

## МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ НАУКОЕМКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

**О.В. Логиновский**, [loginovskii@susu.ru](mailto:loginovskii@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

**В.А. Белякова**, [beliakovava@susu.ru](mailto:beliakovava@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

*Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия*

**Аннотация.** Представлена модель управления наукоемким производством на основе технологии цифровых двойников, объединяющая архитектуру озера данных и принципы онтологической инженерии и агентно-сервисного подхода. В исследовании рассматриваются проблемы управления сложными производственными средами в контексте Индустрии 4.0, предлагается гибридный подход, сочетающий принципы «умной фабрики» с методологиями бережливого производства. Модель включает в себя многоуровневую архитектуру, охватывающую стратегический, тактический и операционный уровни, поддерживаемую структурой агент-сервис для системной интеграции. **Цель** работы заключается в разработке комплексной модели управления наукоемким производством на основе интеграции технологии цифровых двойников, онтологического подхода и агентно-сервисной архитектуры с использованием озера данных. **Методы.** Методология исследования использует системный подход к управлению данными с помощью структурированных хранилищ данных и электронных паспортов, используя нечеткие онтологии для формализации знаний. **Результаты.** Реализация продемонстрирована на примере многомасштабного моделирования химических материалов и соединений, где эффективность модели оценивается количественно. Результаты свидетельствуют о значительном повышении производительности, особенно в операциях поиска данных, поскольку протоколы структурированного поиска демонстрируют более высокую эффективность по сравнению с традиционными подходами. **Заключение.** Полученные результаты показывают, что интеграция цифровых двойников с онтологическими структурами и архитектурами агентского обслуживания обеспечивает расширенные возможности оперативного контроля и принятия решений в высокотехнологичных производственных средах. Практическое применение модели демонстрирует ее масштабируемость и адаптивность в различных отраслях промышленности, способствуя как теоретическому пониманию, так и практическому внедрению передовых производственных систем. Это исследование развивает область управления высокотехнологичным производством, предоставляя структурированную основу для цифровой трансформации производственных операций.

**Ключевые слова:** наукоемкое производство, модель управления, цифровой двойник, озеро данных, онтологический инжиниринг, агентно-сервисный подход, принятие решений

**Для цитирования:** Логиновский О.В., Белякова В.А. Модель управления наукоемким производством на основе технологии цифровых двойников // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2025. Т. 25, № 2. С. 95–106. DOI: 10.14529/ctcr250209

Original article  
DOI: 10.14529/ctcr250209

## DIGITAL TWIN-BASED MANAGEMENT MODEL FOR HIGH-TECH PRODUCTION

**O.V. Loginovskiy**, [loginovskii@susu.ru](mailto:loginovskii@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3582-2795>

**V.A. Beliakova**, [beliakovava@susu.ru](mailto:beliakovava@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2273-2619>

*South Ural State University, Chelyabinsk, Russia*

**Abstract.** A management model for high-tech production based on digital twin technology is presented, combining the architecture of a data lake and the principles of ontological engineering and an agent-based service approach. The study examines the problems of managing complex production environments in the context of Industry 4.0, and suggests a hybrid approach combining the principles of a “smart factory”

with lean manufacturing methodologies. The model includes a multi-level architecture covering strategic, tactical and operational levels, supported by an agent-service structure for system integration. The **aim** of the work is to develop an integrated management model for high-tech production based on the integration of digital twin technology, an ontological approach, and an agent-service architecture using a data lake. **Methods.** The research methodology uses a systematic approach to data management using data lake and electronic passports, and fuzzy ontologies to formalize knowledge. **Results.** The implementation is demonstrated on the example of multiscale modeling of chemical materials and compounds, where the effectiveness of the model is quantified. The results indicate a significant increase in productivity, especially in data retrieval operations, as structured search protocols demonstrate higher efficiency compared to traditional approaches. **Conclusion.** The results show that integration of digital twins with ontological structures and architectures of agency services provides enhanced operational control and decision-making capabilities in high-tech production environments. The practical application of the model demonstrates its scalability and adaptability in various industries, contributing to both theoretical understanding and practical implementation of advanced production systems. This research develops the field of high-tech production management by providing a structured framework for the digital transformation of production operations.

**Keywords:** high-tech production, management model, digital twin, data lake, ontological engineering, agent-service approach, decision-making

**For citation:** Loginovskiy O.V., Beliakova V.A. Digital twin-based management model for high-tech production. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*. 2025;25(2):95–106. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr250209

## Введение

Развитие наукоемкого производства в России характеризуется высокой степенью технологического прогресса и внедрения в различных отраслях. За последние годы российский производственный сектор претерпел значительные преобразования, при этом особое внимание уделяется интеграции цифровых технологий и современным методам производства [1, 2], что, в свою очередь, требует совершенствования моделей и алгоритмов управления.

Значительный прогресс в области контроля и оптимизации наукоемкого производства представляет интеграция технологии цифровых двойников в модели управления. Эта интеграция создает всеобъемлющую основу для принятия решений и оптимизации процессов в режиме реального времени, коренным образом трансформируя традиционные подходы к управлению производством [3].

В условиях Индустрии 4.0 наукоемкие предприятия в основном применяют модели управления, основанные на данных, поступающих от приборов и датчиков. Таким образом, для повышения быстродействия доступа и обработки необходимо иметь оптимальную систему хранения, а также алгоритмы поиска и обработки больших массивов данных в режиме реального времени.

Однако данные, поступающие через Интернет вещей, могут быть неструктурированными или частично структурированными, а также формат выходных файлов может отличаться в зависимости от модели оборудования.

Оптимальным способом хранения неструктурированной или частично структурированной информации является озеро данных и система электронных паспортов изделий, приборов и процессов, образующих онтологические структуры и сущности.

Представление знаний в среде цифровых двойников существенно выигрывает от использования онтологических структур. Онтологии предметной области, интегрированные с моделями цифровых двойников, обеспечивают повышенную семантическую ясность и улучшенные взаимосвязи данных, что приводит к более эффективной передаче знаний и пониманию процессов [4].

Такая интеграция оказывается особенно ценной в сложных производственных условиях, где точное определение взаимосвязей и представление знаний имеют решающее значение.

Таким образом, **цель** работы заключается в разработке модели управления наукоемким производством на основе интеграции технологии цифровых двойников, онтологического подхода и агентно-сервисной архитектуры с использованием озера данных.

### Методы

Основой модели управления наукоемким предприятием является гибридная модель, основанная на принципах «умной фабрики» и бережливого производства, подразумевающих использование киберсистем и Интернета вещей.

Здесь ключевым объектом является система поддержки принятия решений, основанная на технологии цифровых двойников. Поскольку эта гибридная модель относится к разряду моделей, основанных на данных, то в роли хранилища данных выступает озеро данных и система электронных паспортов, онтологически связывающая сущности цифрового двойника. Взаимодействие между уровнями модели, а также между доменами цифрового двойника организовано с помощью агентно-сервисного подхода.

### Основная часть

Внедрение цифровых моделей управления на основе двойников, включающих онтологические структуры и агентно-сервисные архитектуры, требует применения структурированного иерархического подхода. Эта многоуровневая структура обеспечивает всестороннюю интеграцию различных функций управления при сохранении операционной согласованности и стратегического согласования. Томпсон и Родригес демонстрируют, что эффективная реализация модели требует тщательного учета иерархических связей и функциональных зависимостей на всех уровнях организации [5]. Структура модели управления представлена на рис. 1.



Рис. 1. Структура модели управления наукоемким производством  
 Fig. 1. Structure of high-tech production management model

Стратегический уровень охватывает цели всего предприятия и механизмы принятия решений. Этот уровень облегчает долгосрочное планирование и стратегии распределения ресурсов, устанавливая базовые параметры для операций более низкого уровня [6]. Функции стратегического уровня существенно влияют на общую эффективность системы и результаты деятельности организации.

Внедрение на тактическом уровне направлено на удовлетворение промежуточных требований к оперативному управлению. Этот уровень координирует оптимизацию производственного планирования и управление использованием ресурсов, устраняя разрыв между стратегическими целями и операционной деятельностью [7].

Операционный уровень ориентирован на повседневную производственную деятельность и функции непосредственного контроля. Андерсон и др. приводят доказательства того, что этот уровень требует надежной интеграции систем управления технологическими процессами в ре-

жиме реального времени и управления цехами [8]. Их исследования демонстрируют важность функциональности на операционном уровне для поддержания эффективности производства и контроля качества.

Архитектура интеграции озера данных (рис. 2) представляет собой фундаментальный компонент структуры модели. Комплексные системы интеграции данных должны поддерживать многоуровневый поток информации, включая сбор данных с датчиков и возможности мониторинга в режиме реального времени [9].

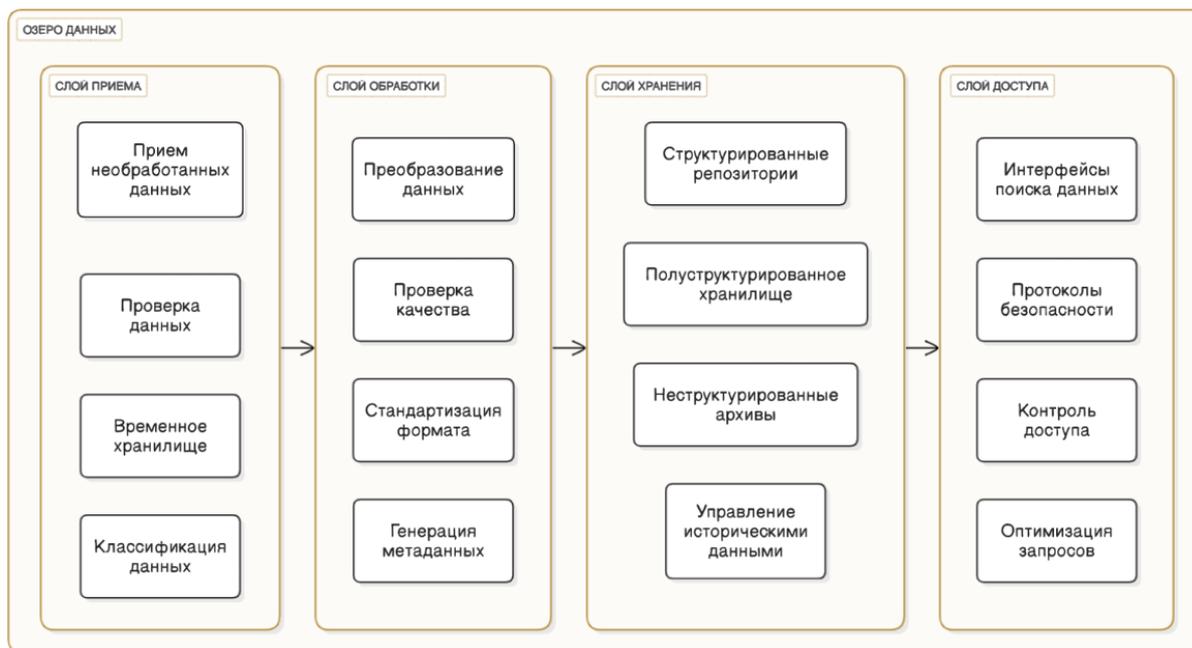


Рис. 2. Структура озера данных  
Fig. 2. Data lake structure

Слой приема представляет собой начальную точку входа для всех данных, поступающих в озеро промышленных данных. Этот слой обрабатывает потоки неструктурированных данных от производственного оборудования, корпоративных систем и внешних источников, реализуя предварительные проверки достоверности при сохранении исходного формата и целостности данных [5]. Слой обеспечивает соответствие входящих данных базовым стандартам качества и включает необходимые метаданные для отслеживания и обработки.

Слой обработки преобразует необработанные данные в пригодную для использования информацию посредством процедур стандартизации и обогащения. Данный слой применяет алгоритмы преобразования, проверки качества и процессы обогащения для подготовки данных к анализу и использованию [10]. Слой обработки управляет требованиями как к обработке в реальном времени, так и к пакетной обработке, обеспечивая соответствие данных организационным стандартам и наличие необходимой контекстной информации.

Слой хранения поддерживает организованное хранилище обработанных данных, поддерживая различные форматы данных и схемы доступа. Данный слой управляет версионностью данных, историческими архивами и отображением взаимосвязей, обеспечивая при этом эффективные возможности извлечения данных [11]. Архитектура хранения вмещает структурированные, полуструктурированные и неструктурированные данные, поддерживая взаимосвязи и контекст между различными типами данных.

Слой доступа обеспечивает использование данных в различных производственных приложениях и для аналитических требований. Данный слой предоставляет интерфейсы для извлечения данных, аналитических операций и синхронизации цифровых двойников, поддерживая при этом соответствующие меры безопасности и ограничения доступа [12]. Слой доступа поддерживает множество схем использования – от операционных запросов в реальном времени до сложной аналитической обработки.

Слои, описанные выше, работают вместе, создавая целостную среду управления данными, поддерживающую различные производственные операции и аналитические требования [9]. Интегрированная структура обеспечивает эффективный поток данных при сохранении качества данных и операционной гибкости, в конечном итоге поддерживая передовые производственные возможности и процессы принятия решений.

Онтологический уровень устанавливает семантические структуры и иерархии взаимосвязей, необходимые для функционирования системы. Уилсон и др. предполагают, что этот уровень должен включать сложные структуры представления знаний и механизмы логического вывода [13]. Их исследования показывают, что надежные онтологические структуры вносят значительный вклад в системный интеллект и возможности принятия решений. Агрегирующим элементом онтологических сущностей цифрового двойника и элементов системы управления является цифровой паспорт, хранящий техническую информацию, исторические, промышленные, расчетные и прочие данные.

Ввиду неоднородности промышленных данных, поступающих в озеро данных, удобно применять нечеткие онтологии как комплексную систему формализации знаний, интегрирующую классическую онтологическую модель с теорией нечетких множеств [14, 15].

В основе данного подхода лежит математический аппарат, позволяющий оперировать неточными и неопределенными понятиями, где каждому элементу  $x$  из универсального множества  $X$  ставится в соответствие степень принадлежности  $\mu(x) \in [0, 1]$ .

Теоретический базис нечетких онтологий формируется на основе интеграции формальной семантики дескрипционной логики и методологии Fuzzy OWL [16]. Ключевыми структурными элементами выступают нечеткие классы, отношения и экземпляры, описываемые через функции принадлежности  $\mu(t, k)$ , где  $t$  представляет термин предметной области, а  $k$  – соответствующую лингвистическую переменную.

В контексте логического вывода степень уверенности в полученном результате определяется выражением

$$S_{rule} = \prod_{i=1}^l \mu(t_i, k_i), \quad (1)$$

где  $l$  – количество термов в правиле, а нормализация показателей осуществляется через

$$S_{nNorm} = \frac{S_n}{\max(S_n)}, \quad (2)$$

где  $S_{nNorm}$  – нормализованное значение степени уверенности рекомендации каждого  $n$ -го правила.

Практическая реализация нечетких онтологий осуществляется через механизмы интеграции с OWL DL и применение SWRL-правил. Формальное описание нечеткого отношения  $R$  между классами  $A$  и  $B$  может быть представлено как

$$R: A \times B \rightarrow [0, 1]. \quad (3)$$

Данный подход позволяет существенно расширить возможности традиционных онтологий в контексте обработки неопределенных данных. При этом каждому аксиоматическому утверждению  $\phi$  ставится в соответствие степень истинности  $\alpha$ , что формально записывается как  $\langle \phi, \alpha \rangle$ .

В условиях современных производственных систем Индустрии 4.0 нечеткие онтологии обеспечивают более гибкий подход к моделированию предметной области. Они позволяют формализовать экспертные знания с учетом неопределенности и субъективности оценок, что особенно важно при построении интеллектуальных систем управления производством.

Эффективность применения нечетких онтологий проявляется в повышении адекватности моделирования сложных систем, где классический булев подход  $\{0, 1\}$  оказывается недостаточным для описания реальных процессов. Использование лингвистических переменных и функций принадлежности позволяет более точно отразить экспертные знания и обеспечить более качественный логический вывод в системах поддержки принятия решений [17–19].

Внедрение агентно-сервисной архитектуры обеспечивает динамические операционные возможности благодаря автономным агентам и механизмам управления сервисами. Исследование [20] подчеркивает важность четко определенных протоколов связи и механизмов координации для

поддержания эффективности системы. Интеграция агента и сервиса значительно повышает адаптивность системы и оперативность реагирования [21].

Уровень контроля и мониторинга обеспечивает непрерывную оптимизацию системы и управление производительностью. Комплексные системы мониторинга должны включать механизмы отслеживания производительности и обеспечения качества [22]. Эффективные системы контроля необходимы для поддержания высокого уровня операционной эффективности.

### **Реализация**

Рассмотрим реализацию описанной выше модели на примере системы поддержки принятия решений в системе многомасштабного моделирования для озера данных цифровых двойников химических материалов и соединений.

Многомасштабное моделирование в современной науке о материалах сталкивается с фундаментальными проблемами обработки, анализа и хранения массивов больших данных. В рамках исследований по материаловедению накапливаются значительные объемы информации, полученной как экспериментальным путем, так и посредством теоретических расчетов.

Для эффективного управления подобными наборами данных требуется специализированная архитектура хранилища. Учитывая неструктурированный или частично структурированный характер данных, оптимальным решением является применение концепции озера данных. Данный подход обеспечивает необходимую гибкость при работе с разнородной информацией из множества независимых источников.

В контексте междисциплинарных исследований на стыке химии и материаловедения особую значимость приобретает систематизация следующих типов данных [23]:

- структурная информация;
- свойства материалов;
- корреляционные зависимости;
- методология теоретического моделирования;
- результаты экспериментальных измерений.

Особого внимания заслуживает моделирование многокомпонентных систем, включающих полимерные соединения, реакционные смеси, сокристаллы.

Методологический инструментарий включает молекулярную динамику, квантово-химические расчеты, методы химической кинетики.

В рамках оптимизации процессов поиска и обработки данных разработан электронный паспорт материалов как структурный элемент цифрового двойника. Паспорт представляет собой комплекс атрибутивных полей, характеризующих композиционный состав, структурные параметры, расчетные и экспериментальные свойства, реакционную способность, построенные модели и закономерности «структура – свойство», реализующий пространство онтологий и связей.

Техническая реализация электронного паспорта осуществляется посредством JSON-объектов (рис. 3), интегрирующих данные из Crystal и Cif файлов, а также результаты расчетов метадинамики. Данная архитектура обеспечивает экспорт данных, методологическую документацию, возможность ручного ввода, интеграцию с библиографическими источниками.

Эффективная обработка данных требует специальной предварительной обработки. В результате дальнейший анализ данных будет более продуктивным. В нашем случае данные предлагается структурировать и хранить в реляционной базе данных. Структура предлагаемой реляционной базы данных показана на рис. 4.

Изначально экспериментальные данные представляют собой набор неструктурированных выходных файлов. Такие данные невозможно сохранить в реляционной базе данных. Поиск и анализ также невозможны.

Методология оптимизации процедур поиска в озерах данных основана на применении агентов-сервисов. Агент транспортного уровня работает со сбором экспериментальных данных через множество каналов. Эти предварительные данные существуют в неструктурированном формате, преимущественно состоящем из выходных файлов различных химических экспериментальных процедур. Эти файлы содержат всестороннюю информацию о свойствах материалов и характеристиках соединений.

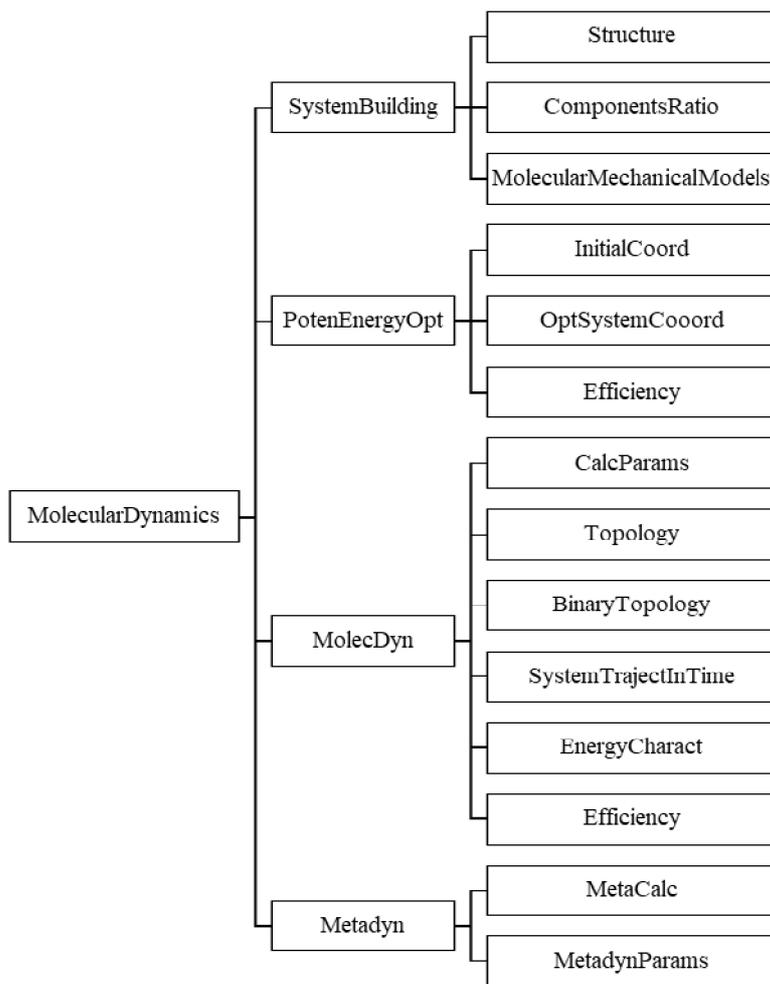


Рис. 3. Структура JSON-объекта для молекулярно-динамических расчетов  
 Fig. 3. JSON object structure for molecular dynamics calculations

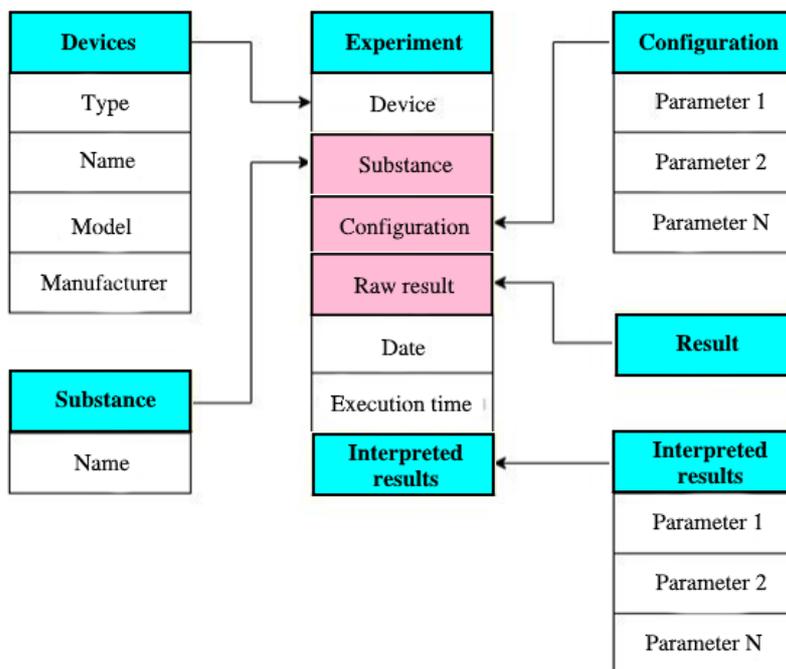


Рис. 4. Пример структуры базы данных результатов химических экспериментов  
 Fig. 4. Example of database structure for chemical experiment results

Агент-сервис трансформации включает систематическое преобразование неструктурированных данных в организованные форматы. Реализация использует архитектуру JSON (JavaScript Object Notation), облегчая организацию трех фундаментальных структурных компонентов: данные кристаллографической структуры, данные кристаллографического информационного файла (CIF) и результаты вычислений молекулярной динамики.

Архитектура базы данных использует двойной системный подход, включающий реляционные и нереляционные системы баз данных. Реализация реляционной базы данных через PostgreSQL обеспечивает возможности структурированных запросов и управление индексируемыми атрибутами. Одновременно реализация нереляционной базы данных через HBase использует структурную организацию семейства столбцов, оптимизированную для распределенного управления данными агентом-парсером выходных файлов.

Структурированный протокол поиска использует архитектуру индексируемых JSON-файлов, демонстрирует логарифмическую сложность  $O(\log(n))$ , реализует организацию на основе атрибутов и показывает превосходные метрики производительности по сравнению с неструктурированным протоколом поиска, который использует необработанные файлы, демонстрируя линейную вычислительную сложность, что требует увеличенных вычислительных ресурсов и показывает сниженную эффективность производительности (см. таблицу).

Время поиска структурированных и неструктурированных файлов  
Search time for structured and unstructured files

Количество файлов	Время поиска, мс	
	Структурированные файлы	Неструктурированные файлы
100	0,1	496,8
1 000	0,7	4 583,6
5 000	3	25 975,6
10 000	5,8	47 565,6
15 000	8,8	69 502,8
20 000	11,3	91 524,7
25 000	14,3	113 184,5
30 000	16,6	156 251,3

Эмпирический анализ выявляет значительные различия в производительности между этими подходами. Структурированные протоколы поиска демонстрируют время отклика на уровне миллисекунд, в то время как неструктурированные протоколы поиска требуют обработки на уровне секунд и минут. Примечательно, что разница в производительности увеличивается пропорционально расширению объема данных. Реализация структурированных протоколов поиска демонстрирует превосходную эффективность в операциях извлечения данных в среде озер данных цифровых двойников.

Эта комплексная методология обеспечивает надежную основу для оптимизации процедур поиска в системах управления химическими данными, особенно в контексте реализаций цифровых двойников. Подход значительно повышает доступность данных и эффективность обработки, что является критически важными факторами в современных средах химических исследований и анализа.

Применение методологии оптимизации поисковых процедур в металлургии и наукоемком производстве представляет собой перспективное направление цифровой трансформации промышленности. В контексте металлургического производства данная методология позволяет существенно оптимизировать работу с данными о составах сплавов и их свойствах, обеспечивая эффективный анализ технологических режимов плавки и обработки металлов. Особую значимость представляет возможность осуществления контроля качества продукции на основе накопленных данных и прогнозирования свойств новых материалов.

Данный пример нетрудно масштабировать на другие области знаний и области применения. В сфере наукоемкого производства внедрение структурированного поиска способствует совершенствованию организации данных о технологических процессах и управлению информацией

о сложном оборудовании. Это позволяет осуществлять комплексную оптимизацию производственных циклов и обеспечивать высокоэффективный контроль качества продукции. Существенным преимуществом является возможность реализации предиктивного обслуживания оборудования на основе анализа накопленных данных.

Практическая значимость внедрения данной методологии выражается в значительном сокращении времени поиска технологических решений и повышении точности подбора параметров производства. Анализ исторических данных способствует улучшению качества продукции и оптимизации использования ресурсов, что приводит к существенному снижению производственных издержек.

Особую ценность представляет возможность создания цифровых двойников производственных линий, технологических процессов и отдельных агрегатов. Данный подход позволяет осуществлять комплексное моделирование производственных процессов, прогнозировать результаты технологических изменений и оптимизировать режимы работы оборудования. Кроме того, использование систем управления, основанных на технологии цифровых двойников, способствует эффективному предупреждению нештатных ситуаций и планированию технического обслуживания.

### **Заключение**

Внедрение моделей управления наукоемким производством на основе цифровых двойников является примером трансформации традиционных производственных парадигм. Исследование показывает, что интеграция цифровых двойников с озером данных обеспечивает повышение операционной эффективности при одновременном значительном улучшении возможностей принятия решений в режиме реального времени. Кроме того, благодаря этой сложной технологической базе производственные процессы демонстрируют повышенную гибкость и адаптивность.

Многоуровневая архитектура, объединяющая стратегический, тактический и операционный уровни, доказала свою эффективность в практических приложениях. Этот архитектурный подход, поддерживаемый комплексной реализацией озера данных, позволяет успешно управлять как структурированными, так и неструктурированными данными, в то время как онтологическая инженерия устанавливает важные семантические связи между компонентами системы. Эмпирические данные, в частности, полученные в результате анализа химических материалов, подтверждают теоретическую основу и демонстрируют значительное повышение операционной эффективности.

Примечательно, что протоколы поисковой оптимизации демонстрируют исключительное повышение производительности, а структурированные подходы работают в геометрической прогрессии быстрее, чем традиционные неструктурированные методологии. Это количественное улучшение подчеркивает практическую ценность предлагаемой платформы, а также ее потенциал для масштабирования в различных промышленных приложениях. Адаптивность модели предполагает ее широкое применение в различных отраслях производства, что открывает возможности для широкого внедрения в современных промышленных условиях.

Результаты исследования закладывают прочную основу для дальнейшего развития интеллектуальных производственных систем, одновременно определяя перспективные направления для будущих исследований и разработок. По мере развития технологий Индустрии 4.0 интеграция возможностей искусственного интеллекта и машинного обучения с платформами цифровых двойников открывает возможности для повышения производительности систем и оптимизации операций. Это исследование вносит вклад в накопление знаний об управлении наукоемким производством, а также дает практическую информацию для промышленного внедрения.

Синтез цифровых двойников, озер данных и онтологической инженерии создает комплексную основу для управления наукоемким производством, позволяя организациям сохранять конкурентные преимущества во все более сложных производственных условиях. По мере того как глобальное производство продолжает переходить на цифровые технологии, такие интегрированные подходы будут приобретать все большее значение для повышения операционной эффективности и устойчивого конкурентного преимущества в меняющемся промышленном ландшафте.

### Список литературы

1. Petrov A.V., Ivanov S.K. Transformation of Russian Manufacturing: Current State Analysis // Russian Journal of Industrial Engineering. 2023. Vol. 29, no. 3. P. 234–251.
2. Организация цифровых производств Индустрии 4.0 на основе киберфизических систем и онтологий / А.В. Гурьянов, Д.А. Заколдаев, А.В. Шукалов и др. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 2. С. 268-276. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277
3. Thompson E., Rodriguez C. Defense and Aerospace Industries in Russia: Technological Development Analysis // International Journal of Aerospace Technology. 2023. Vol. 43, no. 3. P. 345–362.
4. Anderson K. Regional Development Patterns in Russian High-Tech Manufacturing: A Comparative Analysis // Journal of Industrial Development. 2023. Vol. 34, no. 6. P. 789–806.
5. Thompson E., Rodriguez C. Hierarchical Structures in Digital Twin-Based Management Models // International Journal of Production Systems. 2023. Vol. 43, no. 3. P. 346–359.
6. Davidson M., Chen H. Digital Transformation in Russian Manufacturing: Progress and Barriers // International Journal of Digital Manufacturing. 2023. Vol. 37, no. 5. P. 567–582.
7. Brown T., Zhang W. Implementation Challenges in Russian Manufacturing: Digital Transformation Analysis // International Journal of Production Research. 2023. Vol. 36, no. 5. P. 445–462.
8. Anderson K. Knowledge-based manufacturing systems in Russian enterprises: Implementation and performance analysis // Journal of Intelligent Manufacturing. 2023. Vol. 34, no. 6. P. 789–806.
9. Martinez C., Park S. Multi-Layer Data Integration Frameworks in Advanced Manufacturing // Manufacturing Excellence Quarterly. 2023. Vol. 42, no. 6. P. 678–695.
10. Davidson M., Chen H. Strategic Implementation of Digital Twin-Based Management Systems // International Journal of Production Management. 2023. Vol. 37, no. 5. P. 567–582.
11. Brown T., Zhang W. Managing Complexity in Data Lakes: Ontological Approaches and Solutions // International Journal of Data Science. 2023. Vol. 36, no. 5. P. 445–462.
12. Anderson K. Ontological Frameworks in Research Data Lakes: Implementation and Analysis // Journal of Data Management. 2023. Vol. 34, no. 6. P. 789–806.
13. Wilson R. Innovation Centers and Technology Parks in Russia: Development Analysis // Journal of Innovation Management. 2023. Vol. 31, no. 4. P. 234–251.
14. Мошкин В.С., Ярушкина Н.Г. Методики построения нечетких онтологий сложных предметных областей // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015): материалы V Междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19–21 февраля 2015 г.) / под ред. В.В. Голенкова. Минск: БГУИР, 2015. С. 401–406.
15. Антонов В.В., Бармина О.В., Никулина Н.О. Поддержка принятия решений при управлении программными проектами на основе нечеткой онтологии // Онтология проектирования. 2020. Т. 10, № 1 (35). С. 121–140. DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-121-140
16. Бурдо Г.Б., Воробьева Е.В. Онтологический подход при проектировании технологических процессов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем (OSTIS-2015): материалы V междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 19–21 февраля 2015 г.) / под ред. В.В. Голенкова. Минск: БГУИР, 2015. С. 461–464.
17. Бурдо Г.Б., Семенов Н.А., Воронцов Н.В. Подходы к созданию онтологий для автоматизированных систем в машиностроительных производствах // Программные продукты и системы. 2020. Т. 33, № 2. С. 304–309. DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309
18. Массель А.Г., Гаськова Д.А. Онтологический инжиниринг для разработки интеллектуальной системы анализа угроз и оценки рисков кибербезопасности энергетических объектов // Онтология проектирования. 2019. Т. 9, № 2 (32). С. 225–238.
19. Применение онтологического подхода к процессу проектирования информационной системы / А.Н. Набатов, И.Э. Веденяпин, А.Р. Мухтаров // Труды МАИ. 2018. № 102. С. 81–84.
20. Smith A. Implementation Strategies for Digital Twin-Based Management Models in Manufacturing // Journal of Industrial Management. 2023. Vol. 45, no. 4. P. 456–473.
21. Кузьмин В.Р., Загоруйко Ю.А. Применение агентно-сервисного подхода при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений в энергетике // Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18, № 3. С. 5–18. DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-5-18

22. Johnson M, Park S. Performance Monitoring Frameworks in Integrated Manufacturing Systems // *Journal of Operations Management*. 2023. Vol. 39, no. 8. P. 890–906.
23. Information Storage and Retrieval System for a Molecular Dynamics Based Digital Twin of Materials / D. Topolsky, A. Belyakov, V. Pochinskaia et al. // 2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Yekaterinburg, Russian Federation, 2022. P. 1760–1764. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017100

### References

1. Petrov A.V., Ivanov S.K. Transformation of Russian Manufacturing: Current State Analysis. *Russian Journal of Industrial Engineering*. 2023;29(3):234–251.
2. Gurjanov A.V., Zakoldaev D.A., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O. Industry 4.0 digital production organization based on cyber and physical systems and ontologies. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics = Nauchno-tehnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2018;18(2):268-276. (In Russ.) DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277
3. Thompson E., Rodriguez C. Defense and Aerospace Industries in Russia: Technological Development Analysis. *International Journal of Aerospace Technology*. 2023;43(3):345–362.
4. Anderson K. Regional Development Patterns in Russian High-Tech Manufacturing: A Comparative Analysis. *Journal of Industrial Development*. 2023;34(6):789–806.
5. Thompson E., Rodriguez C. Hierarchical Structures in Digital Twin-Based Management Models. *International Journal of Production Systems*. 2023;43(3):346–359.
6. Davidson M., Chen H. Digital Transformation in Russian Manufacturing: Progress and Barriers. *International Journal of Digital Manufacturing*. 2023;37(5):567–582.
7. Brown T., Zhang W. Implementation Challenges in Russian Manufacturing: Digital Transformation Analysis. *International Journal of Production Research*. 2023;36(5):445–462.
8. Anderson K. Knowledge-based manufacturing systems in Russian enterprises: Implementation and performance analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2023;34(6):789–806.
9. Martinez C., Park S. Multi-Layer Data Integration Frameworks in Advanced Manufacturing. *Manufacturing Excellence Quarterly*. 2023;42(6):678–695.
10. Davidson M., Chen H. Strategic Implementation of Digital Twin-Based Management Systems. *International Journal of Production Management*. 2023;37(5):567–582.
11. Brown T., Zhang W. Managing Complexity in Data Lakes: Ontological Approaches and Solutions. *International Journal of Data Science*. 2023;36(5):445–462.
12. Anderson K. Ontological Frameworks in Research Data Lakes: Implementation and Analysis. *Journal of Data Management*. 2023;34(6):789–806.
13. Wilson R. Innovation Centers and Technology Parks in Russia: Development Analysis. *Journal of Innovation Management*. 2023;31(4):234–251.
14. Moshkin V.S., Yarushkina N.G. [Methods for Constructing Fuzzy Ontologies of Complex Subject Areas]. In: *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems Design (OSTIS-2015): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BSUIR; 2015. P. 401–406. (In Russ.)
15. Antonov V.V., Barmina O.V., Nikulina N.O. Decision-making support in software project management based on fuzzy ontology. *Ontology of Designing*. 2020;10(1(35)):121–140. (In Russ.) DOI: 10.18287/2223-9537-2020-10-1-121-140
16. Burdo G.B., Vorobyeva E.V. [Ontological Approach in Technological Process Design]. In: *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems Design (OSTIS-2015): Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. Minsk: BSUIR; 2015. P. 461–464. (In Russ.)
17. Burdo G.B., Semenov N.A., Vorontsov N.V. Approaches to creating ontologies for automated systems in machine-building industries. *Software & Systems*. 2020;33(2):304–309. (In Russ.) DOI: 10.15827/0236-235X.130.304-309
18. Massel A.G., Gaskova D.A. Ontological engineering for the development of the intelligent system for threats analysis and risk assessment of cybersecurity in energy facilities. *Ontology of Designing*. 2019;9(2(32)):225–238. (In Russ.)
19. Nabatov A.N., Vedenyapin I.E., Mukhtarov A.R. Applying ontology approach to information system design. *Trudy MAI*. 2018;(102):81–84. (In Russ.)

20. Smith A. Implementation Strategies for Digital Twin-Based Management Models in Manufacturing. *Journal of Industrial Management*. 2023;45(4):456–473.

21. Kuzmin V.R., Zagorulko Yu.A. Usage of the Agent-Service Approach for the Development of Intelligent Decision Support Systems in the Energy Sector. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*. 2020;18(3):5–18. (In Russ.) DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-3-5-18

22. Johnson M., Park S. Performance Monitoring Frameworks in Integrated Manufacturing Systems. *Journal of Operations Management*. 2023;39(8):890–906.

23. Topolsky D., Belyakov A., Pochinskaia V., Topolskaya I., Yumagulov N., Fedorov D. Information Storage and Retrieval System for a Molecular Dynamics Based Digital Twin of Materials. In: *2022 IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. Yekaterinburg, Russian Federation, 2022. P. 1760–1764. DOI: 10.1109/SIBIRCON56155.2022.10017100

### **Информация об авторах**

**Логиновский Олег Витальевич**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; loginovskiiiov@susu.ru.

**Белякова Вероника Алексеевна**, аспирант кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; beliakovava@susu.ru.

### **Information about the authors**

**Oleg V. Loginovskiy**, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; loginovskiiiov@susu.ru.

**Veronica A. Beliakova**, Postgraduate student of the Department of Informational and Analytical Support of Control in Social and Economic Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; beliakovava@susu.ru.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Contribution of the authors:** the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

**Статья поступила в редакцию 14.11.2024**

**The article was submitted 14.11.2024**