

КАЧЕСТВО, БЕЗОПАСНОСТЬ И ГИГИЕНА ПИТАНИЯ /
QUALITY, SAFETY AND FOOD HYGIENE

Научная статья / *Original article*

УДК 664

DOI: 10.31208/2618-7353-2026-34-58-71

**ПИЩЕВЫЕ БИОИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТРИЦЫ
В МОЛОЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: ЦИФРОВАЯ СРЕДА,
ВЕРИФИКАЦИЯ, РЕЦИКЛИНГ И АДДИТИВНОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

**FOOD BIOINFORMATIONAL MATRICES
IN THE DAIRY INDUSTRY: DIGITAL ENVIRONMENT,
VERIFICATION, RECYCLING, AND ADDITIVE MANUFACTURING**

Константин Э. Ануфриев, младший научный сотрудник

Владислав К. Семипятный, доктор технических наук

Дарья В. Климова, инженер-исследователь

Анастасия В. Косарева, инженер-исследователь

Konstantin E. Anufriev, Junior Researcher

Vladislav K. Semipyatny, Dr. Sci. (Technology)

Daria V. Klimova, Research Engineer

Anastasia V. Kosareva, Research Engineer

Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности, Москва

All-Russian Dairy Research Institute, Moscow, Russia

Контактное лицо: Ануфриев Константин Эдуардович, младший научный сотрудник, лаборатория пищевой метаинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности; 115093, Россия, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35/7;
e-mail: k_anufriev@vnimi.org; тел.: 8(926)027-80-92; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6632-8004>.

Для цитирования: Ануфриев К.Э., Семипятный В.К., Климова Д.В., Косарева А.В. Пищевые биоинформационные матрицы в молочной промышленности: цифровая среда, верификация, рециклинг и аддитивное производство // Аграрно-пищевые инновации. 2026. Т. 34. № 2. С. 58-71. <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2026-34-58-71>.

Principal Contact: Konstantin E. Anufriev, Junior Researcher, Laboratory of Food Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute; 35/7, Lyusinovskaya St., Moscow, 115093, Russian Federation;
email: k_anufriev@vnimi.org; tel.: +7(926)027-80-92; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6632-8004>.

For citation: Anufriev KE, Semipyatny VK, Klimova DV, Kosareva AV. Food bioinformational matrices in the dairy industry: digital environment, verification, recycling, and additive manufacturing. *Agrarno-pishchevye innovacii = Agrarian-and-food innovations*. 2026;34(2):58-71. (In Russ.). <https://doi.org/10.31208/2618-7353-2026-34-58-71>.

Резюме

Цель. Разработать прототип цифровой реализации «Базы ПБМ» и показать возможные применения пищевых биоинформационных матриц в молочной промышленности на сценариях верификации пищевого объекта, рециклинга вторичных пищевых потоков и аддитивного производства.

Материалы и методы. Прототип цифровой среды «База ПБМ» разработан на основе мультионтологической архитектуры представления пищевого объекта, которая включает контуры

идентификации, описания, измерения и верификации, а также производственный слой. Апробация выполнена на модельном наборе молочных объектов с различной матричной организацией. Сигнатуры формировали с учетом принципов системной инженерии, архитектурного описания и метрологического обеспечения данных (ISO/IEC/IEEE 42010, ISO/IEC/IEEE 15288, ISO/IEC 17025, ISO 5725). Производственные связи представлены в графовой СУБД Neo4j с использованием языка Cypher.

Результаты. Разработан прототип интерфейса «База ПБМ», в который внесены сигнатуры молочных пищевых объектов и графы производственных связей. В прототипе реализованы каталог пищевых объектов, карточка сигнатуры, экран сравнения и графовый экран производственного слоя. Показано, что сопоставление ожидаемой и фактической сигнатуры позволяет определять несоответствия по уровню представления: идентификация, описание матричной структуры, измерительный контур, критерии соответствия или производственный слой. Для рециклинга цифровая сигнатура позволяет учитывать матричную организацию пищевого объекта, фактические показатели и возможный маршрут переработки. Для аддитивного производства апробировано формирование сигнатуры ПБМ продукта до получения пищевого объекта аддитивным способом, включая атрибут *fabrication_instruction*, связывающий геометрию, траекторию печати, порядок нанесения слоев и проверку неизменности файла.

Заключение. ПБМ переведены в формат цифровой среды, где сигнатура пищевого объекта становится рабочим элементом интерфейса, сравнения, атрибутного поиска и производственного графа. Продемонстрированы три сценария применения цифровой сигнатуры в «Базе ПБМ»: верификация, рециклинг и аддитивное производство. Дальнейшее развитие связано с версионированием сигнатур, учетом неопределенности измерений и интеграцией с лабораторными и производственными контурами данных.

Ключевые слова: пищевая биоинформационная матрица, ПБМ, сигнатура пищевого объекта, молочная промышленность, верификация, цифровая среда, граф производственных связей, рециклинг, аддитивное производство, мультионтологическая архитектура

Abstract

Purpose. To develop a prototype digital implementation of the FBM Database and demonstrate possible applications of Food Bioinformation Matrices in the dairy industry in three scenarios: food object verification, recycling of secondary food streams, and additive manufacturing.

Materials and Methods. The prototype digital environment "FBM Database" was developed on the basis of a multi-ontological architecture for representing a food object. The architecture includes identification, description, measurement, and verification loops, as well as a production layer. The prototype was tested on a model set of dairy food objects with different matrix organizations: emulsion, fermented, fat-based, powder, protein-gel, and composite additive matrices. Signature formation was carried out in accordance with the principles of systems engineering, architecture description, and metrological data assurance (ISO/IEC/IEEE 42010, ISO/IEC/IEEE 15288, ISO/IEC 17025, ISO 5725). Production relationships were represented in the Neo4j graph database using the Cypher query language.

Results. A prototype interface of the "FBM Database" was developed, containing signatures of dairy food objects and production relationship graphs. The prototype includes a food object catalog, a signature card, a comparison screen, and a graph screen for the production layer. It was shown that comparison of the expected and actual signatures makes it possible to identify discrepancies at the level of representation: identification, matrix structure description, measurement loop, conformity criteria, or production layer. For recycling, the digital signature makes it possible to

consider the matrix organization of the food object, actual indicators, and possible processing route. For additive manufacturing, the formation of an FBM product signature before obtaining the food object by additive means was tested, including the fabrication_instruction attribute that links geometry, printing path, layer deposition order, and file integrity verification.

Conclusion. *FBM were translated into the format of a digital environment in which the food object signature becomes a working element of the interface, comparison, attribute-based search, and production graph. Three scenarios for applying the digital signature in the "FBM Database" were demonstrated: verification, recycling, and additive manufacturing. Further development is associated with signature versioning, accounting for measurement uncertainty, and integration with laboratory and production data loops.*

Keywords: *food bioinformational matrix, FBM, food object signature, dairy industry, verification, digital environment, production relationship graph, recycling, additive manufacturing, multi-ontological architecture*

Введение. Для современных пищевых производств все более значимой становится задача описания пищевого объекта как элемента технологической, биотехнологической и цифровой системы [1–3]. В молочной промышленности это связано с усложнением производственного контура: наряду с классической переработкой молока используются цифровые решения «Dairy 4.0», биотехнологические платформы получения ингредиентов и методы аддитивного формирования пищевых структур [4–7]. Статус пищевого объекта определяется задачей анализа и этапом технологического цикла. Один и тот же материальный пищевой объект может рассматриваться как готовая продукция, промежуточный компонент, сырье для следующей операции или ресурс для рециклинга. Описания, основанного только на наименовании, рецептурном составе и перечне контролируемых показателей, для этого недостаточно [8]. Существующие информационные системы закрывают отдельные аспекты описания пищевого объекта. Пищевые онтологии формализуют терминологию и отношения между объектами, базы состава аккумулируют сведения о компонентах, системы прослеживаемости связывают партию с производственными и логистическими событиями [9–13]. Однако при работе с конкретным экземпляром продукта требуется связать эти сведения с его структурным состоянием, происхождением, условиями измерения и критерием допустимого использования. Без такой связи численное значение показателя остается изолированной характеристикой и не обеспечивает надежной интерпретации состояния пищевого объекта [14].

Для устранения этого разрыва разработана система описания на основе пищевых биоинформационных матриц (ПБМ). ПБМ рассматривается как мультионтологическая архитектура формального представления пищевого объекта, описанная с учетом принципов системной инженерии и архитектурного описания «ISO/IEC/IEEE 42010» и «ISO/IEC/IEEE 15288» [15; 16]. Архитектура разносит данные по уровням идентификации, описания, измерения и верификации, а производственный слой фиксирует происхождение и преобразования объекта. Сигнатура формируется от выбора идентичности к проверке фактического экземпляра. Идентификация задает заявленную принадлежность пищевого объекта к продуктовому классу и фиксирует его машиночитаемый идентификатор в системе ПБМ. Описание раскрывает матричную организацию, фазовый состав и структурные признаки пищевого объекта. Измерительный контур связывает свойства с методами получения данных и условиями измерения. Верификация применяет критерии соответствия к фактическим значениям и позволяет определить уровень расхождения между заявленным и фактическим состоянием экземпляра. При

несоответствии экземпляра заявленному продукту разнесение уровней определяет источник несоответствия: идентичность, структурное состояние, условия измерения или критерий верификации [9–13; 15; 16]. Функциональные возможности ПБМ раскрываются в цифровой среде, где сигнатуры формируются, хранятся, сравниваются и анализируются как связанные объекты.

Настоящая работа рассматривает прототип программного продукта «База ПБМ» как цифровую среду для формирования и сопоставления сигнатур, включающую три сценария применения ПБМ: верификацию пищевых объектов, рециклинг потоков продукции с истекшим сроком годности и проектирование аддитивных продуктов с сигнатурой.

Материалы и методы. Работа выполнена как концептуально-прикладная апробация цифровой среды «База ПБМ» на модельном наборе молочных объектов. Методическая задача состояла в воспроизведении последовательности действий, с помощью которой пищевой объект переводится из продуктового описания в цифровую сигнатуру, размещается в прототипе интерфейса, связывается с графом производственных отношений и затем используется в трех сценариях применения: верификации, рециклинге и аддитивном производстве.

В прототип «База ПБМ» вносили сигнатуры молочных пищевых объектов с различной матричной организацией и графы производственных связей. Интерфейс использовали для отображения каталога пищевых объектов, карточки сигнатуры, экрана сравнения и графового представления производственного слоя.

Опубликованная концепция ПБМ [8] использовалась как исходная теоретическая предпосылка. В настоящей работе применяется уже форма, эволюционировавшая до мультионтологической архитектуры цифрового представления пищевого объекта с учетом принципов архитектурного описания и системной инженерии ISO/IEC/IEEE 42010 и ISO/IEC/IEEE 15288 [15; 16]. Архитектура была представлена как система контуров уровней идентификации, описания, измерения, верификации и контура производственного слоя. Такое построение позволяло фиксировать пищевой объект одновременно как продуктовый класс, матричную структуру, набор измеряемых свойств в виде метаданных, систему критериев соответствия и элемент производственного графа.

Для воспроизведения работы сначала задавали состав сигнатуры пищевого объекта. В контуре идентификации фиксировали заявленную принадлежность объекта к продуктовому классу, устойчивый идентификатор, каноническое имя и родительскую категорию. В контуре описания раскрывали матричную организацию, фазовый состав, компонентный набор, структурные признаки и микробный консорциум, если он применим. В контуре измерения связывали показатель с единицей измерения, методом и условиями получения результата. В контуре верификации задавали допустимые значения, диапазоны, пороговые уровни или качественные критерии соответствия. Производственный слой описывал происхождение объекта, сырье, промежуточные продукты, компоненты, микроорганизмы и технологические преобразования.

При формировании сигнатуры соблюдали правило разнесения уровней. Метод измерения относили к измерительному контуру, а допустимые значения и критерии соответствия – к контуру верификации. Структурные признаки объекта фиксировали в контуре описания, происхождение и технологические преобразования – в производственном слое. Такое разделение позволяло определить, где возникает расхождение между ожидаемой и фактической сигнатурой: в заявленной идентичности, описании матрицы, методе или условиях измерения, критерии соответствия либо производственной истории объекта.

Идентификатор объекта строили по принципу последовательного уточнения: тип объекта, продуктовый класс и порядковый номер. Например, в PRD-BUTTER-001 элемент PRD обозначал готовый продукт, BUTTER – сливочное масло, 001 – порядковый номер внутри класса. Атрибуты записывали на английском языке в формате snake_case, поскольку сигнатура рассматривалась как машиночитаемый объект цифровой среды. Один и тот же атрибут должен был сохранять устойчивое имя в таблице, карточке объекта, графовой модели, JSON-представлении и программной выгрузке. Такой способ записи снижал риск расхождений между интерфейсом, данными и графовой реализацией.

Объектами апробации выбраны молочные продукты (таблица 1) с различной матричной организацией: жидкая эмульсионная (молоко пастеризованное), ферментированная мультифазная (кефир), жировая (масло сливочное), порошковая (сухое обезжиренное молоко), белковая гелевая (йогурт) и белковая гелевая (печатная) (паста молочно-белковая для 3D-печати), а также составной аддитивный продукт. Набор объектов формировали так, чтобы проверить переносимость одной архитектурной логики между продуктами с разным физико-химическим и технологическим устройством. Для каждого объекта задавали идентификатор, наименование и тип матрицы.

Таблица 1. Объекты апробации

Table 1. Validation objects

Идентификатор <i>Identifier</i>	Наименование <i>Name</i>	Тип матрицы <i>Matrix type</i>
PRD-MILK-001	Молоко пастеризованное <i>Pasteurized milk</i>	Жидкая эмульсионная <i>Liquid emulsion</i>
PRD-KEFIR-001	Кефир <i>Kefir</i>	Ферментированная мультифазная <i>Fermented multi-phase</i>
PRD-BUTTER-001	Масло сливочное несоленое, 82,5% <i>Unsalted butter, 82.5%</i>	Жировая, водно-жировая дисперсная система <i>Fatty, water-fatty dispersed system</i>
PRD-BUTTER-004	Масло сливочное соленое, 80% <i>Salted butter, 80%</i>	Жировая, водно-жировая дисперсная система + соль <i>Fatty, water-fatty dispersed system + salt</i>
PRD-MILKPWD-001	Молоко сухое обезжиренное <i>Skim milk powder</i>	Порошковая <i>Powder</i>
PRD-YOG-001	Йогурт <i>Yogurt</i>	Белковый гель <i>Protein gel</i>
PRD-3DPRINT-PASTE-001-CAT	Паста молочно-белковая для 3D-печати <i>Milk-and-protein paste for 3D printing</i>	Белковый гель (печатный) <i>Protein gel (printed)</i>
PRD-3DPRINT-CUBE-BUTTER-001	Составной аддитивный продукт <i>Composite additive product</i>	Составная (оболочка + наполнитель) <i>Composite (shell + filler)</i>

Для заполнения измерительного и верификационного контуров использовали методические и нормативные источники, связанные с оценкой показателей молочных продуктов. Метрологическую часть соотносили с ISO/IEC 17025 и ISO 5725, поскольку при сопоставлении ожидаемой и фактической сигнатуры необходимо фиксировать метод, условия получения ре-

зультата и характеристики точности измерений [17; 18]. Нормативную базу задавали по действующим стандартам (ГОСТ 5867-2023, ГОСТ 23327-98, ГОСТ 3624-92, ГОСТ 26781-85, ГОСТ 32901-2014, ГОСТ 32915-2014).

Сформированные сигнатуры переносили в прототип интерфейса «База ПБМ». В каталоге объектов отображали перечень сигнатур и заполненность контуров. В карточке объекта раскрывали атрибуты выбранной сигнатуры по уровням представления. В экране сравнения сопоставляли сигнатуры и фиксировали различия по идентификационным, описательным, измерительным и верификационным атрибутам. Такой порядок позволял проверить сигнатуру как цифровой объект, пригодный для хранения, сопоставления и атрибутного поиска. Производственный слой реализовывали в графовой СУБД Neo4j версии 5.x с использованием языка запросов Cypher [19]. В графовую модель вносили узлы продуктов, сырья, компонентов, микроорганизмов, технологических процессов и промежуточных объектов. Связи задавали типами SUBSTRATE_FOR, PRODUCES, HAS_COMPONENT и GELATION. Для проверки графовой реализации выполняли запросы Cypher, позволяющие восстановить путь от сырья и технологического процесса к профилю конечного объекта.

После внесения сигнатур и графов в прототип демонстрировали три сценария применения ПБМ. В сценарии верификации сопоставляли ожидаемую сигнатуру продукта и фактическую сигнатуру экземпляра, затем определяли контур первого расхождения.

В сценарии рециклинга сигнатуру использовали для оценки вторичного или просроченного потока перед выбором маршрута переработки.

В сценарии аддитивного производства сигнатуру формировали до получения объекта и включали в производственный слой атрибут fabrication_instruction, связывающий геометрию, траекторию печати, стратегию заполнения, переключение картриджей и проверку неизменности файла [7; 15; 16].

Результаты и обсуждение. Авторами разработан и проходит апробацию прототип программного продукта «База ПБМ». В прототип внесены сигнатуры модельных молочных пищевых объектов и графы производственных связей. Интерфейс включает каталог пищевых объектов, карточку сигнатуры, экран сравнения и графовый экран производственного слоя. Эти элементы использованы для демонстрации трех сценариев применения ПБМ: верификации, рециклинга и аддитивного производства.

Центральным объектом цифровой среды выступает сигнатура – формализованный профиль атрибутов пищевого объекта. В «Базе ПБМ» она представлена по пяти контурам: «ID–identification» (идентификация), «D–description» (описание), «M–measurement» (измерение), «A–verification» (верификация) и «P–production» (производственный слой). Состав сигнатуры определяется природой объекта и задачей анализа. Незаполненный контур остается видимым для пользователя и машины, обозначая границу применимости профиля.

В ПБМ эти данные собираются в один профиль, где каждый атрибут отнесен к своему контуру и сохраняет тип представления. Каталог объектов (рисунок 1) показывает сигнатуры в табличном виде и отражает заполненность контуров. По нему видно, какие пищевые объекты готовы к сравнению, какие пригодны только для идентификации, где требуется доработка измерительного или производственного слоя.

Карточка пищевого объекта (рисунок 2) раскрывает профиль по контурам. Структурные атрибуты, измеренные значения и критерии верификации остаются в разных областях интерфейса.

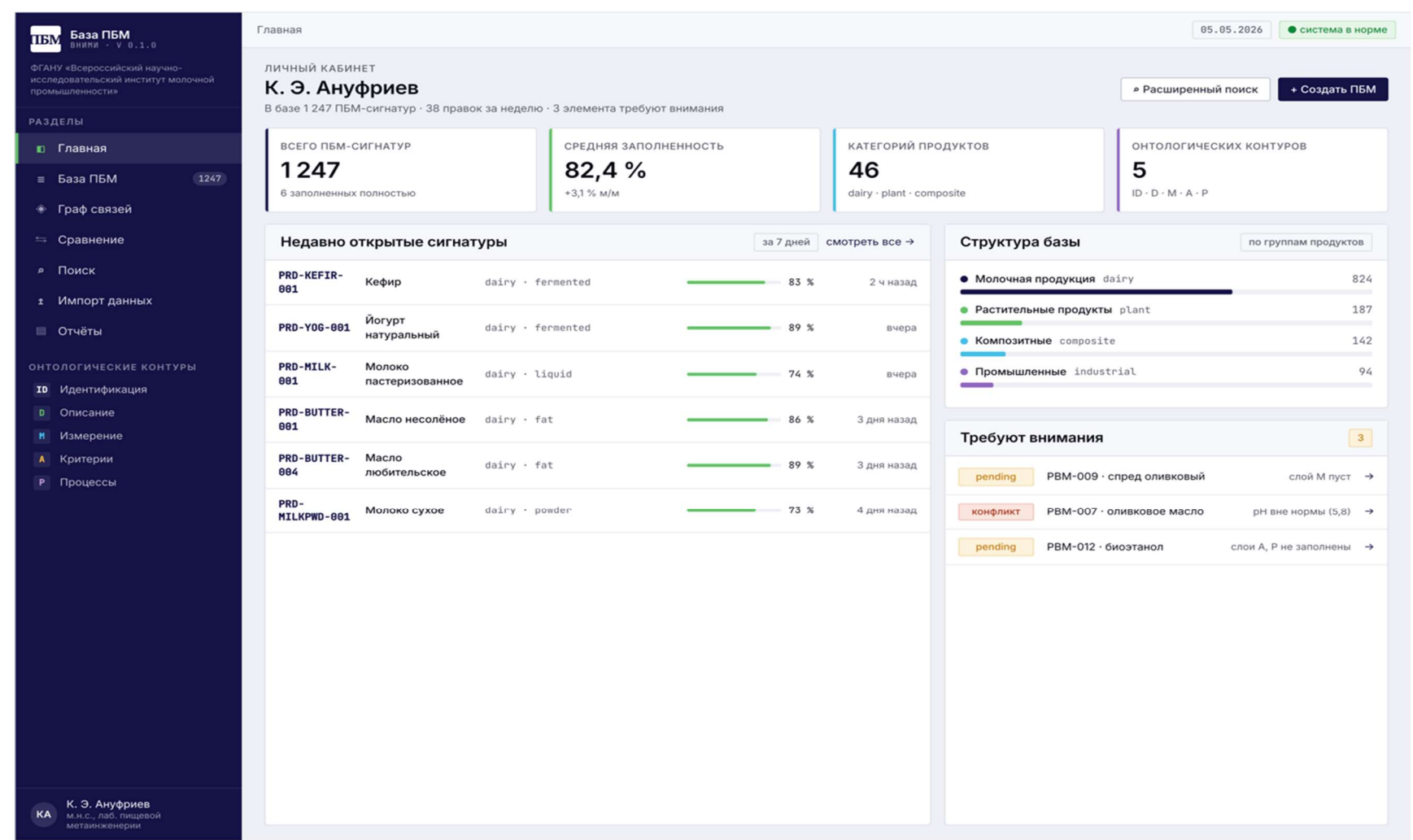


Рисунок 1. Каталог пищевых объектов с индикаторами заполненности по контурам
Figure 1. Food object catalog with contour completeness indicators

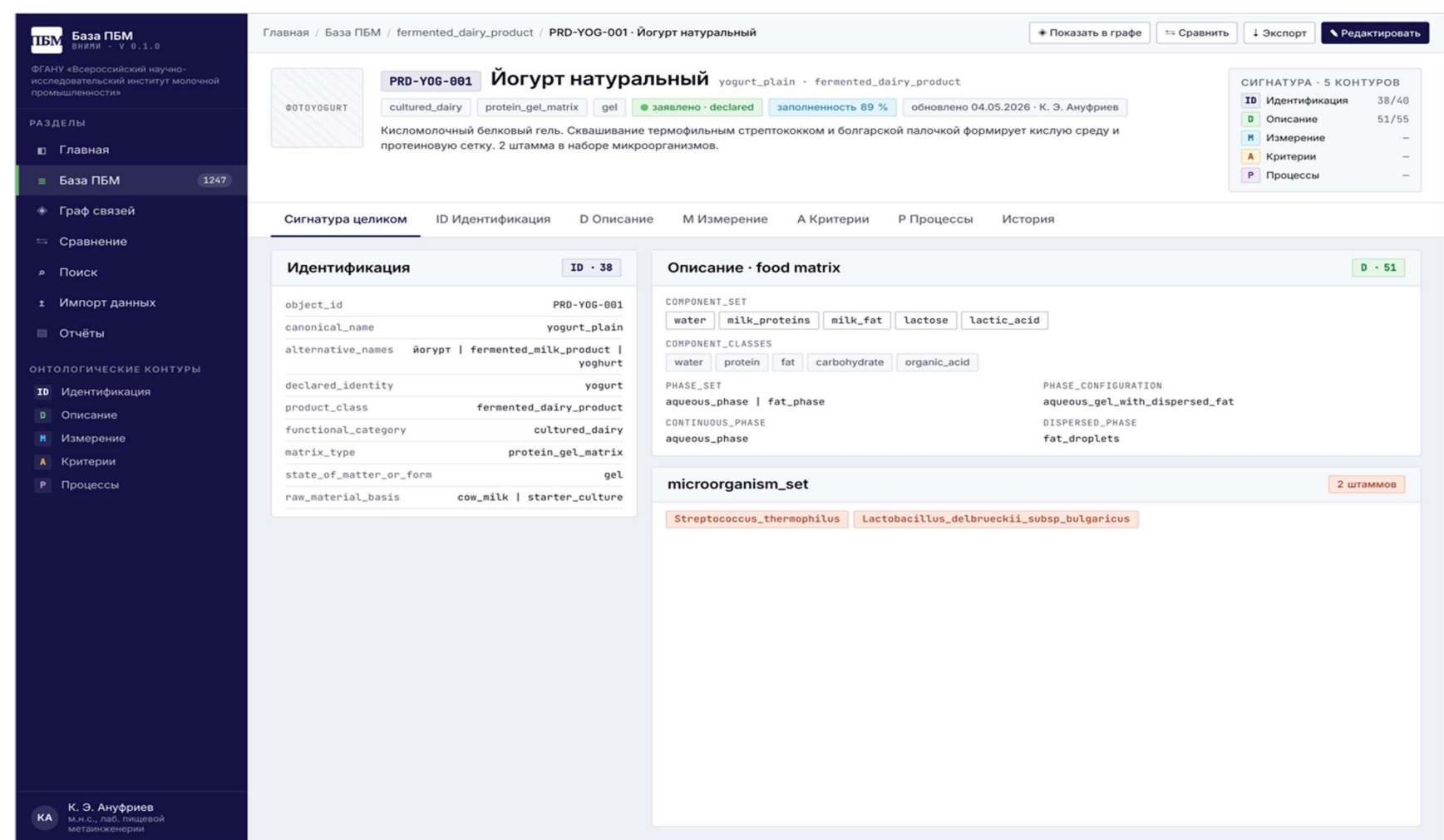


Рисунок 2. Карточка пищевого объекта PRD-YOG-001
Figure 2. Food object card PRD-YOG-001

Производственный слой цифровой реализации представлен графом (рисунок 3). Для кефира производственный граф связывает молоко, закваску кефирных грибков, молочную

кислоту, CO₂, этанол и сыворотку через отношения SUBSTRATE_FOR («служит субстратом для»), PRODUCES («приводит к образованию продукта»), HAS_COMPONENT («включает компонент») и GELATION («участвует в формировании гелевой структуры»).

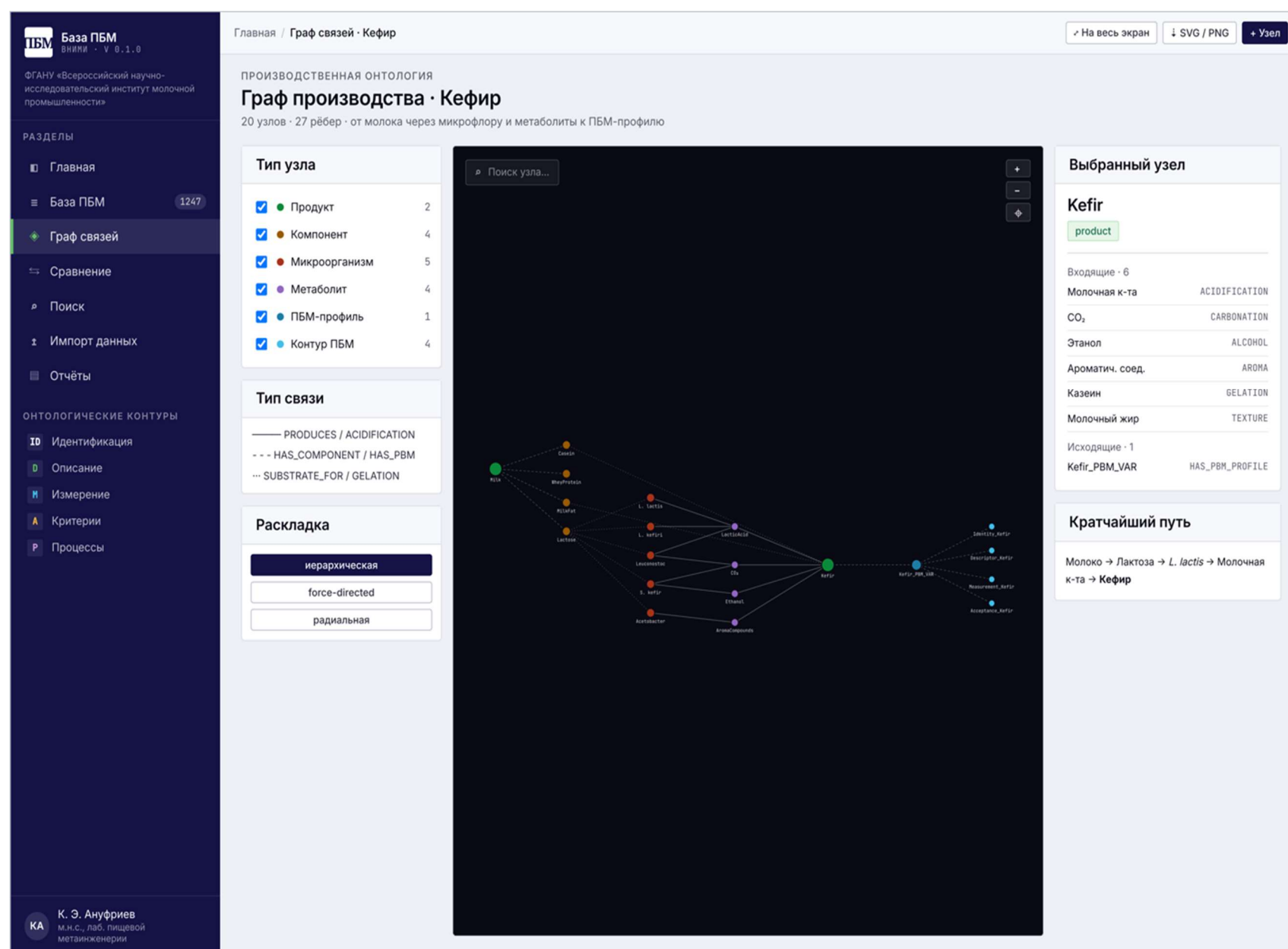


Рисунок 3. Граф производственных связей кефира

Figure 3. Production relationship graph of kefir

Такая модель показывает происхождение пищевого объекта и преобразование компонентов в ходе технологического процесса. Запрос «Cypher» восстанавливает кратчайший путь от сырья к профилю конечного пищевого объекта, переводя производственный процесс в вычисляемую структуру. Поэтому продукты с одинаковым составом могут иметь разные производственные графы и разные допустимые сценарии использования при совпадающих скалярных показателях.

Экран сравнения сопоставляет выбранные сигнатуры по заданным контурам и подсвечивает различия (рисунок 4). В паре «молоко – кефир» расхождение проявляется уже на уровне описания. У кефира фиксируются иной фазовый состав, газовая фаза и микробный консорциум. Измерительный контур подключается после структурного различения пищевого объекта. Расширенный поиск работает с логическими предикатами по атрибутам сигнатуры и группирует результаты по контурам. Поэтому компонент, матричная организация, метод измерения, критерий верификации или связь в производственном графе сохраняются как разные основания поиска. Такой режим используется для кластеризации продуктов и подготовки данных для аналитических моделей.

ПБМ База ПБМ
ВНИИ · V 0.1.0
ФГАНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности»

РАЗДЕЛЫ

- Главная
- База ПБМ 1247
- Граф связей
- Сравнение
- Поиск
- Импорт данных
- Отчёты

ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ КОНТУРЫ

- ID Идентификация
- D Описание
- M Измерение
- A Критерии
- P Процессы

КА К. Э. Ануфриев
м.н.с., лаб. пищевой
метаинженерии

Главная / Сравнение сигнатур

+ Добавить ПБМ

↓ CSV

↓ JSON

Только различия

АНАЛИТИКА

Сравнение ПБМ-сигнатур

4 объекта · 19 атрибутов из 5 контуров · подсветка различий

Контур: ID D M A P

Подсветка: совпадение во всех различия

СЛОЙ	АТТРИБУТ	МОЛОКО ПАСТЕРИЗОВАННОЕ PRD-MILK-001	КЕФИР PRD-KEFIR-001	ЙОГУРТ НАТУРАЛЬНЫЙ PRD-YOG-001	МАСЛО СЛИВОЧНОЕ НЕСОЛЁНОЕ PRD-BUTTER-001
ID	object_id	PRD-MILK-001	PRD-KEFIR-001	PRD-YOG-001	PRD-BUTTER-001
ID	canonical_name	milk_pasteurized	kefir_plain	yogurt_plain	butter_unsalted
ID	declared_identity	milk	kefir	yogurt	butter
ID	product_class	dairy_product	fermented_dairy_product	fermented_dairy_product	dairy_fat_product
ID	product_category	liquid_dairy	cultured_dairy_drink	cultured_dairy	milk_fat_product
ID	matrix_type	dairy_emulsion_matrix	fermented_dairy_matrix	protein_gel_matrix	fat_continuous_matrix
ID	physical_state	liquid	liquid semi_solid	gel	semi_solid
ID	raw_material_source	cow_milk	cow_milk kefir_grains	cow_milk starter_culture	cow_cream
D	component_set	water milk_proteins milk_fat lactose minerals	water milk_proteins milk_fat lactose lactic_acid + 4	water milk_proteins milk_fat lactose lactic_acid	milk_fat water milk_proteins milk_solids_non_fat minerals
D	component_classes	water protein fat carbohydrate mineral	water protein fat carbohydrate exopolysaccharide + 3	water protein fat carbohydrate organic_acid	fat water protein mineral milk_solids
D	phase_set	aqueous_phase fat_phase	aqueous_phase fat_phase gas_phase	aqueous_phase fat_phase	continuous_fat_phase dispersed_water_phase
D	phase_configuration	oil_in_water_emulsion	multiphase_fermented_liquid	aqueous_gel_with_dispersed_fat	water_in_oil_emulsion
D	continuous_phase	aqueous_phase	aqueous_phase	aqueous_phase	fat_phase
D	dispersed_phase	milk_fat_globules	milk_fat_globules gas_bubbles	fat_droplets	water_droplets
D	microorganism_set	native_microflora absent_as_declared_cultured	L_lactis_subsp_lactis L_lactis_subsp_cremoris Leuconostoc_mesenteroides_subsp_dextranum L_kefiranoferiens L_casei + 6	Streptococcus_thermophilus Lactobacillus_delbrueckii_subsp_bulgaricus	-

Рисунок 4. Экран сравнения сигнатур с подсветкой различий
Figure 4. Signature comparison screen with difference highlighting

Верификация в ПБМ строится как сопоставление ожидаемой и фактической сигнатур, что позволяет локализовать несоответствия. Верификационный сценарий продемонстрирован через сопоставление сигнатур сливочного масла «PRD-BUTTER-001» (несоленое, 82,5%) и «PRD-BUTTER-004» (соленое, 80%), где расхождения фиксируются на уровне описания (наличие NaCl) и верификации (water_activity, fat_content, salt_content). Если экземпляр заявлен как несоленое масло, а фактически содержит соль – расхождение в контуре идентичности. Отклонение жирнокислотного профиля при сохранении остальных атрибутов может указывать на сырьевое или рецептурное расхождение жировой фазы. Изменения при хранении целесообразнее оценивать через перекисное и кислотное число, а также показатели окислительной порчи. Различающиеся атрибуты двух сигнатур приведены в таблице 2.

Различение смежных продуктов в ПБМ выполняется через конфигурацию сигнатуры: граница появляется в том контуре, где впервые расходятся атрибуты. Для молочных продуктов это часто уровень описания: структура матрицы, газовая фаза, состав закваски, условия термической обработки белковой фазы. Кефир и йогурт могут быть близки по кислотности и массовой доле жира, однако сигнатура кефира фиксирует газовую фазу, этанол и полимикробный консорциум с участием дрожжей [20], йогурт задается белковой гелевой матрицей, термофильной закваской и отсутствием газообразования.

Показано, что применение ПБМ и цифровой сигнатуры в «База ПБМ» для рециклинга позволяет выбирать маршрут переработки с учетом матричной организации пищевого объекта, доступности компонентов и фактического состояния потока.

Таблица 2. Сравнение сигнатур PRD-BUTTER-001 и PRD-BUTTER-004 по различающимся атрибутам

Table 2. Comparison of PRD-BUTTER-001 and PRD-BUTTER-004 signatures by differing attributes

Атрибут <i>Attribute</i>	Уровень <i>Level</i>	PRD-BUTTER-001	PRD-BUTTER-004
canonical_name	Идентификация <i>Identification</i>	cow_butter_traditional_unsalted_82.5pct	cow_butter_traditional_salted_80pct
declared_identity	Идентификация <i>Identification</i>	cow_butter_traditional_unsalted_82.5pct	cow_butter_traditional_salted_80pct
component_set	Описание <i>Description</i>	milk_fat water milk_proteins milk_solids_non_fat minerals	+ sodium_chloride
water_activity	Верификация <i>Verification</i>	0.94–0.96	0.92–0.94
fat_content	Верификация <i>Verification</i>	82.5–84.0%	≥80.0%
salt_analysis	Измерение <i>Measurement</i>	не применимо <i>does not apply</i>	GOST_3627-81
salt_content	Верификация <i>Verification</i>	не применимо <i>does not apply</i>	≤1.5%
shelf_life	Верификация <i>Verification</i>	35 сут	pending

Сливки и сметана с массовой долей жира 20% имеют близкие скалярные характеристики, однако различаются по доступности жира, буферной емкости и микробиологическому состоянию, что приводит к различной технологической пригодности для последующей переработки. Для пищевого объекта «PRD-BUTTER-001» приоритетными становятся показатели перекисного и кислотного числа, тогда как для «PRD-KEFIR-001» – pH, содержание органических кислот и жизнеспособность микроорганизмов. В этом случае ПБМ функционирует как инструмент выбора маршрута переработки, включая кормовое использование, фракционирование и анаэробное сбраживание.

Для аддитивного производства, например «PRD-3DPRINT-CUBE-BUTTER-001», сигнатура формируется до получения физического объекта. Она фиксирует составную матрицу (оболочку, наполнитель, геометрию полости, толщину стенок, порядок нанесения слоев). Атрибут производственного слоя «fabrication_instruction» связывает G-код, траекторию движения печатающей головки, стратегию заполнения, переключение картриджей и проверку неизменности файла. Эмерджентность свойств (не сводимых к отдельным компонентам) отражает применение системной инженерии.

Заключение. Настоящая работа показывает, что система описания на основе пищевых биоинформатических матриц может быть переведена из концептуальной рамки в прикладной формат. В цифровой среде «База ПБМ» сигнатура выступает рабочим цифровым объектом, который сопоставляется с другими сигнатурами, используется в поиске по атрибутам и связывается с производственным графом. ПБМ хранит пищевой объект как систему с идентичностью, матричной структурой, измеряемыми свойствами, критериями соответствия и производственной историей.

Сигнатуры молочных пищевых объектов были протестированы в трех практических сценариях. Верификация позволила определять несоответствия между ожидаемым и факти-

ческим состоянием по уровню представления. Рециклинг связал показатели пищевого объекта с матричной организацией и допустимым маршрутом переработки. Для аддитивного производства апробировано формирование сигнатуры ПБМ продукта до получения пищевого объекта через атрибут «fabrication_instruction».

Благодарность: Публикация подготовлена в рамках государственного задания FNSS-2025-0006.

Acknowledgement: The publication was prepared as part of the state assignment FNSS-2025-0006.

Список источников

1. Галстян А.Г. Индустрия X.0 // Пищевая метайнженерия. 2023. Т. 1. № 2. С. 7-10. <https://doi.org/10.37442/fme.2023.2.33>.
2. Oganesyants L.A., Khurshudyan S.A., Galstyan A.G., Semipyatny V.K., et al. Base matrices – Invariant digital identifiers of food products // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2018. Vol. 6(432). P. 6-15. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.30>.
3. Пряничникова Н.С., Хуршудян С.А. Матрица маркеров, границы качества и срок годности молочных продуктов // Пищевая промышленность. 2023. Т. 2. С. 49-51. <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.2.2.011>.
4. Hassoun A., Garcia-Garcia G., Trollman H., et al. Birth of Dairy 4.0: Opportunities and Challenges in Adoption of Fourth Industrial Revolution Technologies in the Production of Milk and Its Derivatives // Current Research in Food Science. 2023. Т. 7. Article number: 100535. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100535>.
5. Gehlot A., Malik P.K., Singh R., Akram S.V., Alsuwian T. Dairy 4.0: Intelligent Communication Ecosystem for the Cattle Animal Welfare with Blockchain and IoT Enabled Technologies // Applied Sciences. 2022. Vol. 12. No. 14. Article number: 7316. <https://doi.org/10.3390/app12147316>.
6. Eastham J.L., Leman A.R. Precision Fermentation for Food Proteins: Ingredient Innovations, Bioprocess Considerations, and Outlook // Current Opinion in Food Science. 2024. Vol. 58. Article number: 101194. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101194>.
7. Zhu W., Iskandar M.M., Baeghbali V., Kubow S. Three-Dimensional Printing of Foods: A Critical Review of the Present State in Healthcare Applications, and Potential Risks and Benefits // Foods. 2023. Vol. 12. No. 17. Article number: 3287. <https://doi.org/10.3390/foods12173287>.
8. Семипятный В.К., Климова Д.В., Хуршудян С.А., Рыскин Д.С., Косарева А.В. Пищевые биоинформационные матрицы – базовые элементы в технологической сингулярности // Пищевая промышленность. 2025. № 12. С. 58-62. <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.12.12.010>.
9. Dooley D.M., Griffiths E.J., Gosal G.S., et al. FoodOn: A Harmonized Food Ontology to Increase Global Food Traceability, Quality Control and Data Integration // npj Science of Food. 2018. Vol. 2. P. 23. <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0032-6>.
10. Fukagawa N.K., McKillop K., Pehrsson P.R., et al. USDA's FoodData Central: What Is It and Why Is It Needed Today? // American Journal of Clinical Nutrition. 2022. Vol. 115. No. 3. P. 619-624. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab397>.

11. GS1. EPCIS and Core Business Vocabulary Standard. Release 2.0. Brussels: GS1, 2022.
12. ISO 22005:2007. Traceability in the Feed and Food Chain. General Principles and Basic Requirements for System Design and Implementation. Geneva: ISO, 2007.
13. Serazetdinova L., Garratt J., Baylis A., et al. How Should We Turn Data into Decisions in AgriFood? // Journal of the Science of Food and Agriculture. 2019. Vol. 99. No. 7. P. 3213-3219. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9545>.
14. Shahidi F., Pan Y. Influence of Food Matrix and Food Processing on the Chemical Interaction and Bioaccessibility of Dietary Phytochemicals: A Review // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2022. Vol. 62. No. 23. P. 6421-6445. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901650>.
15. ISO/IEC/IEEE 42010:2022. Software, Systems and Enterprise. Architecture Description. Geneva: ISO, 2022.
16. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. Systems and Software Engineering. System Life Cycle Processes. Geneva: ISO, 2023.
17. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva: ISO, 2017.
18. ISO 5725-1:2023. Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 1: General Principles and Definitions. Geneva: ISO, 2023.
19. Neo4j. Introduction – Cypher Manual. Neo4j Documentation. URL: <https://neo4j.com/docs/cypher-manual> (дата обращения: 10.05.2026).
20. Blasche S., Kim Y., Mars R.A.T., et al. Metabolic Cooperation and Spatiotemporal Niche Partitioning in a Kefir Microbial Community // Nature Microbiology. 2021. Vol. 6. No. 2. P. 196-208. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-00816-5>.

References

1. Galstyan AG. Industry x.0: the food industry. *Pishchevaya metainzheneriya = Food Metaengineering*. 2023;2(1):7-10. (In Russ.). <https://doi.org/10.37442/fme.2023.2.33>.
2. Oganesyants LA, Khurshudyan SA, Galstyan AG, Semipyatny VK, et al. Base matrices – invariant digital identifiers of food products. *NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*. 2018;432(6):6-15. <https://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.30>.
3. Pryanishnikova NS, Khurshudyan SA. Matrix of markers, quality limits and shelf life of dairy products. *Pishchevaya promyshlennost = Food Industry*. 2023;(2):49-51. (In Russ.). <https://doi.org/10.52653/PPI.2023.2.2.011>.
4. Hassoun A, Garcia-Garcia G, Trollman H, et al. Birth of Dairy 4.0: Opportunities and Challenges in Adoption of Fourth Industrial Revolution Technologies in the Production of Milk and Its Derivatives. *Current Research in Food Science*. 2023;(7):100535. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100535>.
5. Gehlot A, Malik PK, Singh R, Akram SV, Alsuwian T. Dairy 4.0: Intelligent Communication Ecosystem for the Cattle Animal Welfare with Blockchain and IoT Enabled Technologies. *Applied Sciences*. 2022;14(12):7316. <https://doi.org/10.3390/app12147316>.
6. Eastham JL, Leman AR. Precision Fermentation for Food Proteins: Ingredient Innovations, Bioprocess Considerations, and Outlook. *Current Opinion in Food Science*. 2024;(58):101194. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101194>.
7. Zhu W, Iskandar MM, Baeghbali V, Kubow S. Three-Dimensional Printing of Foods: A Critical Review of the Present State in Healthcare Applications, and Potential Risks and Benefits. *Foods*. 2023;17(12):3287. <https://doi.org/10.3390/foods12173287>.

8. Semipyatnyy VK, Klimova DV, Khurshudyan SA, Ryskin DS, Kosareva AV. Food bioinformational matrices – foundational elements in the technological singularity. *Pishchevaya promyshlennost = Food Industry*. 2025;(12):58-62. (In Russ.) <https://doi.org/10.52653/PPI.2025.12.12.010>.
9. Dooley DM, Griffiths EJ, Gosal GS, et al. FoodOn: A Harmonized Food Ontology to Increase Global Food Traceability, Quality Control and Data Integration. *npj Science of Food*. 2018;(2):23. <https://doi.org/10.1038/s41538-018-0032-6>.
10. Fukagawa NK, McKillop K, Pehrsson PR, et al. USDA's FoodData Central: What Is It and Why Is It Needed Today? *American Journal of Clinical Nutrition*. 2022;115(3):619-624. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab397>.
11. GS1. EPCIS and Core Business Vocabulary Standard. Release 2.0. Brussels: GS1 Publ.; 2022.
12. ISO 22005:2007. Traceability in the Feed and Food Chain. General Principles and Basic Requirements for System Design and Implementation. Geneva: ISO Publ.; 2007.
13. Serazetdinova L, Garratt J, Baylis A, et al. How Should We Turn Data into Decisions in AgriFood? *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2019;99(7):3213-3219. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9545>.
14. Shahidi F, Pan Y. Influence of Food Matrix and Food Processing on the Chemical Interaction and Bioaccessibility of Dietary Phytochemicals: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;62(23):6421-6445. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1901650>.
15. ISO/IEC/IEEE 42010:2022. Software, Systems and Enterprise. Architecture Description. Geneva: ISO Publ.; 2022.
16. ISO/IEC/IEEE 15288:2023. Systems and Software Engineering. System Life Cycle Processes. Geneva: ISO Publ.; 2023.
17. ISO/IEC 17025:2017. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories. Geneva: ISO Publ.; 2017.
18. ISO 5725-1:2023. Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results. Part 1: General Principles and Definitions. Geneva: ISO Publ.; 2023.
19. Neo4j. Introduction – Cypher Manual. Neo4j Documentation. Available from: <https://neo4j.com/docs/cypher-manual> [Accessed 10 May 2026].
20. Blasche S, Kim Y, Mars RAT, et al. Metabolic Cooperation and Spatiotemporal Niche Partitioning in a Kefir Microbial Community. *Nature Microbiology*. 2021;6(2):196-208. <https://doi.org/10.1038/s41564-020-00816-5>.

Вклад авторов: Константин Э. Ануфриев – разработка архитектуры системы описания на основе ПБМ, реализация цифрового прототипа «База ПБМ», написание запросов Cypher для графовой модели; Владислав К. Семипятный – концептуальное руководство, методологическая рамка, применение стандартов ISO/IEC/IEEE 42010 и 15288; Дарья В. Климова – формирование сигнатур пищевых объектов, разработка каталога и экранов сравнения, визуализация данных; Анастасия В. Косарева – анализ производственных связей, разработка сценариев рециклинга и аддитивного производства, описание fabrication_instruction. Все авторы несут ответственность за представленный в статье материал, за плагиат и самоплагиат.

Contribution of the authors: Konstantin E. Anufriev – development of the FBM-based description system architecture, implementation of the “FBM Database” digital prototype, writing Cypher queries for the graph model; Vladislav K. Semipyatny – conceptual guidance, methodological framework, application of ISO/IEC/IEEE 42010 and 15288 standards; Daria V. Klimova – gen-

eration of food object signatures, development of the catalog and comparison screens, data visualization; Anastasia V. Kosareva – analysis of production relationships, development of recycling and additive manufacturing scenarios, description of fabrication instruction. All authors are responsible for the material presented in the article, for plagiarism and self-plagiarism.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что никакого конфликта интересов в связи с публикацией данной статьи не существует.

Conflict of interest. Authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Информация об авторах (за исключением контактного лица):

Семипятный Владислав Константинович – заведующий лабораторией, лаборатория пищевой метаинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности; 115093, Россия, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35/7; e-mail: v_semipyatniy@vnimi.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-0026>;

Климова Дарья Владимировна – инженер-исследователь, лаборатория пищевой метаинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности; 115093, Россия, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35/7; e-mail: d_klimova@vnimi.org; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1628-7681>;

Косарева Анастасия Валерьевна – инженер-исследователь, лаборатория пищевой метаинженерии, Всероссийский научно-исследовательский институт молочной промышленности; 115093, Россия, г. Москва, ул. Люсиновская, д. 35/7; e-mail: a_kosareva@vnimi.org; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0551-8058>.

Information about the authors (excluding the contact person):

Vladislav K. Semipyatny – Head of the Laboratory, Laboratory of Food Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute; 35/7, Lyusinovskaya St., Moscow, 115093, Russian Federation; e-mail: v_semipyatniy@vnimi.org; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1241-0026>;

Daria V. Klimova – Research Engineer, Laboratory of Food Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute; 35/7, Lyusinovskaya St., Moscow, 115093, Russian Federation; e-mail: d_klimova@vnimi.org; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1628-7681>;

Anastasia V. Kosareva – Research Engineer, Laboratory of Food Meta-Engineering, All-Russian Dairy Research Institute; 35/7, Lyusinovskaya St., Moscow, 115093, Russian Federation; e-mail: a_kosareva@vnimi.org; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0551-8058>.

Статья поступила в редакцию / The article was submitted: 25.05.2026;
одобрена после рецензирования / approved after reviewing: 10.07.2026;
принята к публикации / accepted for publication: 13.07.2026