выделенных брендированного поддомена и система дистанционного обучения; система личных кабинетов с различными ролями (администратор, преподаватель, студент, работодатель, гость и пр.); лендинга всех участников проекта в каталоге партнеров; инструментов управления событиями, мероприятиями и их единым расписанием, коммерциализированных онлайн-курсов и программ с партнерами кампуса, что позволит обеспечить высокий уровень экспертности курсов и программ, а также привлечение новых партнеров и аудитории слушателей.

Четвертый модуль должен быть призван сформировать пространство для взаимодействия кампуса с рынком труда, промышленными и социальными партнерами. Функционал данного модуля предполагает разработку и внедрение системы личных кабинетов работодателей, конструкторов различных практико-ориентированных симуляторов и профориентационных и распределительных тестов, а также конструкторов проектной деятельности, образовательных программ и программ дополнительного профессионального образования из собственного контента работодателей или контента партнеров.

Помимо указанного, платформа, обеспечивающая инновационное управление кампусом мирового уровня, должна обладать развернутым инструментарием для полной выгрузки аналитики по использованию всех ресурсов системы, для маркетингового продвижения проектов кампуса и образовательного контента, для управления набором внутренних и внешних пользователей на курсы и образовательные программы, для соответствующего обучения всех участников образовательных и управленческих процессов и их технического сопровождения, а также для интеграции с уже имеющейся информационной средой всех участников и партнеров проекта кампуса.

Заключение

Подводя итоги проведенного исследования, следует заключить, что междуниверситетский кампус мирового уровня представляет собой один из актуальных инструментов, способствующих достижению технологического суверенитета Российского государства, что является важной задачей в развитии последнего. Кроме того, современные кампусы призваны выступать в качестве знакового ресурса для развития соответствующих регионов государства и повышения качества жизни в них. Создание прогрессивной образовательной и исследовательской инфраструктуры междуниверситетских кампусов позволит сделать существенный шаг вперед в развитии системы российского образования. Однако важно подчеркнуть, что создание системы кампусов выходит за рамки строительства инфраструктуры исключительно для высших учебных заведений, а позволяет сформировать среду для новых актуальных исследований, образовательных моделей и практик, для развития технологического предпринимательства и реализации успешных и эффективных коммерческих проектов. При этом стоит отметить, что достижение указанных результатов возможно лишь при условии функционирования эффективной модели управления кампусами, что является сложной, многогранной задачей, требующей системного подхода и учета множества факторов. Система управления междуниверситетским кампусом мирового уровня должна базироваться на мультифункциональной образовательной платформе, предоставляющей доступ к разнообразному контенту, экспертным курсам, эффективным практикам ведущих университетов и компаний российского и мирового уровня. Процессы создания, внедрения и поддержания функционирования инновационной экосистемы кампуса нуждаются в практическом совершенствовании и продуктивном научном осмыслении, что обуславливает необходимость дальнейших научных изысканий по соответствующей тематике.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-28-20273, <https://rscf.ru/project/24-28-20273/> «Организационно-правовая модель социальной и научно-образовательной инклюзии на базе современных кампусов научной кооперации организаций Челябинской области с использованием новой региональной инфраструктуры научно-образовательной среды (кампуса международного уровня)».

Литература

1. Воеводина Е.В. Анализ «третьей миссии университетов» в разрезе образовательных рисков цифрового неравенства // Цифровая социология. 2022. Т. 5, № 1. С. 54–63. DOI: [10.26425/2658-347X-2022-5-1-54-63](https://doi.org/10.26425/2658-347X-2022-5-1-54-63).
2. Дремова О.В., Щеглова И.А. Третья миссия университетов в России: тренд на (не)коммерциализацию? // Университетское управление: практика и анализ. 2022. Т. 26, № 2. С. 27–37. DOI: [10.15826/umpra.2022.02.010](https://doi.org/10.15826/umpra.2022.02.010).
3. Информационный ресурс «Национальные проекты». URL: <https://xn--80aarpmpemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/nauka-i-university/> (дата обращения: 26.02.2025).
4. Кампусы будущего: анализ опыта использования цифровых сервисов. URL: https://sitronics.com/docs/for_press/Tyumen_report.pdf (дата обращения: 26.02.2025).
5. Ключевые цель и приоритеты кампусной и инфраструктурной политики. Официальный сайт Тольяттинского государственного университета. URL: <https://www.tltsu.ru/prioritet-2030/politiki/campus/priority> (дата обращения: 26.02.2025).
6. Материалы стратегической сессии «Формирование эффективных моделей управления кампусами». Уфа, 11–13 декабря 2024 г.
7. Модели управления будущими кампусами обсудили в Уфе. Наука.рф: официальный сайт Десятилетия науки и технологий в России. URL: <https://xn--80aa3ak5a.xn--plai/news/modeli-upravleniya-budushchimi-kampusami-obsudili-v-ufe/> (дата обращения: 26.02.2025).
8. Официальный сайт Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. URL: https://minobrnauki.gov.ru/nac_project/#structure (дата обращения: 26.02.2025).
9. Ремизова Т.С., Алаев А.А. Университетские кампусы мирового уровня как новая форма организации образовательных пространств на территории Российской Федерации // Университетское управление: практика и анализ. 2023. Т. 27, № 2. С. 101–115. DOI: [10.15826/umpra.2023.02.016](https://doi.org/10.15826/umpra.2023.02.016).
10. Тавбулатова З.К., Чаплаев Х.Г. Третья миссия университета и ее роль в стратегическом процессе развития ВУЗа // Экономические исследования. 2022. № 2. С. 4–9.
11. О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации: Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 // Собрание законодательства Российской Федерации. 2024. 4 марта. № 10. Ст. 1373.
12. Цифровой полигон «Умный кампус». Официальный сайт Дальневосточного федерального университета. URL: <https://2030.dvfu.ru/czifrovoj-poligon-umnyj-kampus/> (дата обращения: 26.02.2025).
13. An introduction to the Lund model for Innovation Ecosystem Portfolio Tracking: Developed by Lund University and Future By Lund innovation platform. URL: https://oecd-opsi.org/wp-content/uploads/2022/10/The-LIEPT-model-introduction_for-OPSI-case.pdf (дата обращения: 26.02.2025).
14. Calabrese M., La Sala A., Fuller R.P., Laudando A. Digital Platform Ecosystems for Sustainable Innovation: Toward a New Meta-Organizational Model? // Adm. Sci. 2021. Vol. 11, no. 4. Article 119. DOI: [10.3390/admsci11040119](https://doi.org/10.3390/admsci11040119).

15. Digital innovation in platform-based ecosystems: An evolutionary framework. URL: https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/47962490/p149_isckia.pdf (дата обращения: 26.02.2025).
16. Isckia T., De Reuver M., Lescop D. Digital innovation in platform-based ecosystems: An evolutionary framework // 10th International Conference on Management of Digital EcoSystems (MEDES 2018). ACM, 2018. P. 149–156. DOI: [10.1145/3281375.3281377](https://doi.org/10.1145/3281375.3281377).
17. Management's Next Frontier – The Digital Ecosystem. URL: <https://www.subscribe-hr.com.au/blog/managements-next-frontier-the-digital-ecosystem> (дата обращения: 26.02.2025).

Конева Наталья Сергеевна, к.ю.н., доцент, кафедра конституционного и административного права, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

Суханова Александра Андреевна, к.ю.н., кафедра конституционного и административного права, Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск, Российская Федерация)

DOI: 10.14529/cmse250104

INNOVATION ECOSYSTEM OF A WORLD-CLASS INTER-UNIVERSITY CAMPUS: MANAGEMENT AND EDUCATIONAL ASPECTS

© 2025 N.S. Koneva, A.A. Sukhanova

South Ural State University (pr. Lenina 76, Chelyabinsk, 454080 Russia)

E-mail: konevans@susu.ru, sukhanovaaa@susu.ru

Received: 20.02.2025

The article is devoted to the current issues of forming an ecosystem of a modern world-class inter-university campus. The article focuses on the significance of the campus as an important element of the scientific and technological development system of the Russian state; considers the process of modeling an effective management system of a world-class inter-university campus using the example of the campus in the Chelyabinsk region; outlines the potential structure of the innovative ecosystem of such a campus, ensuring the success of educational and management processes implemented within the framework of the campus project by its participants and partners in the interests of economic, industrial and social development of the region. The authors analyze in detail the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation, approved by Decree of the President of the Russian Federation dated February 28, 2024 No. 145, as well as the materials of the strategic session “Formation of Effective Campus Management Models”, held on December 11–13, 2024 in Ufa and also undertake a review of existing models of digital platforms and innovative ecosystems used to implement management and other processes in various large-scale projects. Based on the results of the conducted research, conclusions were made about the need and directions for improving the studied ecosystem, its management and educational aspects, as well as the need for further scientific understanding of the indicated issues, which is ultimately intended to contribute, among other things, to the achievement of technological sovereignty of the Russian Federation.

Keywords: scientific and technological development of the Russian Federation, world-class inter-university campus, inter-university campus management system, educational ecosystem of inter-university campus, campus creation and management simulator.

FOR CITATION

Koneva N.S., Sukhanova A.A. Innovation Ecosystem of a World-Class Inter-University Campus: Management and Educational Aspects. Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2025. Vol. 14, no. 1. P. 63–74. (in Russian) DOI: 10.14529/cmse250104.

This paper is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 License which permits non-commercial use, reproduction and distribution of the work without further permission provided the original work is properly cited.

References

1. Voevodina E.V. Analysis of the “third mission of universities” in the context of educational risks of digital inequality. Digital Sociology. 2022. Vol. 5, no. 1. P. 54–63. DOI: [10.26425/2658-347X-2022-5-1-54-63](https://doi.org/10.26425/2658-347X-2022-5-1-54-63).
2. Dremova O.V., Shcheglova I.A. The third mission of universities in Russia: a trend to-wards (non)commercialization? University Management: Practice and Analysis. 2022. Vol. 26, no. 2. P. 27–37. DOI: [10.15826/umpa.2022.02.010](https://doi.org/10.15826/umpa.2022.02.010).
3. Information resource “National projects”. URL: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/nauka-i-university/> (accessed: 26.02.2025).
4. Campuses of the Future: Analysis of Experience in Using Digital Services. URL: https://sitronics.com/docs/for_press/Tyumen_report.pdf (accessed: 26.02.2025).
5. Key goals and priorities of campus and infrastructure policy. Official website of Togliatti State University. URL: <https://www.tltsu.ru/prioritet-2030/politiki/campus/priority> (accessed: 26.02.2025).
6. Materials of the strategic session “Formation of effective campus management models”. Ufa, December 11–13, 2024.
7. Models for managing future campuses were discussed in Ufa. Science.rf: official website of the Decade of Science and Technology in Russia. URL: <https://xn--80aa3ak5a.xn--p1ai/news/modeli-upravleniya-budushchimi-kampusami-obsudili-v-ufe/> (accessed: 26.02.2025).
8. Official website of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. URL: https://minobrnauki.gov.ru/nac_project/#structure (accessed: 26.02.2025).
9. Remizova T.S., Alaev A.A. World-class university campuses as a new form of organizing educational spaces on the territory of the Russian Federation. University Management: Practice and Analysis. 2023. Vol. 27, no. 2. P. 101–115. DOI: [10.15826/umpa.2023.02.016](https://doi.org/10.15826/umpa.2023.02.016).
10. Tavbulatova Z.K., Chaplaev Kh.G. The third mission of the university and its role in the strategic process of development of the university. Economic Research. 2022. No. 2. P. 4–9.
11. On the Strategy for Scientific and Technological Development of the Russian Federation: Decree of the President of the Russian Federation of February 28, 2024, No. 145. Collected Legislation of the Russian Federation. 2024. March 4. No. 10. Article 1373.
12. Digital polygon “Smart Campus”. Official website of the Far Eastern Federal University. URL: <https://2030.dvfu.ru/czifrovoj-poligon-umnyj-kampus/> (accessed: 26.02.2025).

13. An introduction to the Lund model for Innovation Ecosystem Portfolio Tracking: Developed by Lund University and Future By Lund innovation platform. URL: https://oecd-opsi.org/wp-content/uploads/2022/10/The-LIEPT-model-introduction_for-OPSI-case.pdf (accessed: 26.02.2025).
14. Calabrese M., La Sala A., Fuller R.P., Laudando A. Digital Platform Ecosystems for Sustainable Innovation: Toward a New Meta-Organizational Model? Adm. Sci. 2021. Vol. 11, no. 4. Article 119. DOI: [10.3390/admsci11040119](https://doi.org/10.3390/admsci11040119).
15. Digital innovation in platform-based ecosystems: An evolutionary framework. URL: https://pure.tudelft.nl/ws/portalfiles/portal/47962490/p149_iskia.pdf (accessed: 26.02.2025).
16. Isckia T., De Reuver M., Lescop D. Digital innovation in platform-based ecosystems: An evolutionary framework. 10th International Conference on Management of Digital Ecosystems (MEDES 2018). ACM, 2018. P. 149–156. DOI: [10.1145/3281375.3281377](https://doi.org/10.1145/3281375.3281377).
17. Management's Next Frontier – The Digital Ecosystem. URL: <https://www.subscribe-hr.com.au/blog/managements-next-frontier-the-digital-ecosystem> (accessed: 26.02.2025).

СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗДАНИИ

Научный журнал «Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика» основан в 2012 году.

Учредитель — Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Главный редактор — Л.Б. Соколинский.

Свидетельство о регистрации ПИ ФС77-57377 выдано 24 марта 2014 г. Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы данных ВИНИТИ; индексируется в библиографической базе данных РИНЦ. Журнал размещен в открытом доступе на Всероссийском математическом портале MathNet. Сведения о журнале ежегодно публикуются в международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» по научным специальностям и соответствующим им отраслям науки: 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика (физико-математические науки), 2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей (физико-математические науки).

Подписной индекс научного журнала «Вестник ЮУрГУ», серия «Вычислительная математика и информатика»: 10244, каталог «Пресса России». Периодичность выхода — 4 выпуска в год.

Адрес редакции, издателя: 454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76, Издательский центр ЮУрГУ, каб. 32.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Правила подготовки рукописей и пример оформления статей можно загрузить с сайта серии <https://vestnikvmi.susu.ru>. Статьи, оформленные без соблюдения правил, к рассмотрению не принимаются.
2. Адрес редакционной коллегии научного журнала «Вестник ЮУрГУ», серия «Вычислительная математика и информатика»:
Россия 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ЮУрГУ, кафедра СП,
зам. главного редактора Цымблеру М.Л.
3. Адрес электронной почты редакции: vestnikvmi@susu.ru
4. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается, и гонорары авторам не выплачиваются.

ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия
«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА»
2025 Том 14, № 1

16+

Техн. редактор *А.В. Миних*

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 24.03.2025. Дата выхода в свет 01.04.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 8,83. Тираж 500 экз. Заказ 69/109. Цена свободная.

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, проспект Ленина, 76.