На правах рукописи

Семипятный Владислав Константинович

Принципы мета–аналитической декомпозиции при формировании цифровых идентификационных профилей пищевых систем

05.18.04 – технология мясных, молочных и рыбных продуктов и холодильных производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном научном учреждении «Всероссийский научно–исследовательский институт молочной промышленности» (ФГАНУ «ВНИМИ»).

Научный консультант:	доктор технических наук, академик РАН **Галстян Арам Генрихович**
Официальные оппоненты:	**Красуля Ольга Николаевна** доктор технических наук, профессор кафедры «Технология хранения и переработки продуктов животноводства» ФГБОУ ВО «РГАУ–МСХА им. К. А. Тимирязева»
	Серба Елена Михайловна доктор биологических наук, член–корреспондент РАН, заместитель директора по научной работе ВНИИПБТ — филиала ФГБУН «ФИЦ питания и биотехнологии»
	Бабич Ольга Олеговна доктор технических наук, директор Института живых систем ФГАОУ ВО «БФУ им. И. Канта»
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет»

Защита состоится «18» января 2022 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 006.021.02 при ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН, расположенном по адресу: 109316, Москва, ул. Талалихина, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБНУ «Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН: vniimp.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник А. Н. Захаров

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В соответствии с Доктриной продовольственной безопасности Российской Федерации[1] обеспечение населения высококачественной, безопасной и в то же время доступной пищевой продукцией является одним из социально–экономических приоритетов России. Большим вызовом для науки и государства в соответствии со Стратегией научно–технического развития Российской Федерации является потребность в обеспечении конкурентоспособности отечественной пищевой продукции, решение которого не представляется возможным без налаженной на государственном уровне системы контроля качества.

Прогнозируемый рост потребления продуктов питания и связанный с ним рост объемов производства оказывают непосредственное влияние на трансформацию традиционных принципов переработки сельскохозяйственного сырья и методы управления пост–технологическими характеристиками пищевых продуктов. Меняется культура и парадигма потребления, а также структура питания во взаимосвязи с трендами глобализации. Одним из основных направлений государственной политики является совершенствование организации контроля качества и безопасности пищевой продукции посредством создания современной технической и методической базы, которое ставит своими приоритетными задачами групповую и индивидуальную аутентификацию продукции, обеспечивая таким образом предпосылки к созданию методологических основ цифровой идентификации, унифицирующей оценочные критерии для расширяющегося ассортимента пищевых продуктов.

По данным разных источников, объем фальсификации в России, например, в молочной отрасли составляет 30 % — 50 % всей выпускаемой продукции. Разнообразие пищевого ассортимента и, в большей степени, недобросовестность части производителей не позволяют построить робастные оценочные качественные критерии, основанные на одной или узкой группе специализированных методик. Добросовестные производители страдают из–за размытости информационного поля, а для потребителя требуется наличие инструментов прослеживаемости качества и безопасности для совершения осознанного информированного выбора в пользу того или иного продукта. В связи с этим, для эффективного использования пищевых ресурсов, моделирования и производства качественных пищевых продуктов встает задача разработки методологии идентификации пищевой продукции с использованием полного спектра имеющейся на сегодняшний день аналитической базы, которую возможно объединить, задействуя мета–аналитическую методологию, с последующим построением цифрового профиля пищевого продукта с использованием современного математического аппарата базовых матриц и кластерного анализа.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад

[1] утверждена Указом Президента РФ №20 от 21.01.2020 г.

в развитие фундаментальных основ теорий проектирования и идентификации поликомпонентных пищевых продуктов с позиции совершенствования методологической базы и исследования практических аспектов внесли ряд отечественных и зарубежных ученых: Галстян А. Г., Краснов А. Е., Красуля О. Н., Липатов Н. Н., Липатов Н. Н. (мл.), Лисицын А. Б., Остроумов Л. А., Петров А. Н., Радаева И. А., Рогов И. А., Титов Е. И., Храмцов А. Г., Чернуха И. М., Хуршудян С. А., Byrne C. E., Gremaud G., Ray C. R., Santos J. S., Zhang X. и другие. Объединение полученных ими фундаментальных результатов с актуальными цифровыми методологиями аутентификации и прослеживания позволит выйти на новый качественный уровень идентификации и противодействия фальсифицированной продукции в пищевой промышленности.

Цель диссертационной работы. Целью настоящей работы являлось создание методологии мета–информационной идентификации и цифровизации технологического профиля пищевых систем на основе алгоритма декомпозиции базовых матриц с использованием элементов прослеживаемости, механизмов нечеткой логики и машинного обучения.

Задачи диссертационной работы. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Осуществить анализ мировых тенденций, определить базовые принципы интеграции цифровых технологий и динамических электронных баз данных в область оценки качества и безопасности пищевых продуктов и проанализировать рациональность существующих производственных решений
2. Адаптировать Agile–принципы построения технологических решений и методологические основы интеграции элементов теории нечеткой логики и машинного обучения в систему идентификации пищевой продукции
3. Применительно к пищевым системам развить теорию базовых матриц и разработать требования и алгоритм построения цифровых профилей пищевых продуктов
4. Разработать динамическую систему кластеризационной идентификации поликомпонентных продуктов, основанную на принципах устойчивости и самообучения
5. Создать новый подход к проектированию пищевых продуктов на основе аппарата базовых матриц и принципов генетического программирования
6. Сформировать систему цифрового мониторинга качества пищевых продуктов в динамике хранения с использованием элементов прослеживаемости и теории нечеткой логики
7. Разработать программный комплекс для оптимизации работ по разработке и идентификации пищевых продуктов по системе открытого доступа
8. Для обеспечения качества и безопасности молочной продукции разработать прикладные идентификационные алгоритмы и обновляемую базу данных, формирующие гибкую аналитическую систему оценки в условиях прослеживаемости

9. Обосновать необходимость создания интерактивных цифровых паспортов пищевых продуктов и установить базовые принципы интеграции машинных технологий в область мониторинга качества
10. Осуществить техническое оформление, апробировать цифровые паспорта и методологию идентификации в рамках актуальных вызовов молочной промышленности.

Научная новизна. Для перевода традиционных технологических схем и систем контроля качества пищевых систем в цифровое пространство обоснована концепция мета–аналитической декомпозиции.

В результате иерархического статистического анализа научной информации реферативных баз данных сформулирован принцип мета–аналитической декомпозиции применительно к технологиям пищевых продуктов с интегрированной системой идентификации, инвариантной относительно групп однородной продукции.

Для классификации пищевой продукции, мониторинга качества, в том числе хранимоустойчивости, и определения критериев дифференциации продукта по мета–характеристикам предложен алгоритм интеграции нечетких характеристических функций

Разработан принцип локализации координат частного продукта в пространственном распределении смежных пищевых продуктов, связанных однородной технологической цепочкой, на основе аппарата базовых матриц.

Для групп поликомпонентных однородных пищевых продуктов предложена методология дифференциации и алгоритм оценки значимости идентификационных монокритериев. На основе мета–аналитических принципов получены критерии оптимизации сбора аналитического материала для обеспечения робастной аутентификации продукции.

Формализован математический аппарат моделирования состава пищевого продукта на основе базовых матриц и в соответствии с ним модифицирован метод генетического программирования для оптимизации процессов расчета сбалансированных поликомпонентных систем с произвольными ограничениями на состав и целевую функцию.

Предложен принцип инкорпорирования аппарата нечеткой логики в систему цифрового мониторинга качественных характеристик пищевых продуктов, учитывающий временной фактор хранения.

Предложена иерархическая система кластеризации групп пищевых продуктов во взаимосвязи с доминирующими идентификационными признаками для ранжирования сходства по количеству дифференцирующих критериев.

Теоретическая и практическая значимость.

Осуществлено комплексное развитие системы знаний и методологических подходов в области идентификации пищевых систем.

На базе анализа мировых тенденций в области цифровизации и идентификации определены ключевые векторы наукоемких решений в пищевой промыш-

ленности, объединенные в аналитическом материале «Идентификация пищевых продуктов. Цифровые мета–информационные решения» (монография).

Разработана робастная система мониторинга качества и безопасности пищевых продуктов полного цикла, основанная на адаптации традиционных идентификационных схем в цифровое пространство. Система реализована в виде открытого динамического программного комплекса, в основу которого заложено понятие базового пищевого полуфабриката, универсального в рамках пищевой промышленности.

Программный комплекс включает в себя систему расчета рецептур, реализованную на основе генетического программирования; модули анализа физико–химических, микробиологических, органолептических, генетических, функционально–технологических, мета–аналитических характеристик продукта; модули для многокритериальной дифференциации, идентификации и аутентификации поликомпонентных пищевых продуктов на основе аппарата базовых матриц с применением методов нечеткой логики и элементов машинного обучения.

Программный комплекс размещен в открытом доступе на платформе Wolfram Cloud. Новизна и практическая значимость информационных решений подтверждена 13 свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ.

Создан в формате цифрового профиля комплект стандартов организации: №00419785–054–2021 D «Цифровой паспорт молока питьевого ультрапастеризованного», №00419785–055–2021 D «Цифровой паспорт масла сладкосливочного несоленого», №00419785–056–2021 D «Цифровой паспорт молока сухого цельного»; и реализован на производственных предприятиях молочной промышленности в виде подписки на интерактивное ПО по схеме SaaS (Software as a Service). Цифровые СТО в формате программных решений позволяют в режиме реального времени актуализировать требования по качеству и безопасности с обновляющейся законодательной и нормативной базами и идентифицировать продукцию по ряду признаков: географических, сырьевых, экономических и др.

Динамическая база данных качественных характеристик пищевых продуктов и программный идентификационных комплекс включены в работу испытательной лаборатории «МОЛОКО» и используются при осуществлении исследований в рамках государственного задания ВНИМИ с 2019 г.

Полученные решения по идентификации и мониторингу качества пищевых продуктов, а также цифровые СТО, внедрены на производствах, что подтверждается 12 актами о внедрении.

Методология и методы исследования. В основу исследования положен феноменологический и мета–аналитический подходы к получению алгоритмов идентификации и аутентификации пищевого продукта.

Для получения качественных характеристик исследуемого сырья и конечной продукции использовались общепринятые методы исследования физико–химических, органолептических и функционально–технических свойств.

Положения, выносимые на защиту:

- Теоретические принципы и практические подходы интеграции аппарата базовых матриц в систему идентификации и мониторинга качества пищевых продуктов, реализованные в виде универсального алгоритма дифференциации с эталоном и программного обеспечения;
- Совокупность результатов *in silico* анализа с расширенной областью критериев и аналитических баз данных для оптимизации процесса аутентификации поликомпонентных молочных продуктов с потенциалом адаптации полученной методологии в рамках различных отраслей пищевой промышленности;
- Принципы цифровизации традиционных технологических решений, в том числе для национальных молочных продуктов, в формате обновляемых динамических комплексов, актуализируемых с законодательными, нормативными и техническими требованиями;
- Методология идентификация молочной продукции на наличие признаков фальсификации с использованием алгоритма определения потенциальных векторов нарушений;

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность полученных результатов подтверждается: проведением исследований, основанных на общепризнанных подходах и подкрепленных современными достижениями фундаментальных и прикладных наук; составлением планов, контролем и метрологическим обеспечением экспериментов; публикацией работ в рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования.

Основные результаты диссертации докладывались и получили одобрение на семинарах, симпозиумах и конференциях всероссийского и международного уровней: международный форум «Антиконтрафакт» (2018 г., 2019 г.); международная научно–практическая конференция «Инновационно–техническое развитие пищевой промышленности — тенденции, стратегии, вызовы» (2018 г.); международная научно–практическая конференция «Инновационные процессы в пищевых технологиях: наука и практика» (2019 г.); международная научно–практическая конференция «Перспективные исследования и новые подходы к производству и переработке сельскохозяйственного сырья и продуктов питания» (2019 г.); агропромышленная выставка «Золотая осень» (2019 г.); форум «Открытые инновации» Сколково (2020 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 69 печатных работ, из них 3 монографии; 13 статей в журналах, индексируемых в международных базах Web of Science и Scopus; 10 статей в журналах, рецензируемых ВАК; 30 публикаций в материалах конференций и журналах, индексируемых в РИНЦ; получено 13 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ (см. список трудов).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и библиографии. Основное содержание изложено на 259 страницах и включает в себя 16 таблиц и 84 рисунка. Библиография включает 323 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов в пищевой промышленности и представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе представлен аналитический обзор литературных источников, на основе которых сформулированы актуальные проблемы пищевой промышленности в области идентификации продукции, в частности, разобщенность экспериментов и сужение объекта исследования до отдельных видов продуктов. Проанализированы логико–понятийные системы идентификации и аутентификации с точки зрения различных контрагентов пищевой промышленности.

Дано обоснование применения мета–аналитического подхода в идентификационных приложениях, представлен алгоритм и основной математический аппарат мета–аналитических исследований. Показано, что использование мета–анализа обеспечивает статистически устойчивый и экономически целесообразный результат при построении цифровых профилей пищевых продуктов.

Даны описания существующих моделей продуктов с применением различных подходов: объектно–ориентированного, структурного, функционально–технологического и нечеткого. Рассмотрены технологические схемы производства пищевых продуктов, смоделированные с помощью Байесовского подхода и фильтра Калмана.

Проанализированы, структурированы и снабжены прикладными примерами из пищевой промышленности большинство современных идентификационных методик, в том числе методики сокращения размерности и иерархической кластеризации, использующихся в пищевой промышленности. При этом, показан несистемный характер и разрозненность применения математических методов к отдельным видам продукции.

Сформулированы основные точки интеграции цифровых идентификационных профилей в физико–химическую и технологическую составляющие пищевого продукта. На примерах хранимоустойчивости и определения производственных энергопотерь представлены математические идентификационные модели, оценивающие различные характеристики продукции.

Во второй главе представлено методологическое сопровождение, приведена схема организации поисковой, теоретической, экспериментальной и практической частей работы (см. рис. 1).

Объектами исследований на различных этапах работы являлись: молоко питьевое пастеризованное и ультрапастеризованное массовой долей жира 2,5 %, 3,2 %, 3,4–6,0 % (ГОСТ 31450–2013); молоко сухое цельное (ГОСТ 33629–2015); продукты молокосодержащие с заменителем молочного жира пастеризованные и ультрапастеризованные, выработанные по технологии молока питьевого, массовой долей жира 3,2 %, 6,0 %; молочный жир и заменители молочного жира; масло сливочное массовой долей жира 72,5 %, 82,5 % (ГОСТ 32261–2013); масло

Рис. 1. Общая схема исследований

топленое массовой долей жира 99 % (ГОСТ 32262–2013); кисломолочные продукты: ацидофилин (ГОСТ 32926–2014), варенец (ГОСТ 31667–2012), ряженка (ГОСТ 31455–2012), простокваша (ГОСТ 31456–2013).

При выполнении работы применялись стандартизованные методы, используемые при контроле физико–химических, микробиологических и органолептических характеристик молока и молочной продукции. Определение массовой доли жира проводили по ГОСТ 5867–90, массовой доли белка — по Кьельдалю (ГОСТ 23327–98), кислотности — методом титрования по ГОСТ 3624–92, определение лактозы — по ГОСТ Р 54667–2011, активной кислотности — потенциометрическим методом по ГОСТ 32892–2014, содержания фосфора — спектрометрически по ГОСТ 31980–2012, определение жирнокислотного состава жировой фазы молока — методом газовой хроматографии по ГОСТ 32915–2014, масла – по ГОСТ 31663–2012, ГОСТ 31665–2012, обнаружение растительных жиров — газожидкостной хроматографией стеринов по ГОСТ 31979–2012.

Для решения задач кластеризации было обосновано применения метода смешанных Гауссовских распределений, метод применен как в случае наличия эталонных образцов, так и для слепой безэталонной классификации. Для минимизации необходимого числа лабораторных исследований для аутентификации цифрового профиля продукта использовался древовидный наивный байесовский классификатор, который позволил не только ранжировать методики определения физико–химических характеристик продукта, но и использовать дополнительную мета–информацию в идентификационных задачах, например, информацию об источнике продукта и историю предыдущих исследований данного контрагента. Использованы нечеткие модели при анализе поведения продукта на пост–производственном этапе.

Для идентификационных задач и поддержания полного лабораторного цикла исследований были адаптированы принципы гибкой методологии разработки Agile для наукоемких процессов пищевой промышленности. Основой принципов был установлен устойчивый, развивающийся процесс аутентификации и информирования, в который вовлечены как производители и испытательные лаборатории, так и контролирующие органы. Адаптированы принципы самоорганизации исследовательских межотраслевых научно–технических центров, позволяющие контролировать соблюдение условий цифрового профиля производителями с помощью преодоления неопределенностей и устранения фактора вариабельности поликомпонентных пищевых продуктов.

Компьютерное моделирование производилось на языке программирования Wolfram Language с использованием распределенной системы хранения вычислимых данных Wolfram Data Repository. Открытый доступ к облачным версиям программ обеспечивается облачной средой Wolfram Cloud.

В третьей главе представлены теоретические аспекты построения цифровых идентификационных профилей пищевых систем.

Была создана единая форма цифрового профиля пищевого продукта, к которой могли бы обращаться эксперты пищевой промышленности. При этом

цифровая модель продукта описывается композицией D_P:

$$D_P(A, Q, O) \tag{1}$$

где A — базовая матрица пищевого продукта, Q — матрица физико–химических параметров, O — матрица органолептических показателей.

Модель была модифицирована, чтобы выделить идентификационные данные о продукте:

$$D_P(A, Q, O) \to D_P^*(A, Q, O, I), \tag{2}$$

где I — кортеж метаданных, характеризующих данный продукт. Он содержит в себе информацию о цифровом профиле относительно других групп продуктов, базу данных идентификационных методик и аналитические данные.

Сформулированы требования, которым должен соответствовать корректно спроектированный цифровой идентификационный профиль пищевого продукта:

- структура должна быть математически сравнима с однородными по происхождению продуктами, при этом уровень сравнимости должен совпадать с иерархией компонентного состава продукта;
- в цифровой профиль должна быть заложена возможность управления качественными характеристиками продукта, следовательно, должны иметь место вероятностные модели ингредиентов, позволяющие делать выводы о статистической погрешности результирующего состава;
- в цифровом профиле должны находить отражение все мета–аналитические идентификационные методики, позволяющие в динамике анализировать эволюцию пищевого продукта, так и смежных с ним по группе однородной продукции;
- все показатели профиля должны быть представлены в виде функций или дискретизированы, в случае наличия экспертных оценок;
- в цифровом профиле должна быть прописана и реализована возможность последовательного обновления всех данных о пищевом продукте. Лабораторная аналитика пищевого продукта является частью его цифрового профиля.

С помощью цифрового профиля D_P^* возможно осуществлять управление качеством пищевой продукции, для чего выделяются маркеры и оценочные критерии повышенной точности. Так как органолептические, а также многие биохимические показатели пищевой продукции не являются линейными, более того, они являются математически неустойчивыми характеристиками, чувствительными к минимальным рецептурным изменениям, наиболее распространенный линейный регрессионный метод идентификации дает приемлемые результаты только в ограниченной области факторного пространства.

В связи с вышесказанным, а также для объединения всех возможных составных вариаций и проведения сравнительного анализа рецептур, вводится понятие векторного пространства пищевых продуктов $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$ над множеством базовых компонентов $\mathcal{L}^k = \{i_1, i_2, \ldots, i_k\}$, которое в дальнейшем будет называться базисом. Фактически, $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$ — это всевозможные комбинации рецептур, составленные из заранее заданных веществ.

Формально, векторное пространство пищевых продуктов $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$ не является линейным пространством в строгом смысле, а только конической оболочкой базовых компонентов:

$$\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k} = \left\{ \sum_{l=1}^{k} \alpha_l i_l \mid \alpha_l \in \mathbb{R}, \alpha_l \geqslant 0, i_l \in \mathcal{L}^k \right\} \tag{3}$$

Для любого пищевого продукта P существует представление его состава $x_P \in \mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$ в базисе $\mathcal{L}^k$.

Базис для продукта может быть как полным, когда сумма массовых долей его компонентов в этом базисе составляет единицу, так и неполным. Переход в неполные базисы может осуществляться, когда не имеется достаточной информации о составе продукта, или некоторые его компоненты не представляют ключевого интереса для конкретной задачи.

В общем случае, базовые компоненты i_l могут быть линейно зависимыми, особенно для более поздних стадий производственного процесса. В рамках цифрового профиля D_p пищевого продукта требуется определение составных частей его рецептуры на каждом производственном участке, и так как сырье для продукта проходит многостадийную обработку, нецелесообразно фиксировать базис пищевого продукта в терминах базовых компонентов — он должен меняться соответственно прохождению сырья по технологической цепочке.

Таким образом, дополнительно к компонентам введено понятие ингредиента — непосредственной единицы рецептуры, из которой составляется продукт. Ингредиенты каскадным образом состоят из других ингредиентов и базовых компонентов.

Пусть $x = (x_1, x_2, \ldots, x_m)^\top$ — вектор–столбец компонентов размерности $m \times 1$ из пространства $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^m}$, а $y = (y_1, y_2, \ldots, y_n)^\top$ — вектор–столбец используемых в рецептуре продукта ингредиентов размерности $n \times 1$, тогда неотрицательная матрица $A = \{a_{ij}\}_{i=1,j=1}^{n,m}$ размерности $n \times m$, связанная уравнением:

$$Ax = y \tag{4}$$

называется характеристической матрицей рецептуры продукта (для базового пищевого полуфабриката — **базовой матрицей**), а соотношение 4 называется матричным представлением рецептуры. Матрица A при этом представляет переход от компонентов к ингредиентам рецептуры.

Так как вектор x рассматривается как перечисление компонентов из $\mathcal{L}^m$, а y как вектор массовых коэффициентов при ингредиентах рецептуры, то это

представление позволяет варьировать входящие компоненты в процентном соотношении, а также предоставляет возможность управлять технологическим процессом, в котором заложена погрешность измерений.

Фактически, если положить ингредиенты вектора y равными новым базовым компонентам пространства $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^n}$, то базовая матрица осуществляет переход между пространствами $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^m} \to \mathbb{P}^{\mathcal{L}^n}$.

Также были введены операции модификации базовых матриц, в частности, последовательность операторов преобразования, отвечающих различным технологическим переходам (например, сушке, нормализации, гомогенизации и т. п.) применяющихся последовательно к левой части уравнения 4:

$$P_s \cdot \ldots \cdot P_2 \cdot P_1 \cdot Ax = y \tag{5}$$

Правая часть уравнения при этом остается неизменной, так как y обозначает входные массовые доли ингредиентов для осуществления данного технологического перехода. После применения массива операторов P результирующая базовая матрица $P \cdot A$ остается ненормированной, поэтому, финально, получаем:

$$\frac{1}{\sum_{ij}(P \cdot A)_{ij}} P \cdot Ax = \frac{1}{\sum_{ij}(P \cdot A)_{ij}} y \tag{6}$$

Левая часть уравнения 6 демонстрирует выходные параметры по компонентам, правая — рецептуру и точные пропорции ингредиентов на технологическом переходе. Знак равенства в данном случае демонстрирует технологический дуализм представления продукта по компонентам и ингредиентам. Большинство операторов P для произвольной технологии пищевой промышленности являются нелинейными, при этом, матричный последовательный подход позволяет, используя универсальную теорему аппроксимации, приближать их с любой степенью точности.

На основе базовой матрицы продукта были типизированы направления изменений в продукте, умышленных или случайных, и не связанных с расширением ассортимента. Ключевым в типизации является информация о модификации базовой матрицы, которая либо не доводится до потребителя, либо сами изменения не санкционированы владельцем интеллектуальных прав на рецептуру продукта. Выделено пять видов продукции, позволяющих дифференцировать административное воздействие на производителя (вид матриц представлен на рис. 2):

- **Подлинный продукт** — элемент группы однородной пищевой продукции, базовая матрица которого принимается за эталонную и называется подлинной;
- **Некондиционный продукт** — продукт с нарушениями состава, не содержащий компонентов–заменителей. Административное воздействие за

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 & & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & a_{mm} & & & \\ & & & & 0 & \dots & 0 \\ & & 0 & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

(*а*) Подлинная матрица

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & a'_{22} & \dots & 0 & & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & a'_{mm} & & & \\ & & & & 0 & \dots & 0 \\ & & 0 & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}$$

(*б*) Видоизмененная матрица

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 0 & \dots & 0 & & & \\ 0 & a_{22} & \dots & 0 & & 0 & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & a_{mm} & & & \\ & & & & k_{m+1,m+1} & \dots & 0 \\ & & 0 & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 & \dots & k_{n,n} \end{pmatrix}$$

(*в*) Псевдоматрица

$$\begin{pmatrix} a'_{11} & 0 & \dots & 0 & k_{1,m+1} & \dots & k_{1n} \\ 0 & a'_{22} & \dots & 0 & k_{2,m+1} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a'_{mm} & k_{m,m+1} & \dots & k_{mn} \\ & & & & k_{m+1,m+1} & \dots & 0 \\ & & 0 & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & 0 & \dots & k_{nn} \end{pmatrix}$$

(*г*) Ложная матрица

Рис. 2. Вид базовых матриц, соответствующие подлинному, некондиционному, суррогатному и фальсифицированному продукту

реализацию подобной продукции должно лежать в рамках Административного кодекса РФ с дифференциацией по интервалам нарушения, идентифицируемым после сравнения видоизмененной матрицы некондиционного продукта и подлинной матрицы;

- **Суррогатный продукт** — продукт с компонентами–заменителями, наличие которых не скрывается производителем, моделируемый псевдоматрицей. Компонент–заменитель — компонент рецептуры, замещающий компонент в подлинной рецептуре, позволяющий сохранять органолептические и физико–химические свойства продукта. Также может входить в состав более дешевого ингредиента–сырья, из которого производится суррогатный продукт. Суррогат не является, по сути, продукцией с нарушениями, поэтому регулирование подобных товаров должно лежать в экономико–маркетинговой плоскости, когда потребитель, обладая полной достоверной информацией как о подлинном, так и суррогатном продукте, должен сделать осознанный выбор в сторону одного или другого;
- **Фальсифицированный продукт или фальсификат** — продукт как с нарушениями состава, так и с наличием компонентов–заменителей, о которых умалчивает производитель. Фальсификат в силу произвольности рецептуры несет в себе максимальные риски для здоровья и жизнедеятельности потребителя как при непосредственном употреблении, так и на

продолжительной дистанции, поэтому его оборот должен сдерживаться Уголовным кодексом РФ. Ему соответствует ложная матрица продукта.

- **Нелицензированный продукт,** нарушающий право на интеллектуальную собственность и приравнивающийся к фальсификату, методики идентификации которого сводятся к таким процессам, которые позволяют напрямую сравнивать его базовую матрицу с базовой матрицей подлинного продукта.

Разработка пищевых продуктов предполагает необходимость внесения некоторых изменений в существующие производственные схемы и, как следствие, конструирование самой технологии производства. Эта связь особенно чётко прослеживается при создании не отдельного продукта, а некоторой группы продукции, имеющей значительную схожесть состава (наличие базовой матрицы A_0^p) и технологических решений. В этом случае был предложен подход к разработке ряда пищевых продуктов на основе единого «полуфабриката», обладающего базовой матрицей состава A_0^p. Для дальнейшей детализации универсального подхода уточнен ряд терминологических определений:

- **Базовый пищевой полуфабрикат** — полуфабрикат, на основе которого в промышленных условиях изготавливается однородная группа пищевой продукции.
- **Базовая матрица пищевого полуфабриката** — матрица состава полуфабриката, компоненты которой в целом сохраняются при производстве однородной продукции.
- **Однородная группа пищевой продукции** — ряд пищевых продуктов, получаемых из базового пищевого компонента путем изменения физико–химических или иных показателей (характеристик) на последнем этапе технологического производства.
- **Конструирование технологии однородной группы продукции** — разработка технологии, включающей производство пищевого полуфабриката с последующим последовательным или параллельным выпуском однородной группы пищевой продукции.

Получено представление иерархической структуры технологической цепочки от сырья и полуфабриката до группы однородной готовой продукции в виде ориентированной сети (далее — граф технологической цепи). Вершинами графа, которые расположены послойно, являются компоненты и ингредиенты. Наличие ребра из вершины u в вершину v в графе технологической цепи означает, что в векторе y матричного представления рецептуры ингредиента v присутствует ингредиент u.

На нулевом уровне графа располагаются m базовых компонентов

$$\{K_1, K_2, \ldots, K_n\}$$

из пространства пищевых продуктов $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^m}$, представляющих основу технологии и базу пищевой и рекреационной ценности для потребителя. Среди базовых компонентов не обязательно выделять все известные компоненты состава продукта, лишь те, которые регулируются законодательными актами или содержание которых имеет непосредственное значение для технологии. Схематично граф технологической цепи проиллюстрирован на рис. 3.

На каждом уровне от 1 до l включительно располагается $\{m_1, m_2, \ldots, m_l\}$ ингредиентов, уровень s состоит из ингредиентов $\{Y_1^s, Y_2^s, \ldots, Y_{m_s}^s\}$. Найден общий вид уравнения рецептуры произвольного ингредиента Y_k^s в технологической цепи:

$$\frac{P^{Y_k^s} \cdot A^{Y_k^s} x^{s-2}}{\sum_{ij}(P^{Y_k^s} \cdot A^{Y_k^s})_{ij}} = \frac{y^{Y_k^s}}{\sum_{ij}(P^{Y_k^s} \cdot A^{Y_k^s})_{ij}}, \tag{7}$$

где x^{s-2} — вектор из всех компонентов и ингредиентов вплоть до уровня $s-2$:

$$x^{s-2} = \left\{K_1, K_2, \ldots, K_m, Y_1^1, Y_2^1, \ldots, Y_{m_1}^1, \cdots, Y_1^{s-2}, Y_2^{s-2}, \ldots, Y_{m_{s-2}}^{s-2}\right\}, \tag{8}$$

Если $s = 1$, полагается $x^{-1} \equiv x^0$ — берется вектор базовых компонентов, так как для ингредиентов первого уровня базовая матрица оперирует на одном пространстве пищевых продуктов, что критично для определения подмен компонентов и поиска фальсификационных трендов.

Выражение $A^{Y_k^s} x^{s-2}$ остается в рамках графа технологической цепи и содержит баланс компонентов, по которому осуществляется моделирование технологии, а с помощью вектора $y^{Y_k^s}$ происходит управление непосредственно процессом производства на участке цепи Y_k^s, для которого в работе получены уравнения управления, учитывающие сигнал ошибки, в общем виде.

Таким образом, на основе аппарата базовых матриц типизированы и каталогизированы все производственные этапы производства реализации пищевого продукта, как в срезах компонентов и переходных ингредиентов, так и плоскости однородной и мимикрирующей продукции.

В четвертой главе описаны основные подходы к кластеризации и дифференцированию пищевых продуктов, описан принципиальный алгоритм идентификации и построения иерархических моделей однородной группы продукции. Дан перечень кластерных метрик и области их применения в пищевой промышленности, рассмотрены варианты кластерной идентификации на основе объединения существующих аналитических методов, таких как иммунохимия, спектрометрия, ДНК–аутентификация и др.

В рамках кластеризации пищевых продуктов была сформулирована основная оптимизационная задача, имеющая вид:

$$\sum_{i=1}^{n} \min_{j=1\ldots m} D(x_i, c_j) \to_c \min, \tag{9}$$

где $x_i (i = 1 \ldots n)$ — векторы в $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$ (k — размерность данных — в данном случае представляет количество критериев, когда базис векторного пространства пи-

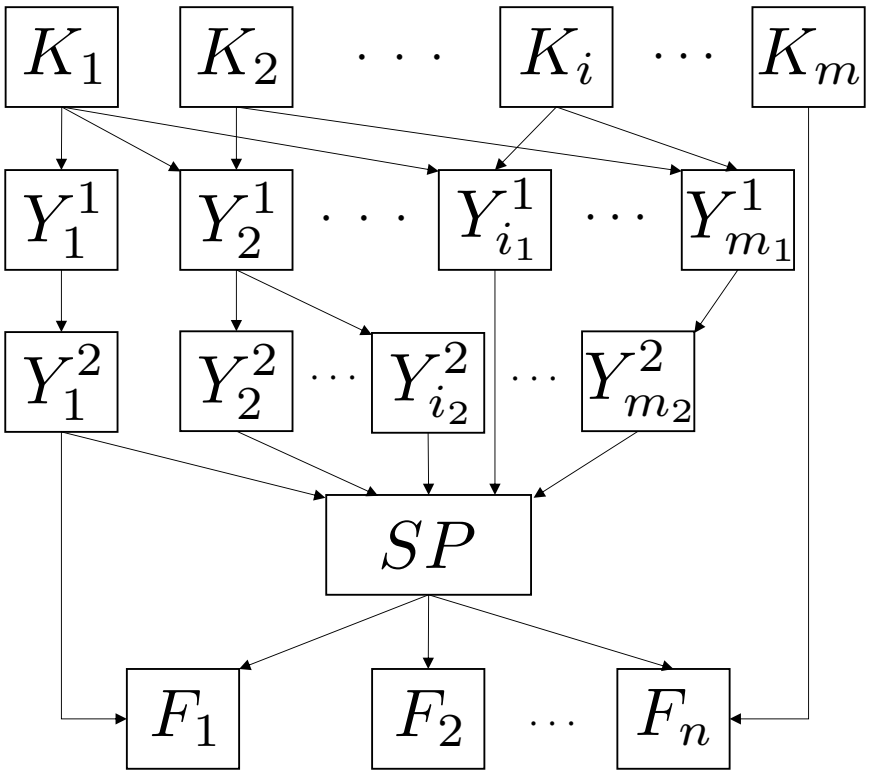


Рис. 3. Обобщенный граф технологической цепи двухуровневой технологии пищевого продукта: вектор $\{K_1, K_2, \dots, K_i, \dots, K_m\}$ — базовые компоненты пространства $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^m}$; вектор $\{Y_1^1, Y_2^1, \dots, Y_{i_1}^1, \dots, Y_{m_1}^1\}$ — ингредиенты первого уровня технологической обработки, $\{Y_1^2, Y_2^2, \dots, Y_{i_2}^2, \dots, Y_{m_2}^2\}$ — соответственно, ингредиенты второго уровня; SP — базовый пищевой полуфабрикат; $\{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ — вектор однородной группы пищевой продукции

щевых продуктов может быть расширен дополнительными критериями наряду с базовыми компонентами); $c_j (j = 1 \dots m)$ — кластерные центры, также являющиеся векторами в $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$; $c = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ — обобщенный вектор кластерных центров; $D(\cdot, \cdot)$ — функция расстояния между векторами пространства $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$.

Для построения дискриминирующих многофакторных критериев также модифицирована классическая регрессионная модель:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_k x_k \tag{10}$$

где $(x_1, \dots, x_k)$ — значения измеримых критериев для некоторого образца продукта, следующим образом:

- $\hat{y}(c_i) = i$. Образцы, соответствующие i–ому кластеру будут иметь наблюдаемое значение, равное номеру этого кластера.
- Для получения дискриминантного критерия на плоскости необходимо разделить регрессионное уравнение на две части:

$$\begin{aligned} y_1 &= a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_l x_l \\ y_2 &= b_0 + a_{l+1} x_{l+1} + a_{l+2} x_{l+2} + \dots + a_k x_k \end{aligned} \tag{11}$$

Для первичного определения подлинности продуктов были использованы коррелограммы с коэффициентами корреляции Пирсона, отражающие типичные взаимосвязи характеристик для данной базовой матрицы продукта. Коэффициент корреляции Пирсона r_{xy} для двух векторов $\vec{x} = \{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$ и $\vec{y} = \{y_1, y_2, \ldots, y_n\}$ имеет вид:

$$r_{\vec{x}\vec{y}} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum\limits_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{12}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i,\ \bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$$

На рис. 4 продемонстрирована коррелограмма жирнокислотного состава молока пастеризованного жирностью 2,5 % и 3,2 %, а также сливочного масла жирности 72,5 % и 82,5 %. Не выявлено статистической разницы между корреляционными карты молочного жира у этих двух продуктов, кроме взаимосвязи кислот C18:3 и C20:0.

Для получения вида критерия дискриминирования по жирнокислотному составу в соответствии с двумерной регрессионной моделью 11 векторы жирнокислотного состава образцов:

$$x = \{x_{\mathbf{C4:0}}, x_{\mathbf{6:0}}, \ldots, x_{\mathbf{C16:0}}, x_{\mathbf{16:1}}, \ldots, x_{\mathbf{22:0}}\}$$

с помощью регрессионного преобразования были трансформированы в векторы вида $x_r = \{x_{\mathrm{C1}}, x_{\mathrm{C2}}\}$.

Для 49 исследованных образцов молока жирностью от 2,5 % до 6,0 % (кластерный центр m) и 22 образцов ряженки жирностью от 2,5 % до 4,0 % (кластерный центр r) был выработан дискриминирующий критерий, при этом дискриминирующей функцией положено расстояние Махаланобиса $D_M(x_r, t), t \in \{\mathrm{m}, \mathrm{r}\}$ до каждого из кластеров:

$$D_M(x_r, t) = \sqrt{\left[x_r - \mu^t\right]^\top (S^t)^{-1} \left[x_r - \mu^t\right]} \tag{13}$$

где μ^t — центр кластера, S^t — его матрица ковариации.

Граф плотности расстояния Махаланобиса для двух кластеров представлен на рис. 5, демонстрирующий возможность дифференциации молочного жира в ряженке и молоке.

В силу необходимости создания комплексной методики аутентификации пищевых продуктов, позволяющей робастным образом интегрировать не только вероятностные методики, но и учитывать стандартизованные границы критериев, строгих или с использованием нечеткой логики, с возможностью идентификации и дифференциации различных пищевых продуктов, было введено понятие идентификационного расстояния:

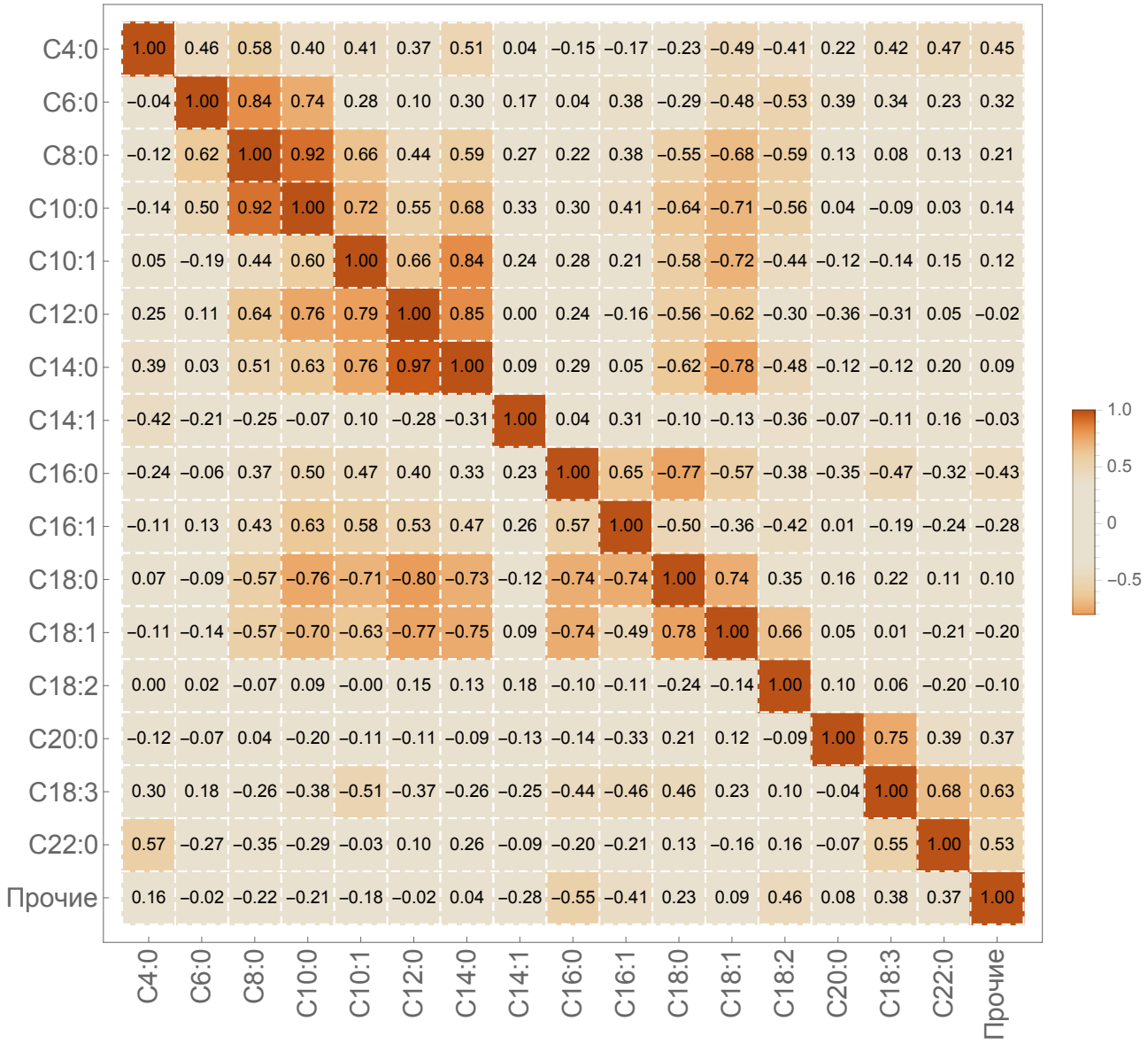


Рис. 4. Коррелограмма жирнокислотного состава для молока и масла. Значения ниже главной диагонали соответствуют корреляционным коэффициентам для молока, выше — для масла

Определение 1. *Идентификационное расстояние $I(x, y)$ — количество методик, для которых существует хотя бы одна конфигурация результирующих параметров, позволяющих с достаточным уровнем доверия дифференцировать базовую матрицу продукта x от базовой матрицы продукта y.*

Для определения конфигураций для отдельных методик, введено понятие графов дифференцирования. Граф дифференцирования методики — ориентированный граф, который строится относительно инвертированной индикаторной матрицы идентификации M, где $M(i, j) = 1$, если продукт i с достаточным уровнем доверия отличим от продукта j при определенной конфигурации параметров (то есть, критериальная область базовой матрицы продукта i не покрывает область продукта j целиком), и $M(i, j) = 0$ в противном случае.

Концепция применена для иерархического разделения национальных кис-

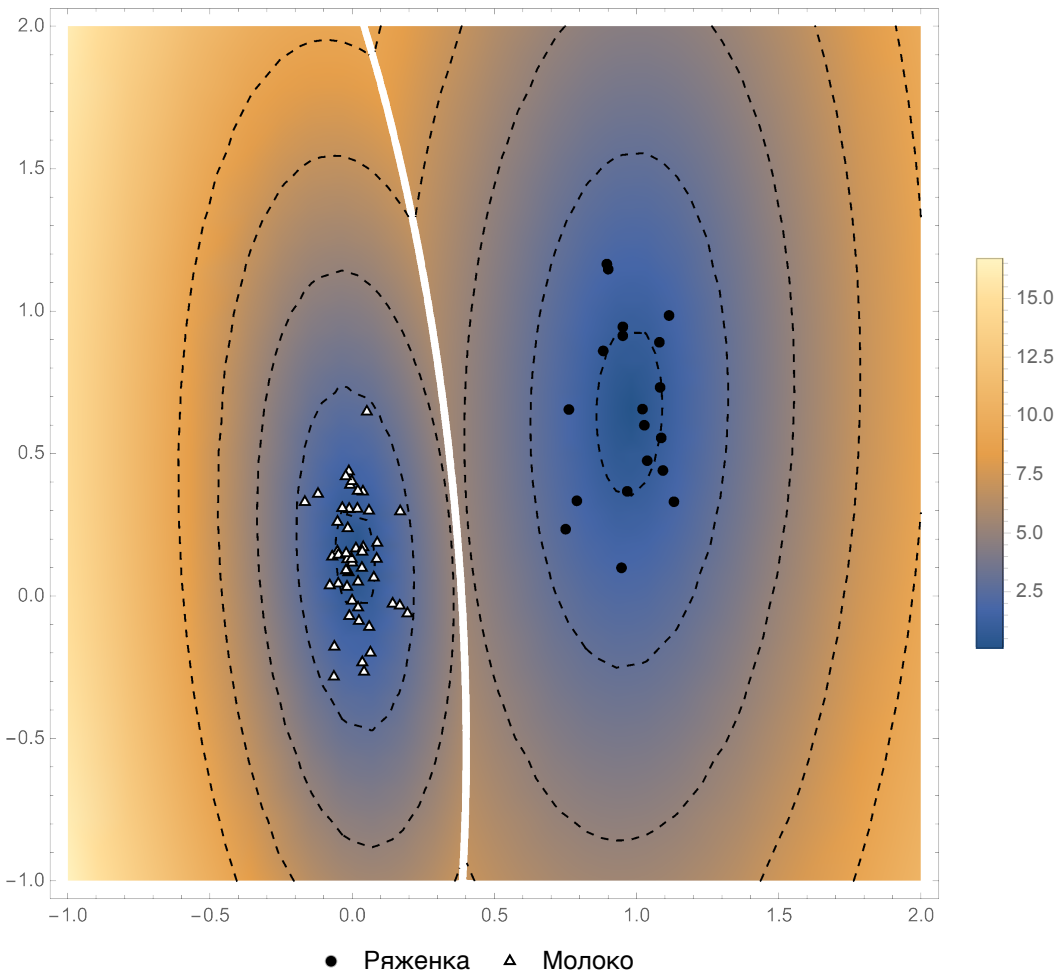


Рис. 5. Визуализация кластерного разбиения двух молочных продуктов (молока и ряженки) по жирнокислотному составу с помощью построения функции $D_0(x_r) = \min(D_M(x_r, \mathrm{m}), D_M(x_r, \mathrm{r}))$. Белая линия — кластерный раздел, где выполняется $D_M(x_r, \mathrm{r}) = D_M(x_r, \mathrm{k})$.

ломолочных продуктов. На рис. 6 представлен граф дифференцирования продуктов по кислотности. Можно отметить, что критериальная область ацидофилина покрывает области варенца, простокваши и простокваши Мечниковской, поэтому его нельзя выделить относительно этих продуктов, и в графе присутствуют соответствующие ребра.

Идентификационный профиль по критериям вкусовой, цветовой и микробиологической идентичности, а также интегрированное значение идентификационного расстояния между национальными кисломолочными продуктами изображено на рис. 7, красным выделены неотличимые подграфы.

Для практической реализации представленных алгоритмов дифференцирования разработана принципиальная схема (см. рис. 8) и идентифицированы ее основные этапы.

1. **Проектирование пищевого продукта.** Этот этап является опциональным, но при этом установлена эффективность идентификационного процесса продукта относительно его базовой матрицы, полученной на этапе проектирования;

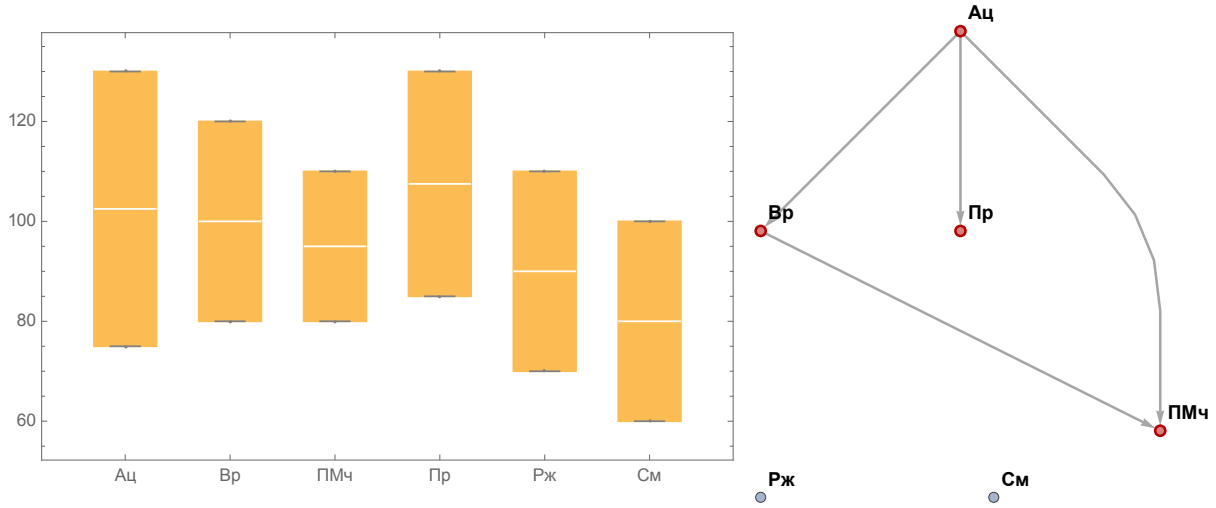


Рис. 6. Визуализация границ кислотности кисломолочных продуктов и соответствующего им графа дифференцирования по кислотности. Здесь и далее: Ац — Ацидофилин, Вр — Варенец, ПМч — Простокваша Мечниковская, Пр — Простокваша, Рж — Ряженка, См — Сметана

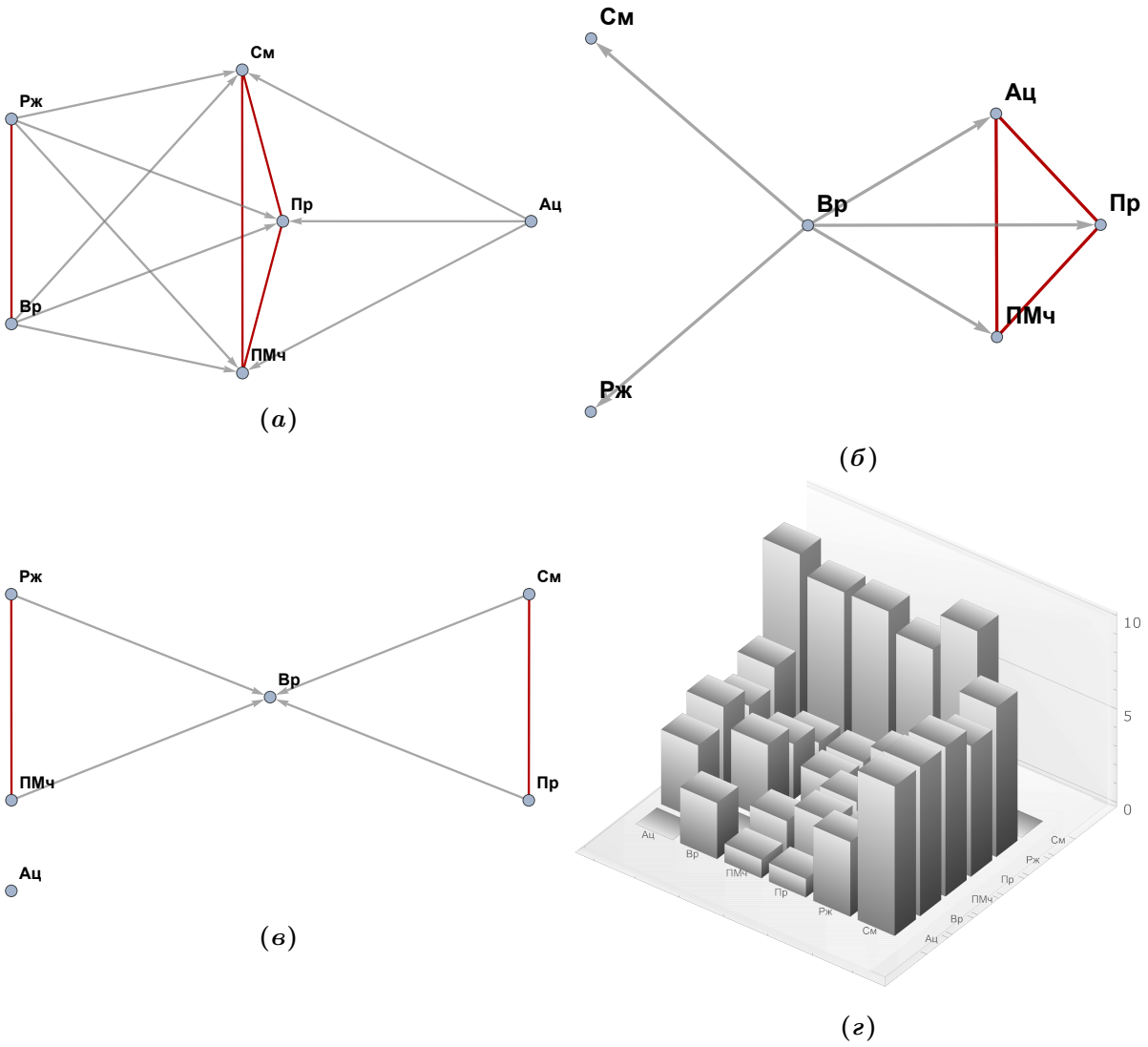


Рис. 7. Визуализация графов дифференцирования для (а) вкусовой идентичности, (б) цветовой идентичности, (в) видового состава микрофлоры национальных кисломолочных продуктов. На (г) изображен график идентификационного расстояния по всем методикам

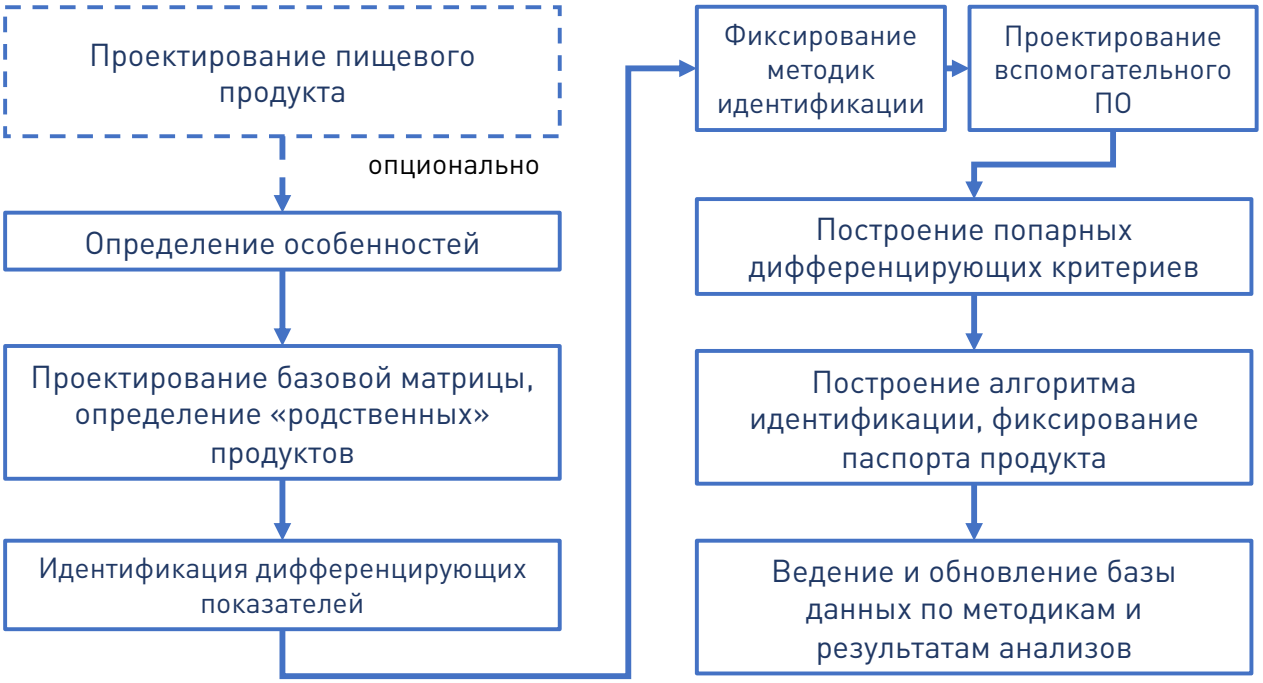


Рис. 8. Принципиальная схема построения идентификационного алгоритма пищевого продукта

2. **Определение особенностей.** Это органолептический профиль, физико–химический профиль, биологическая польза или другие критерии, представляющие ценность для потребителя и отличающие продукт от других. Относительно этих особенностей формируется мета–информация о продукте и строятся все последующие идентификационные признаки;
3. **Проектирование базовой матрицы.** Проектирование базовой матрицы относительно базовых компонентов и ингредиентов, выстраивание матриц технологических переходов — основной этап идентификационного процесса, где сведения о продукте переводятся в цифровую плоскость;
4. **Работа с дифференцирующими признаками.** Сбор образцов и определение статистически значимых границ идентификационных критериев составляет основу идентификационного алгоритма. Процесс упрощается, когда используется наработанная база аналитических данных относительно группы продукции, в которую входит анализируемый с помощью данной схемы продукт. Параллельно с идентификацией дифференцирующих показателей проводится мониторинг, анализ и ранжирование существующих методик идентификации на предмет их статистической силы относительно идентификации конкретной базовой матрицы продукта. В соответствии с принципами Agile производится сбор и настройка параметров аналитического и статистического ПО для организации конкурентного лабораторного цикла исследований с целью выявления подлинности относительно базовой матрицы;

5. **Построение попарных дифференцирующих критериев.** После построения идентификационной дендрограммы родственных продуктов на основе понятия идентификационного расстояния на имеющихся исходных данных о продукте и его родственных связях строятся всевозможные попарные дифференцирующие критерии, которые затем фиксируются в единой схеме идентификации, указывающей количество и профиль используемых аналитических методов для каждой конкретной идентификационной задачи;
6. **Фиксирование паспорта продукта.** На этом этапе происходит документальное утверждение цифрового СТО, позволяющего исследовательским лабораториям делать юридически значимые выводы об исследуемом продукте;
7. **Ведение базы данных пищевого продукта.** На этом этапе происходит корректирование идентификационных границ и уточнение попарных дифференцирующих критериев, в соответствии с полученными показателями, и интеграция исследованного образца в систему с обратной связью обновляемой базы данных продуктов с распределенным доступом.

В пятой главе исследованы возможности проектирования пищевого продукта на основе аппарата базовых матриц, а также цифрового мониторинга его качественных пост–производственных характеристик.

На основе аппарата базовых матриц спроектирована задача моделирования в виде кортежа:

$$\left\{\mathcal{L}^k, \mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}, \mathcal{X}^n, t^-, t^+, c(\cdot)\right\}, \tag{14}$$

где $\mathcal{L}^k$ — список базовых компонентов, $\mathbb{P}^{\mathcal{L}^k}$ — векторное пространство рецептур, $\mathcal{X}^n$ — доступные ингредиенты, которые могут быть связаны отношением 7 из технологической цепи, t^-, t^+ — ограничения на состав и $c(\cdot)$ — набор целевых функций. На основе задачи моделирования формализованы задачи оптимизации рецептуры по аминокислотному и жирнокислотному составам, соотношению цена–качество и другим.

Исследован и представлен алгоритм проектирования пищевого продукта, когда не все значения массовых долей компонентов известны, а также в случае нечетких ограничений на модель.

В качестве нового инструмента моделирования, внедрены и адаптированы элементы теории генетического программирования. Установлено, что для пищевых приложений генетический алгоритм обладает рядом преимуществ:

- он позволяет получить несколько субоптимальных рецептур с различными вариациями состава, так как на каждой итерации алгоритма имеется семейство рецептур, подвергаемых оптимизации;

- алгоритм не останавливается на локальных минимумах, позволяя искать оптимальные сочетания ингредиентов и компонентов на всем факторном пространстве;
- в силу стохастичности, в отличие от классических симплекс–алгоритмов, результаты генетического алгоритма отходят от пограничных решений, внося, во–первых, рецептурное разнообразие, а во–вторых, выдавая результаты, находящиеся на удалении от критических значений параметров, которые в силу производственной погрешности технология рецептуры может превзойти;
- ограничения t^-, t^+ в модели проектирования могут быть произвольными, быть нелинейными и накладываться друг на друга, например, в случае, когда на некоторый ингредиент ставится ограничение, что он либо не должен быть в рецептуре, либо должен быть задействован по максимуму;
- от оператора не требуется никаких дополнительных внутренних математических знаний об исследуемых условиях и их разрешимости — алгоритм в любом случае закончит свою работу и выдаст решение, даже если оно не является валидным с точки зрения начальных данных, в случае чего оператор может скорректировать задачу.

В качестве примера проектирования пищевого продукта и теста работоспособности рассмотрен комбинированный случай, когда используются изначально несовместные условия, а также искомый функционал штрафуется за использование определенных ингредиентов. Для определения оптимальности рецептуры была введена модифицированная функция невязки:

$$\mathrm{err}(\alpha) = \sum_{i=1}^{k} \sigma_k^2 \left(\max\left(\sum_{j=1}^{n} \mathcal{X}_{ij}^n \alpha_j - t_i^+, 0 \right) + \max\left(t_i^- - \sum_{j=1}^{n} \mathcal{X}_{ij}^n \alpha_j, 0 \right) \right)^2 \quad (15)$$

где σ — вектор коэффициентов, позволяющий ранжировать условия моделирования.

В таблице 1 представлены начальные условия задачи проектирования, при этом следует отметить, что целевые значения некоторых ингредиентов представлены интервалами, а некоторые единственными значениями. Вектор коэффициентов штрафов σ имеет вид:

$$\sigma = \{1; 1; 1; 0{,}0001; 0{,}00001; 1; 0{,}001; 0{,}001; 0{,}001; 0{,}001; 0{,}01; 0{,}1\} \quad (16)$$

и соответствует приведению ингредиентов к единому порядку значимости (при этом относительно остальных ингредиентов содержание витаминов и микроэлементов штрафуется с коэффициентом 0,1).

Также дополнительно вводится поощрение за использование пастеризованной сыворотки, содержание которой максимизируется в продукте. Это осуществляется введением дополнительного члена в функции приспособленности, равно-

Таблица 1. Целевые значения модельной рецептуры пищевого продукта

	БЛ	**БУ**	**МУ**	**вА**	β–**К**	**ВД**	**Na**	**К**	**Ca**	**Mg**	**P**	**ЭЦ**
Целевые значения	2,1 ±0,1	3,1 ±0,9	5.4 ±1,6	5050	10100	89 ±1,6	56	238	78	12	68	46 ±6

Содержание веществ дается на 100 г. продукта. Легенда: **БЛ** — белок, г, **БУ** — быстрые углеводы, г, **МУ** — медленные углеводы, г, **вА** — витамин А, мкг, β–**К** — β–каротин, мкг, **ВД** — вода, г, **Na** — натрий, мг, **К** — калий, мг, **Ca** — кальций, мг, **Mg** — магний, мг, **P** — фосфор, мг, **ЭЦ** — энергетическая ценность, ккал

го $-1000\alpha_s$, где α_s — содержание пастеризованной сыворотки в долях единиц в рецептуре.

Были подобраны квазиоптимальные параметры генетического алгоритма для решения задач моделирования пищевых рецептур, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Параметры, используемые при реализации генетического алгоритма для проектирования новых рецептур продуктов

Размер популяции	**Итерации**	**Элитизм**	**Мутации**
20	2000	0,3	0,1

Динамика генетического алгоритма представлена в таблице 3. Можно отметить, что с течением поколений концентрат и изолят соевого белка заменялись пастеризованной сывороткой в решении, что демонстрирует эволюционный подход к разработке рецептуры. Изменение функции приспособленности с количеством итераций алгоритма продемонстрировано на рис. 9. Начиная примерно с 1700 итерации функция выходит на плато, что позволяет предположить, что улучшения решения для данных начальных условий уже не будет.

Модуль генетического программирования написан как дополнительный модуль к программе для моделирования состава поликомпонентных продуктов.

Для пост–производственного отслеживания даны принципы цифрового мониторинга качественных характеристик пищевых продуктов. Для наблюдения за поведением продукта на логистическом этапе и этапе хранения применены нечеткие модели принадлежности и выпуклой комбинации.

Продемонстрирована возможность применения нечеткой классификации для идентификации молочной продукции, на основе сглаженных нечетких интервалов истинности вида:

$$\frac{1}{1+\left(\frac{x}{0{,}75}\right)^8},\ \frac{1}{1+\left(\frac{x-1{,}5}{0{,}75}\right)^8},\ \frac{1}{1+\left(\frac{x-3}{0{,}75}\right)^8},\ \frac{1}{1+\left(\frac{x-5}{1{,}25}\right)^{12}} \tag{17}$$

для продукта обезжиренного, пониженной жирности, средней жирности и повышенной жирности, соответственно. Вид этих функций, а также сравнение с кусочно–линейным классификатором представлены на рис. 10.

Таблица 3. Виртуальные рецептуры, отвечающие наиболее приспособленной особи в популяции при работе генетического алгоритма

Название ингредиента	**№ итерации**									
	1	**10**	**100**	**200**	**300**	**400**	**500**	**1000**	**1500**	**2000**
Функция приспособленности	29,91	-64,45	-124,83	-153,91	-169,54	-188,84	-215,81	-282,97	-299,67	-311,07
Морковь	11 %	11 %	11 %	11,2 %	11,1 %	11,1 %	11,1 %	11,6 %	12,5 %	12,7 %
Свекла	16,8 %	16,9 %	16,9 %	17,6 %	17,6 %	17,6 %	15,7 %	16,2 %	17,6 %	18,6 %
Тыква	7,74 %	7,74 %	11,1 %	11,2 %	12,2 %	10,7 %	10,7 %	9,06 %	11,8 %	9,52 %
Топинамбур	2,69 %	2,62 %	2,62 %	4,55 %	4,42 %	3,74 %	3,27 %	3,57 %	2,59 %	4,4 %
Соя зеленая	3,56 %	3,56 %	3,65 %	2,72 %	2,76 %	2,98 %	2,97 %	2,98 %	0,66 %	0,65 %
Горох зеленый	12,5 %	15,3 %	10,8 %	7,56 %	6,06 %	5,97 %	6,1 %	6,09 %	6,16 %	7,16 %
Перец сладкий	9,35 %	9,35 %	9,35 %	9,62 %	9,97 %	11,3 %	11,3 %	14,3 %	12 %	11,3 %
Обезжиренное молоко	7,03 %	7,64 %	7,64 %	7,54 %	7,54 %	7,85 %	7,86 %	5,29 %	4,08 %	2,36 %
Сухая сыворотка	1,65 %	1,59 %	1,55 %	1,55 %	1,55 %	1,3 %	1,28 %	0,72 %	0,78 %	0,84 %
Пастеризованная сыворотка	16,9 %	16,9 %	19 %	20,5 %	21,2 %	22,2 %	24,6 %	28,5 %	30 %	31,2 %
Концентрат соевого белка	1,61 %	1,61 %	1,55 %	1,3 %	1,2 %	1,15 %	1,15 %	0,61 %	0,64 %	0,19 %
Изолят соевого белка	9,14 %	5,81 %	3,81 %	3,65 %	3,43 %	3,1 %	3,09 %	0,38 %	0,17 %	0,16 %
Обезжиренная соевая мука	0,04 %	0,04 %	1,05 %	1,05 %	1,04 %	1,01 %	0,85 %	0,85 %	1,03 %	0,88 %

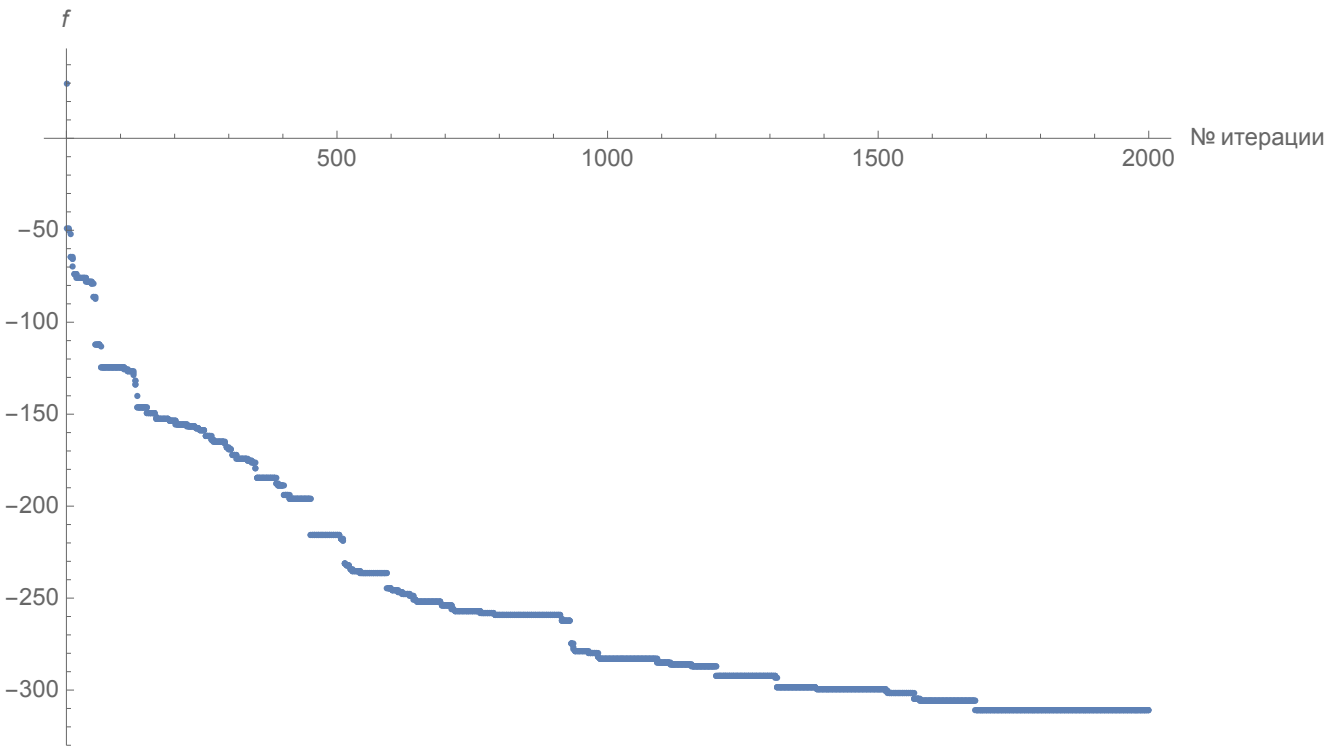
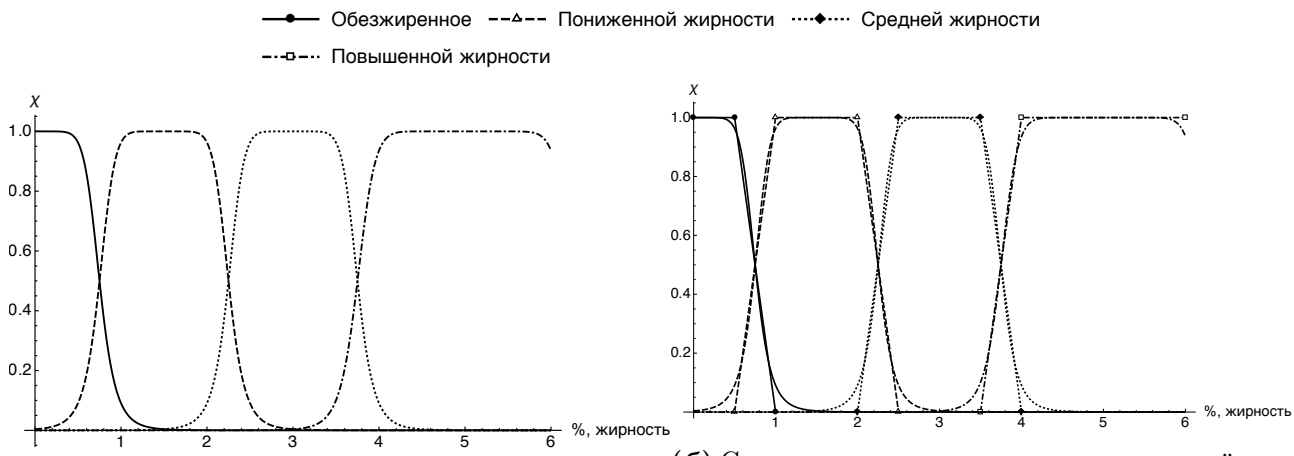


Рис. 9. Минимальные значения функции приспособленности $f(r)$ для каждой итерации генетического алгоритма



(*а*) Вид аппроксимационных уравнений

(*б*) Сравнение аппроксимационных уравнений с кусочно–линейным классификатором

Рис. 10. Аппроксимация нечеткой классификации питьевого молока по жирности.

Показано, что для двух идентификационных классов, являющихся соседними лингвистическими характеристиками одного критерия, принимающими в точке одно и то же значение (для многомерного случая — гиперплоскость), граница между этими классами должна находиться в данной точке, вне зависимости от погрешности метода измерения. На практике это означает, что, например, для молокорастительных и растительномолочных продуктов логично положить границу разделения по содержанию молочного жира в жировой фазе на уровне 50 %.

В силу того, что детериорация качества пищевого продукта зачастую подчиняется экспоненциальному закону, были рассмотрены приложения функции Харрингтона в качестве характеристических функций $\chi_Q(t)$ нечеткого множества Q — продукции, соответствующей санитарным нормам безопасности, во времени.

Были определены идентификационные области: I — «продукт соответствует установленным нормам и готов к потреблению», II — «продукт безопасен для употребления, но в нем уже происходят деградирующие качественные изменения» и III — «продукт необходимо утилизировать», которым может соответствовать решение товародержателя: I — «продавать», II — «перепродать на переработку», III — «утилизировать», соответственно. Функция безопасности определена как нечеткое отрицание функции Харрингтона, когда меньшим значениям полагается большее значение желательности. Ее график представлен на рис. 11.

Был разработан комбинированный мультикритериальный подход к оценке качественных показателей продукта при хранении. Для демонстрации подхода, введем понятие «качество для потребителя» — характеристику, демонстрирующую вкус и общее удовлетворение от потребления продукта. Характеристическая функция данного показателя в нечетком смысле убывает быстрее функции безопасности, например, для продукции хлебопекарной и кондитерской промышленности ее вкусовые характеристики деградируют значительно раньше,

чем продукция становится негодной к употреблению. Вкус «свежего хлеба» имеет большую ценность для потребителя и оказывает влияние на его решение о покупке, но при этом не единственное и решающее, так как срок годности тоже берется в расчет. Функция «качества для потребителя» $\chi_T(t)$ смоделирована функцией выживания распределения Вейбулла $S_{W(k,\lambda)}(t)$ (в данном случае она равняется вероятности того, что вкус еще не был утрачен к моменту времени t):

$$S_{W(k,\lambda)}(t) = e^{-(t/\lambda)^k},\ t > 0 \tag{18}$$

Если положить вес показателя безопасности равным 0,6, а вес показателя качества для потребителя равным 0,4, соответственно, можно составить выпуклую комбинацию критериев, которая для модельного продукта примет вид:

$$\chi_{(Q+T)^{0,6}}(t) = 0{,}6\left(1 - e^{e^{5-t}}\right) + 0{,}4e^{-(t/2)^2} \tag{19}$$

Решение уравнения для уровня 0,63 — верхнего показателя функции Харрингтона для оценки «удовлетворительно» — демонстрирует, что $t \simeq 4$. Это означает, что по истечении четырех суток продукт должен быть реализован традиционным или альтернативными способами (с использованием скидочной политики, и т. п.). Если руководствоваться лишь показателем срока годности, то эта цифра приняла бы значение 5, не оставив продавцу времени для операционных маневров. Вид графиков функций и их выпуклой комбинации представлен на рис. 12.

В шестой главе описаны практические аспекты мета–аналитической декомпозиционной методологии. Разработанная методология кластеризационной идентификации пищевых продуктов позволила объединить комплекс существующих аналитических методик, затрагивающих различные аспекты. При этом, методология предполагает динамический процесс идентификации, валидирующий подключение или отказ от дополнительных методов исследования в каждом конкретном случае определения кластерной принадлежности, что ведет к экономии аналитических и человеческих ресурсов.

База результатов аналитических исследований нарабатывалась в испытательной лаборатории «МОЛОКО» Всероссийского научно–исследовательского института молочной промышленности в период с 2019 по 2021 гг. Для создания дискриминирующих критериев использован 91 образец молока, 64 образца масла, 38 образцов молочной продукции различной жирности. Статистический анализ физико–химических и органолептических показателей приведен в табл. 4, при этом в обобщенную модель также включено исследование безопасности по микробиологическим показателям.

Статистически подтверждены различия подлинных образцов молочной продукции с фальсифицированными образцами по физико–химическим показателям, в частности по содержанию кальция и фосфора (см. рис. 13).

Проанализирован жирнокислотный состав для получения критериев дифференциации молочных продуктов по типам и видам нарушений. Типичный

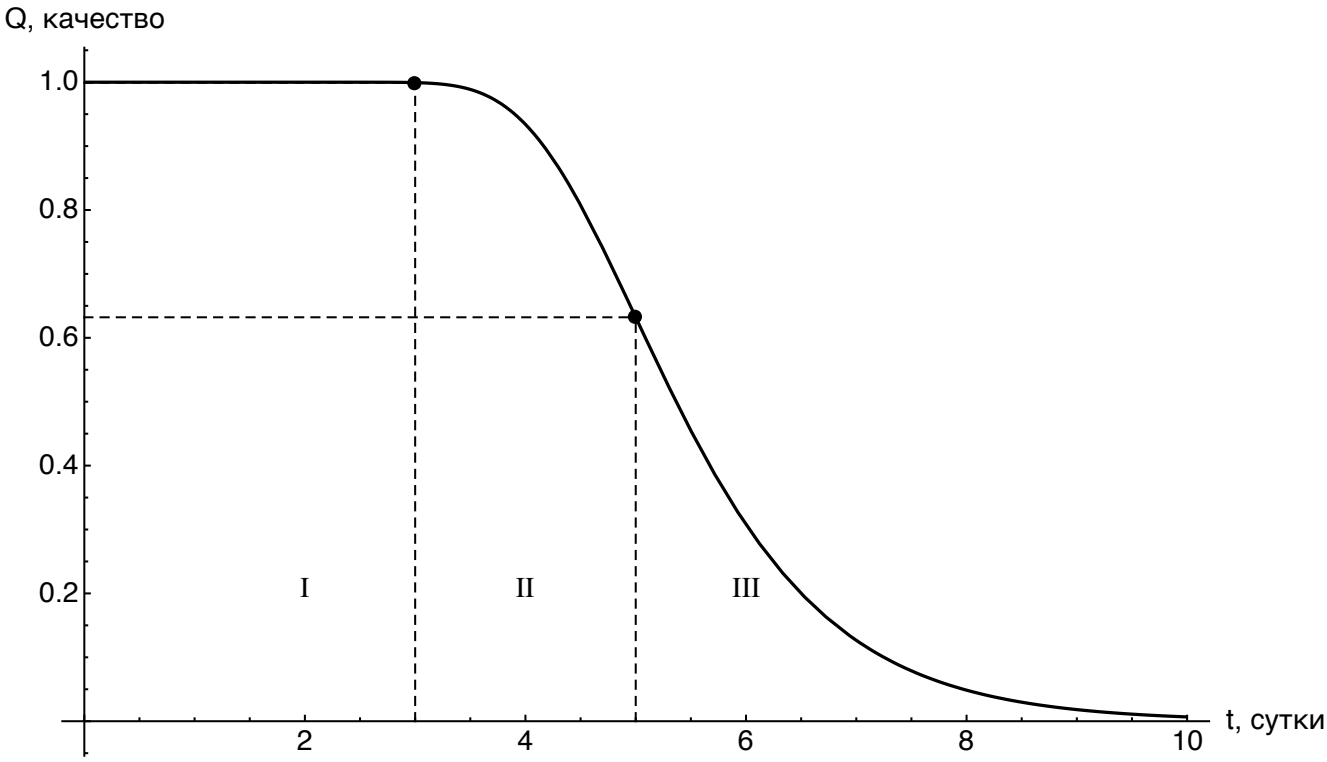


Рис. 11. Характеристическая функция качества модельного продукта на основе функции желательности Харрингтона.

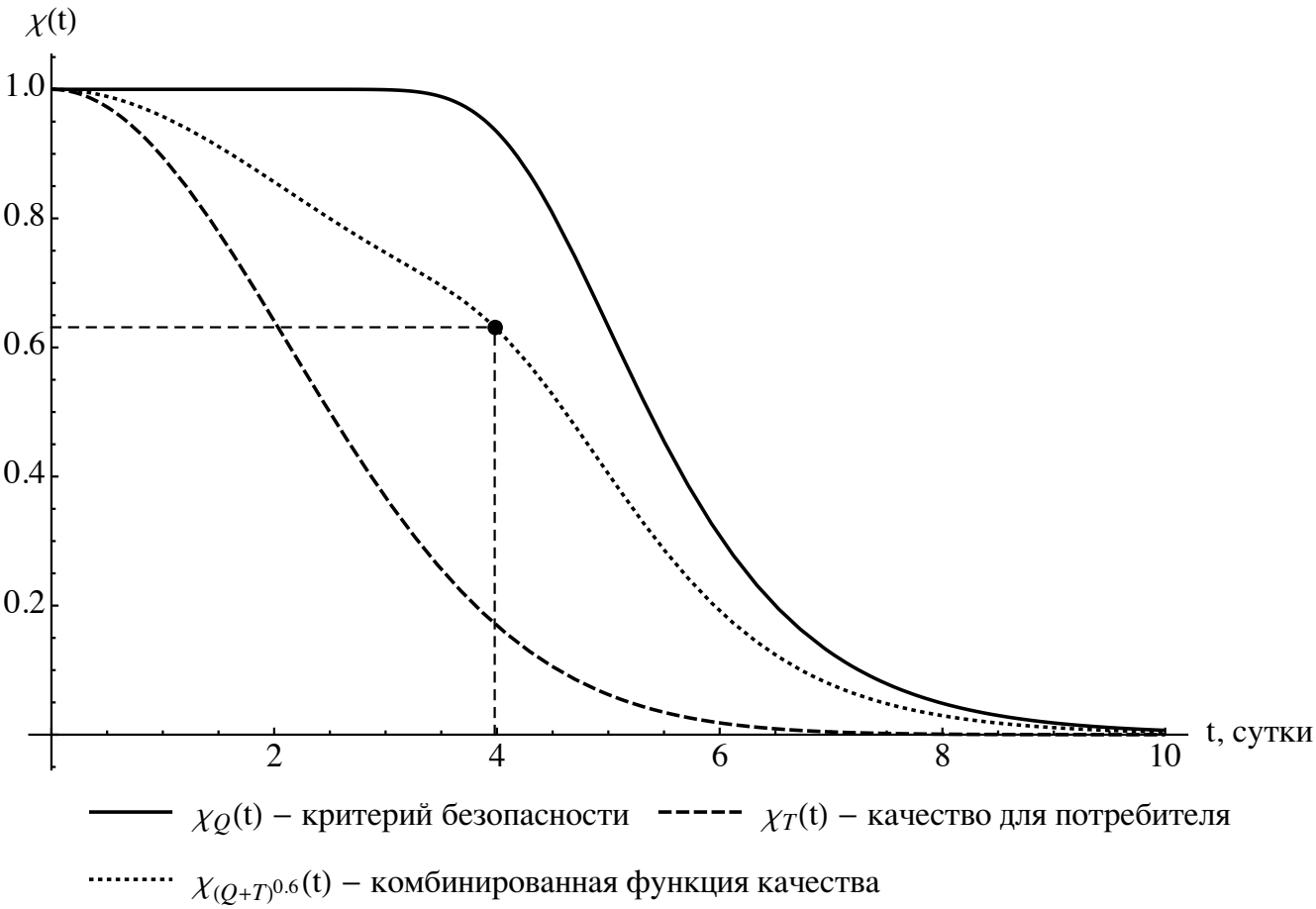
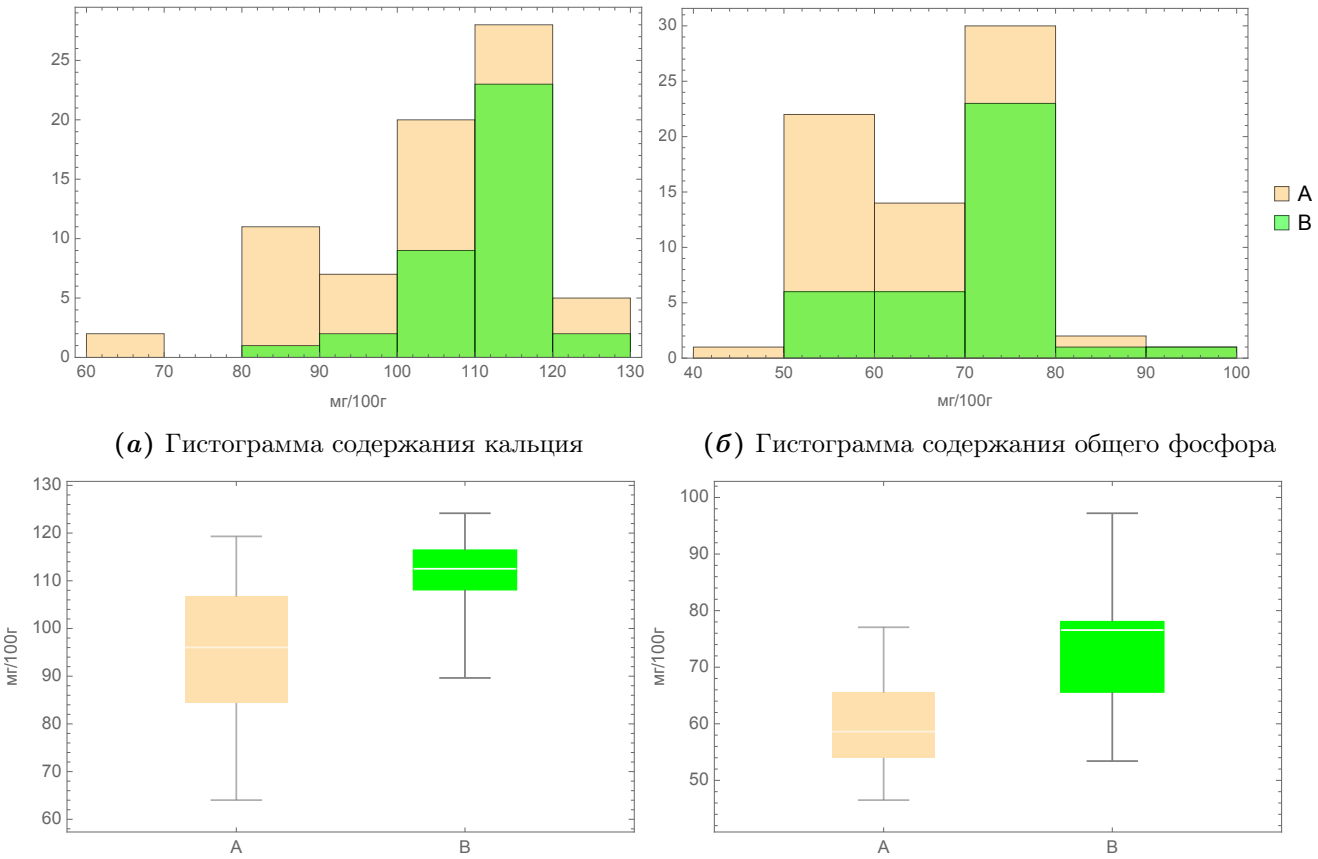


Рис. 12. Выпуклая комбинация двух характеристических функций.



(*а*) Гистограмма содержания кальция

(*б*) Гистограмма содержания общего фосфора

(*в*) Диаграмма размаха содержания кальция

(*г*) Диаграмма размаха содержания фосфора

Рис. 13. Содержание микроэлементов в образцах молока, где A — все образцы, B — образцы без нарушений состава

жирнокислотный профиль образцов приведен на рис. 14. Проведен сравнительный анализ жирнокислотных профилей молочной продукции с зарубежными данными и выявлены статистические различия, позволяющие сделать выводы о возможности региональной дифференциации молочной продукции. Использован метод главных компонент с последующим применением гауссовской смешанной модели для вычисления кластерных границ. Графики для двух компонент для молока и масла представлены на рис. 16 и 17, для трех компонент также построены доверительные эллипсоиды для подлинных продуктов (рис. 18. и 19).

В дальнейшем осуществлялось слепое тестирование модели для молока (49 образцов) с последующим сравнением с полным экспертным анализом, при этом точность составила 100 % (отсутствовали некорректно классифицированные образцы), чувствительность 88 % (присутствовали образцы, получившие статус «неопределенность», для которых требовалось проведение полного аналитического комплекса). При этом, следует отметить, что образцы со статусом «неопределенность» имели нарушения жирнокислостного состава относительно интервальных ограничений на жирные кислоты по ГОСТ 32915–2014, но при этом являлись подлинными. Матрица классификации представлена на рис. 15.

Разработана методология оптимизации необходимого числа аналитических

Таблица 4. Статистические данные по исследованным образцам молока и масла

Параметр	ЕИ	Образцы без нарушений ж/к состава					Все образцы			
		$\bar{x}_r$	SD	Min	Max	$\frac{\bar{x}_a}{\bar{x}_r}$*	$\bar{x}_a$	SD	Min	Max
Молоко										
Массовая доля белка	%	3,25	0,25	2,6	3,73	↓	2,99	0,46	1,74	3,73
Кислотность	°T	16,97	3,19	12,	34,5	=	16,49	2,8	12,	34,5
К, после термостатирования	°T	17,24	1,54	12,8	21,	=	17,	1,76	12,5	21,
Массовая доля сухих веществ	%	11,47	0,48	9,96	12,31	=	11,35	0,68	9,05	13,71
Массовая доля лактозы	%	4,77	0,28	4,4	5,6	=	4,79	0,42	3,5	6,4
Активная кислотность	ед, pH	6,61	0,18	5,69	6,79	=	6,62	0,16	5,69	6,87
Содержание кальция	мг/100г	111,19	7,77	89,63	124,16	↓	105,36	13,49	64,02	128,04
Содержание общего фосфора	мг/100г	72,43	9,35	53,41	97,21	↓	68,02	10,47	46,51	97,21
Масляная кислота (C4:0)	%	3,08	0,17	2,84	3,46	↓↓	2,45	1,1	0,	3,46
Капроновая кислота (C6:0)	%	2,41	0,32	1,51	2,88	↓↓	1,89	0,9	0,	2,88
Каприловая кислота (C8:0)	%	1,35	0,11	1,13	1,63	↓	1,06	0,48	0,	1,63
Каприновая кислота (C10:0)	%	2,89	0,31	2,19	3,65	↓	2,29	1,03	0,	3,65
Деценовая кислота (C10:1)	%	0,29	0,05	0,21	0,48	=	0,23	0,11	0,	0,48
Лауриновая кислота (C12:0)	%	3,02	0,51	2,1	4,3	↓	2,45	1,03	0,	4,3
Миристиновая кислота (C14:0)	%	10,19	1,13	8,42	13,2	↓↓	8,36	3,29	0,23	13,2
Миристолеиновая кислота (C14:1)	%	0,8	0,29	0,41	1,46	↓	0,68	0,37	0,01	1,46
Пальмитиновая кислота (C16:0)	%	30,9	2,46	25,12	36,73	=	31,24	4,77	6,67	38,54
Пальмитолеиновая кислота (C16:1)	%	1,73	0,23	1,22	2,39	=	1,5	0,59	0,07	2,76
Стеариновая кислота (C18:0)	%	11,21	1,84	7,04	14,86	=	10,84	2,93	4,39	20,17
Олеиновая кислота (C18:1)	%	22,66	2,04	18,82	27,83	↑	25,24	5,34	18,82	39,14
Линолевая кислота (C18:2)	%	2,4	0,34	1,54	3,02	↑↑	4,24	4,58	1,54	18,98
Арахиновая кислота (C20:0)	%	0,21	0,08	0,04	0,59	=	0,25	0,13	0,02	0,73
Линоленовая кислота (C18:3)	%	0,56	0,14	0,15	1,1	=	0,55	0,23	0,	1,32
Бегеновая кислота (C22:0)	%	0,06	0,02	0,02	0,11	=	0,08	0,11	0,	0,81
Прочие жирные кислоты	%	6,25	0,76	4,81	9,1	=	6,65	5,25	0,95	40,5
Масло										
Вкус и запах	балл	7,33	1,57	3,	10,	=	7,24	1,42	3,	10,
Консистенция	балл	3,75	0,55	3,	5,	=	3,78	0,58	3,	5,
Термоустойчивость		0,82	0,08	0,64	0,95	=	0,84	0,08	0,64	0,95
Титруемая кислотность плазмы	°T	19,25	3,78	15,	26,5	=	18,82	3,26	15,	26,5
Кислотность жировой фазы	°T	2,14	0,45	1,66	3,	=	1,97	0,49	1,28	3,
Масляная кислота (C4:0)	%	3,	0,29	2,2	3,53	↓	2,73	0,68	0,48	4,11
Капроновая кислота (C6:0)	%	2,33	0,39	1,28	2,85	↓	2,14	0,56	0,53	2,85
Каприловая кислота (C8:0)	%	1,32	0,15	0,83	1,55	↓	1,22	0,27	0,35	1,55
Каприновая кислота (C10:0)	%	2,83	0,37	1,88	3,46	↓	2,6	0,61	0,67	3,46
Деценовая кислота (C10:1)	%	0,29	0,04	0,21	0,39	=	0,26	0,06	0,06	0,39
Лауриновая кислота (C12:0)	%	2,95	0,46	2,2	3,95	=	2,77	0,6	1,26	3,95
Миристиновая кислота (C14:0)	%	9,83	0,88	8,07	12,08	↓	9,11	1,78	2,74	12,08
Миристолеиновая кислота (C14:1)	%	0,93	0,27	0,42	1,37	=	0,85	0,31	0,15	1,37
Пальмитиновая кислота (C16:0)	%	31,66	2,71	25,9	37,61	=	31,72	2,89	25,45	41,3
Пальмитолеиновая кислота (C16:1)	%	1,8	0,21	1,14	2,28	=	1,73	0,36	0,57	2,28
Стеариновая кислота (C18:0)	%	11,18	1,74	8,13	14,54	=	11,13	2,13	5,39	14,76
Олеиновая кислота (C18:1)	%	22,63	1,91	18,36	27,02	↑	23,83	3,17	18,36	33,39
Линолевая кислота (C18:2)	%	2,27	0,57	1,53	3,7	↑↑	3,19	2,67	1,53	15,81
Арахиновая кислота (C20:0)	%	0,19	0,07	0,02	0,33	=	0,19	0,07	0,02	0,33
Линоленовая кислота (C18:3)	%	0,55	0,15	0,33	1,04	=	0,58	0,18	0,33	1,36
Бегеновая кислота (C22:0)	%	0,06	0,02	0,01	0,12	=	0,05	0,03	0,01	0,12
Прочие жирные кислоты	%	6,13	1,16	2,94	9,05	=	5,85	1,55	1,9	11,68
C16:0 / C12:0		10,93	1,57	7,6	14,	↑↑	12,11	3,63	7,6	28,6
C18:0 / C12:0		3,93	1,1	2,2	6,2	↑	4,26	1,39	1,5	8,1
C18:1 / C14:0		2,28	0,47	0,3	3,2	↑	2,85	1,62	0,3	12,1
C18:2 / C14:0		0,23	0,07	0,1	0,4	↑↑	0,47	0,81	0,1	5,7
$\frac{\text{C18:1 + C18:2}}{\text{C12:0 + C14:0 + C16:0 + C18:0}}$		0,44	0,06	0,3	0,6	=	0,49	0,14	0,3	1,1

* сравнение средних группы из всех образцов с группой без нарушений ж/к состава: = — статистической разницы не выявлено; ↓,↑ — $p < 0,05$; ↓↓,↑↑ — $p < 0,001$

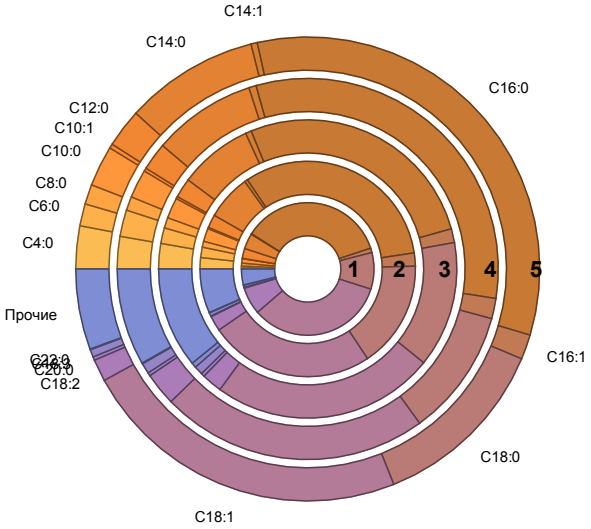


Рис. 14. Типичный жирнокислотный состав образцов молока: 1, 2 — без нарушений ж/к состава; 3, 4 — с нарушениями; 5 — с прочими нарушениями

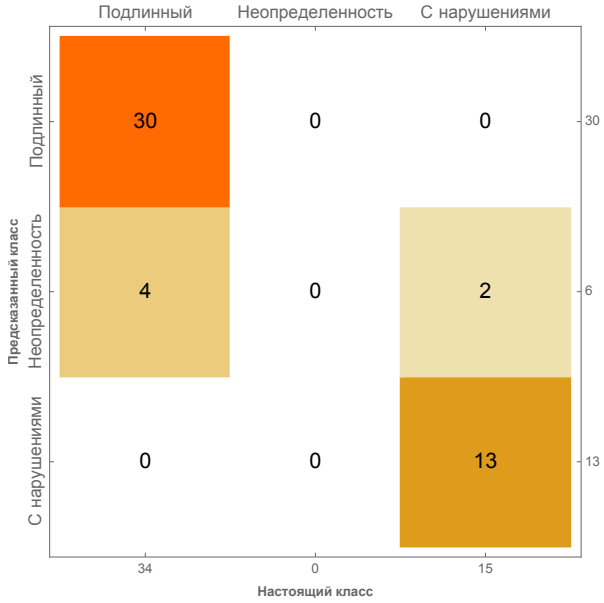


Рис. 15. Матрица классификации идентификационной модели молока

исследований для аутентификации пищевого продукта. В методологию включается комбинированный подход с использованием исторических данных по аналитическим методикам, а также мета–данных об источниках образцов.

На рис. 20 продемонстрирована статистическая достоверность комбинирования методик, рассчитанная с использованием расширенного наивного байесовского классификатора, для исследованных образцов молока и масла. Можно отметить, что комбинированный анализ жирно–кислотного состава и микробиологических показателей (сектор AB) демонстрирует синергетический эффект на точность классификации, так как анализируются аспекты молочного продукта, имеющие низкий уровень зависимости по направлениям фальсификации.

Также введено понятие индекса доверия к производителю, позволяющее расширить или сузить идентификационные интервалы и требуемое количество повторностей в лабораториях для конкретного образца. Изменение индекса доверия осуществляется на основе постериорной вероятности байесовского классификатора, при этом в качестве сопряженного априорного распределения используется бета-распределение с плотностью, смещенной ближе к нулю ($\alpha = 3, \beta = 5$), которое медленнее реагирует на накопление подлинных образцов и сильнее штрафует индекс доверия за наличие нарушений. Индекс доверия обозначает коэффициент корректировки методик идентификации и лежит в границах от 0,5 до 1,5, где 1 соответствует априорной вероятности 0,5 (которая присваивается производителям с нулем исследованных образцов), а 0,5 эффективно означает, что в случае обнаружения подлинного образца, он будет подвергнут максимуму исследований и проверке в ручном режиме.

Часть производителей с указанием их индексов доверия из текущей базы данных ИЛ «МОЛОКО» дана в табл. 5. Названия производителей не указаны из соображений конфиденциальности.

Здесь и далее: A — подлинный продукт, B — продукт с нарушениями ж/к состава, C — продукт с прочими нарушениями

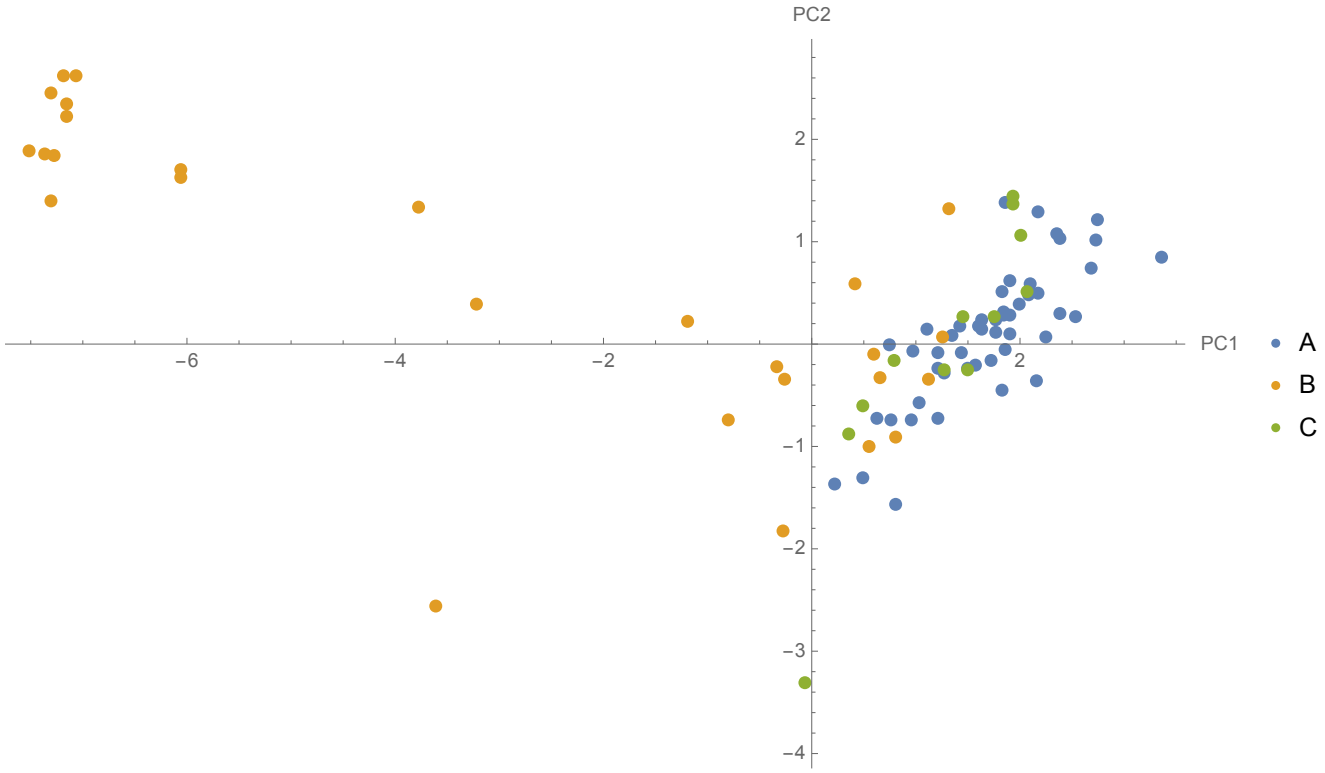


Рис. 16. Анализ главных компонент жирнокислотного состава исследованных образцов молока

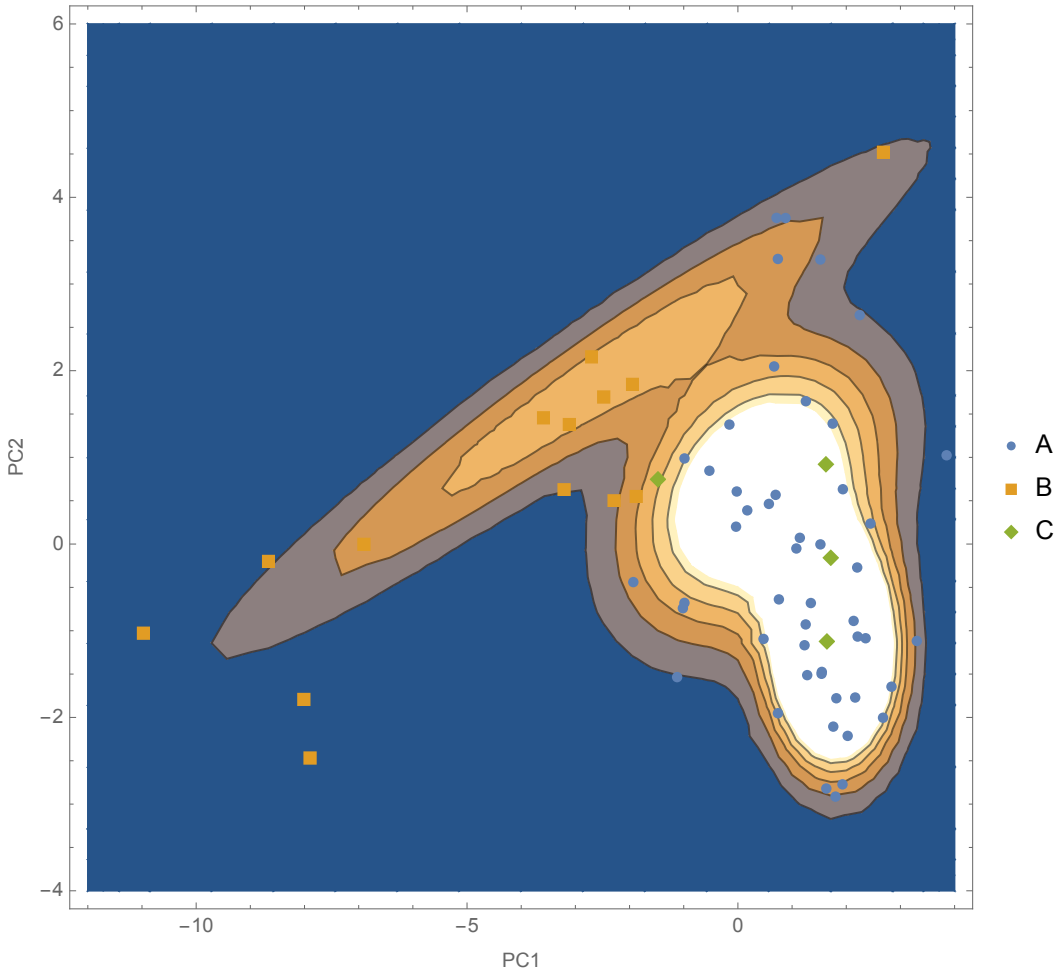


Рис. 17. Использование гауссовской смешанной модели для идентификации кластерных различий жирнокислотного состава исследованных образцов масла

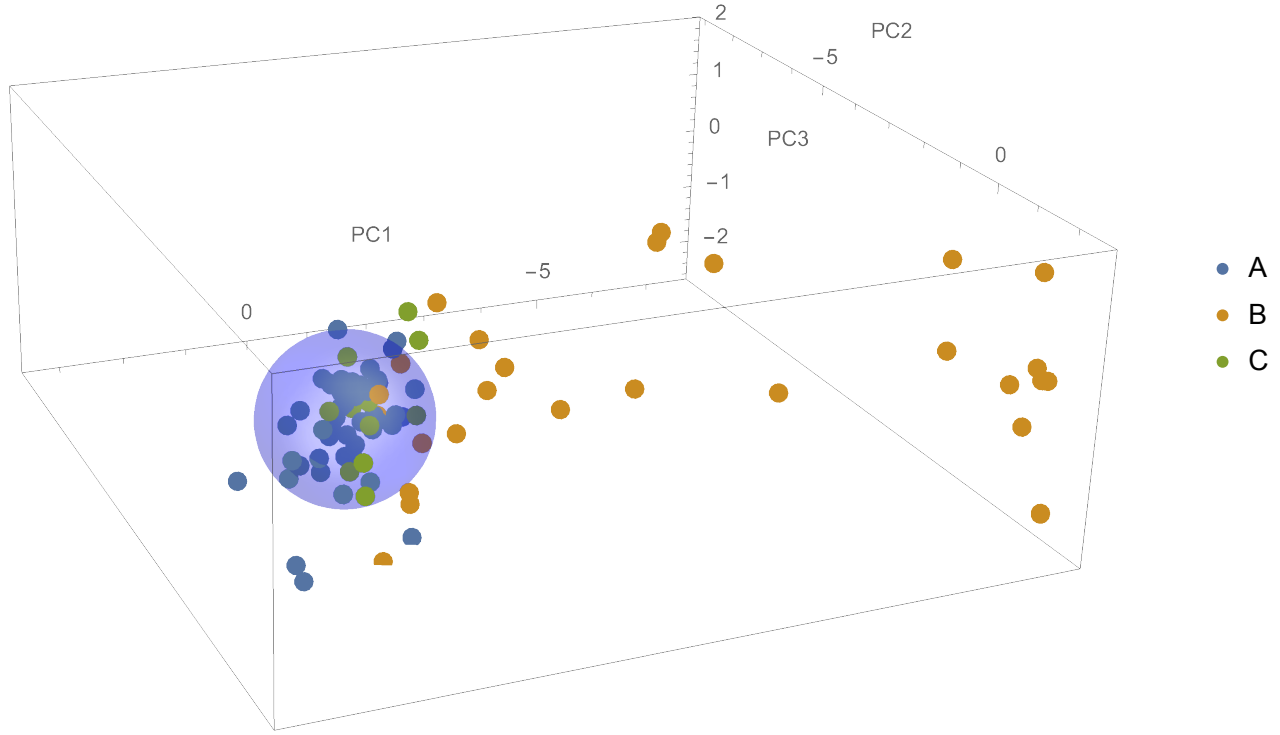


Рис. 18. Анализ главных компонент исследованных образцов молока с указанием доверительного эллипсоида подлинных образцов

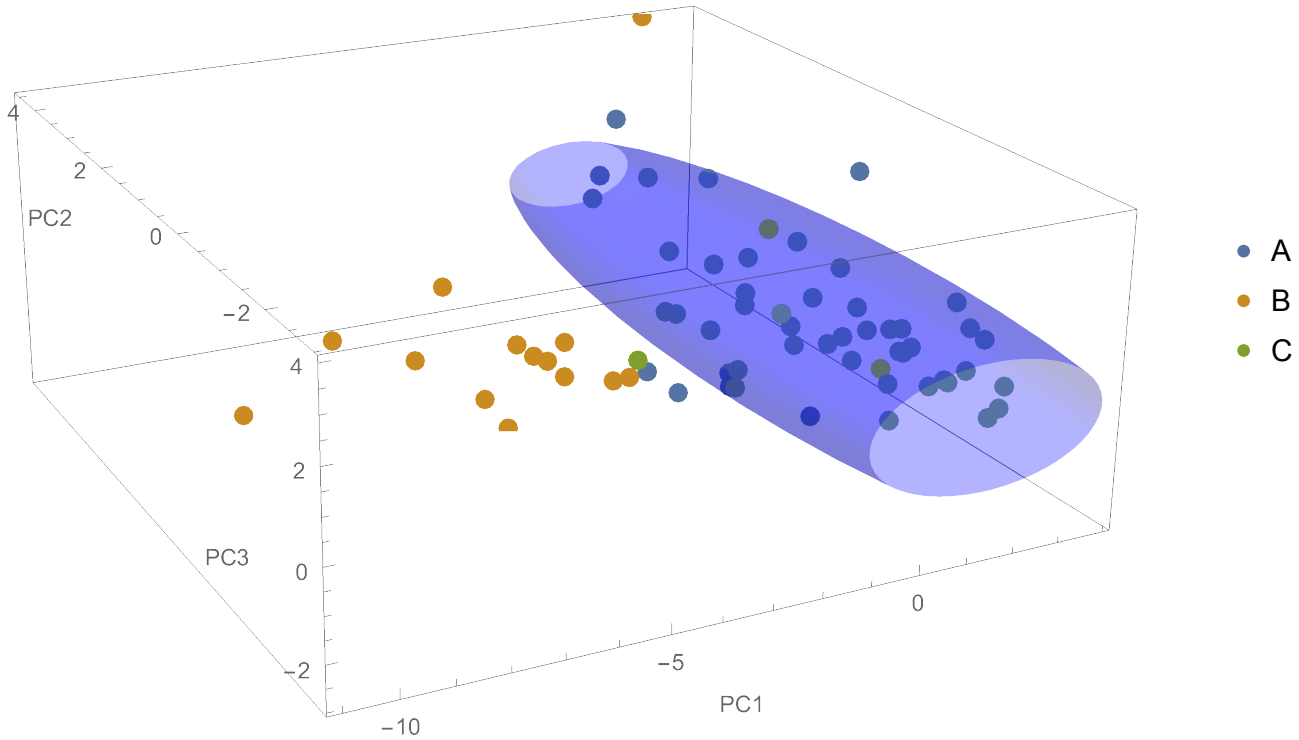


Рис. 19. Анализ главных компонент исследованных образцов масла с указанием доверительного эллипсоида подлинных образцов

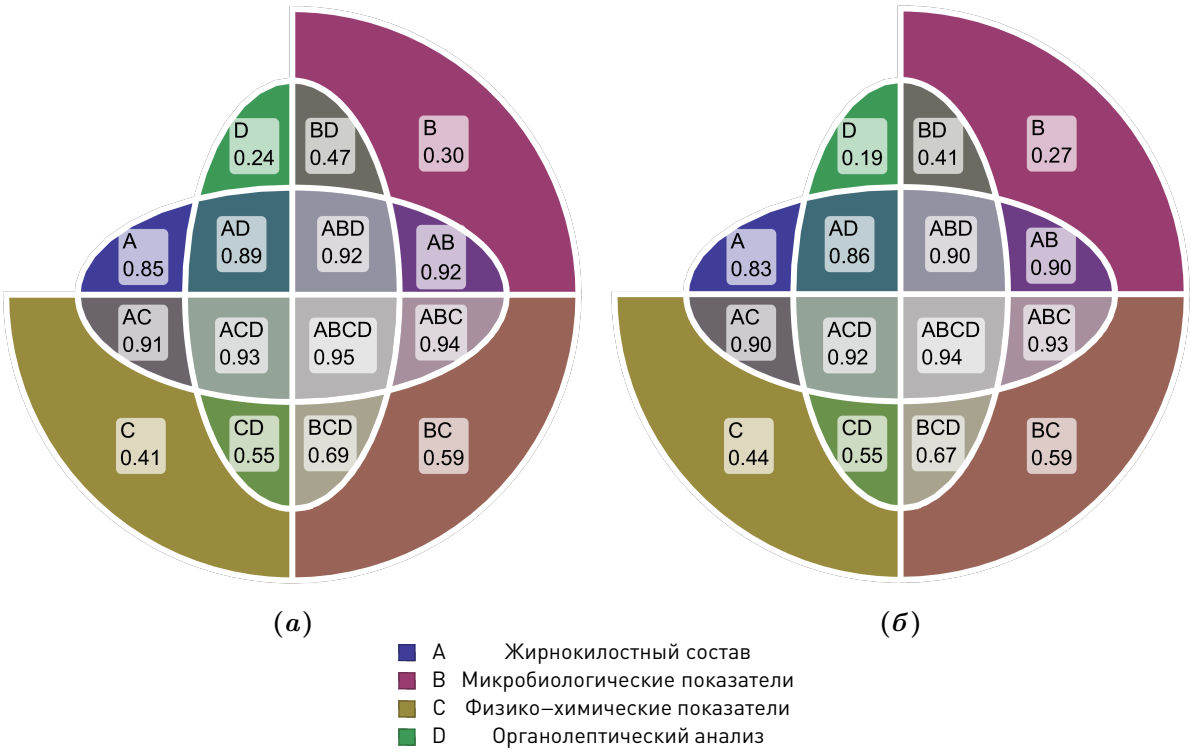


Рис. 20. Визуализация достоверности классификации подлинности при комбинации анализов различных характеристик продукта для (а) молока, (б) масла

Совместно с отделом стандартизации ВНИМИ разработан новый формат электронного стандарта организации, инкорпорирующий разработанный идентификационный алгоритм.

В цифровом СТО заложен цифрой профиль продукта, вся необходимая для производства продукта документация, регулярно обновляемая в соответствии с законодательными изменениями, интерактивные программные модули, позволяющие операторам, обращающимся к СТО, полностью рассчитывать свои технологические задачи, а также доступ к аналитической идентификационной базе контроля подлинности производимой продукции. Наполнение СТО представлено на рис. 21.

Таблица 5. Снимок базы данных производителей

№	Город	Образцы*			Индекс доверия
		С	В	Н	
Молоко					
1	Ижевск	6	1	2	1,02
2	Армавир	0	1	3	0,61
3	Торжок	1	0	3	0,71
4	Вологда	3	1	0	1,10
5	Москва	4	0	0	1,28
	...				
Масло					
1	Москва	8	0	0	1,34
2	Орел	3	1	0	1,12
3	Лобня	0	0	3	0,59
4	Воронеж	3	0	0	1,25
5	Москва	0	0	3	0,60
	...				

*указано кол–во исследованных образцов: С — соответствущих требованиям качества и безопасности; В — соответствующих, но выходящих за идентификационные интервалы; Н — не соответствующих

Цифровые стандарты организации на молоко питьевое ультрапастеризованное, масло сливочное расположены на сайте vnimi.org и распространяются в формате электронной подписки.

В седьмой главе осуществлена разработка программной поддержки по-

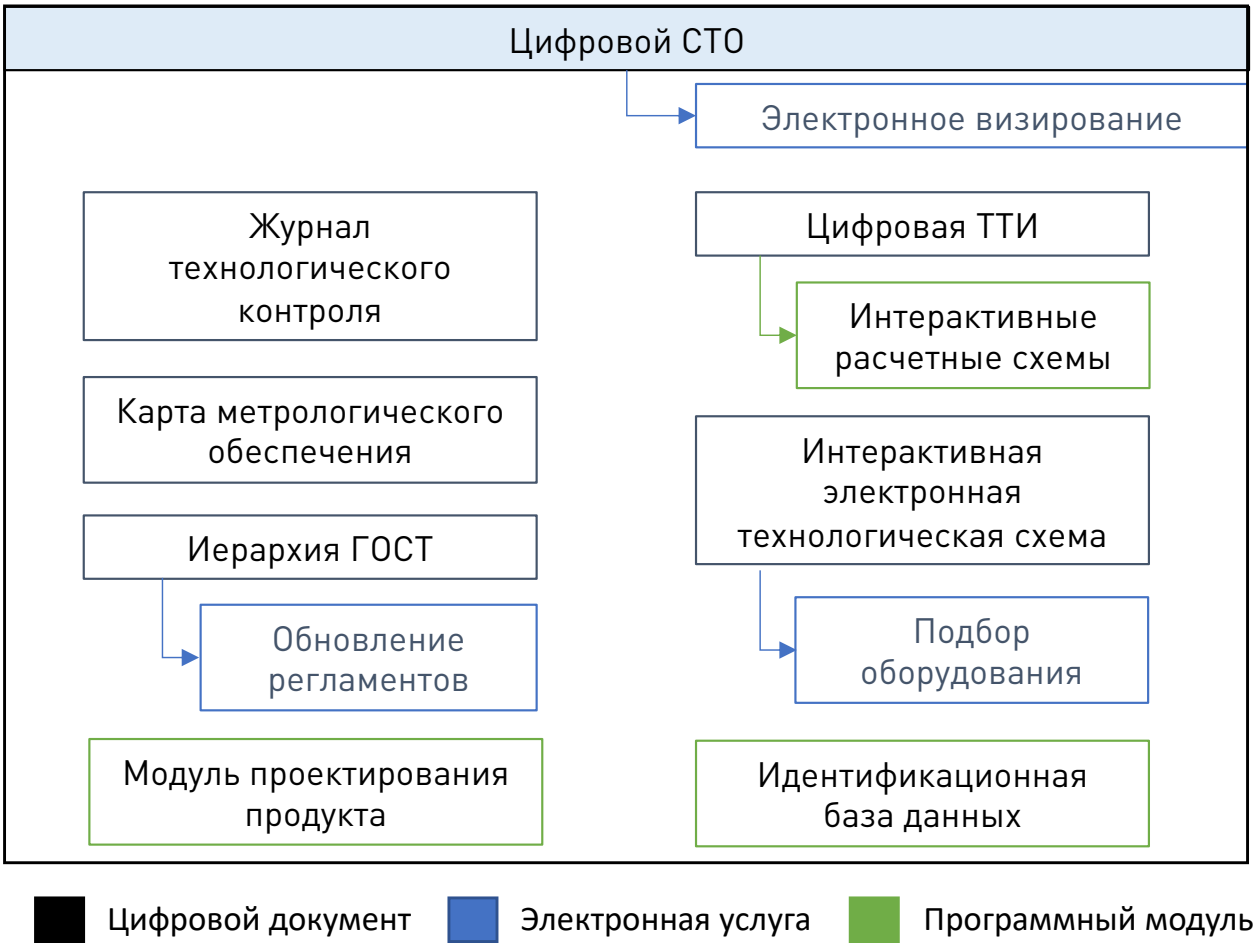


Рис. 21. Наполнение цифрового стандарта организации

строения идентификационных схем пищевых продуктов.

Для мониторинга за качеством пищевой продукции, а также для разработки новых линеек продуктов на основе базового пищевого полуфабриката, был создан программный комплекс, в который заложена логика аппарата базовых матриц. В комплекс входят: база данных эталонных матриц, а также их вариаций для групп однородной пищевой продукции, причем для каждой подлинной матрицы хранится с возможностью дополнения перечень идентификационных методик, позволяющих определять содержание того или иного компонента продукта; аналитический комплекс, включающий в себя базу данных всех отчетов об исследованиях для построения реальных подлинных матриц с учетом отклонений; интерфейс пользователя, позволяющий осуществлять мониторинг направлений фальсификации на основе потока поступающих данных. Интерфейс программы представлен на рис. 22.

Идентифицированы и решены вспомогательные задачи при построении дифференцирующих критериев пищевых систем с помощью программного комплекса, представленного в табл. 6, в который включены программы, защищенные свидетельствами о регистрации программ для ЭВМ, модули и виджеты. Все ПО предоставляется по модели as is.

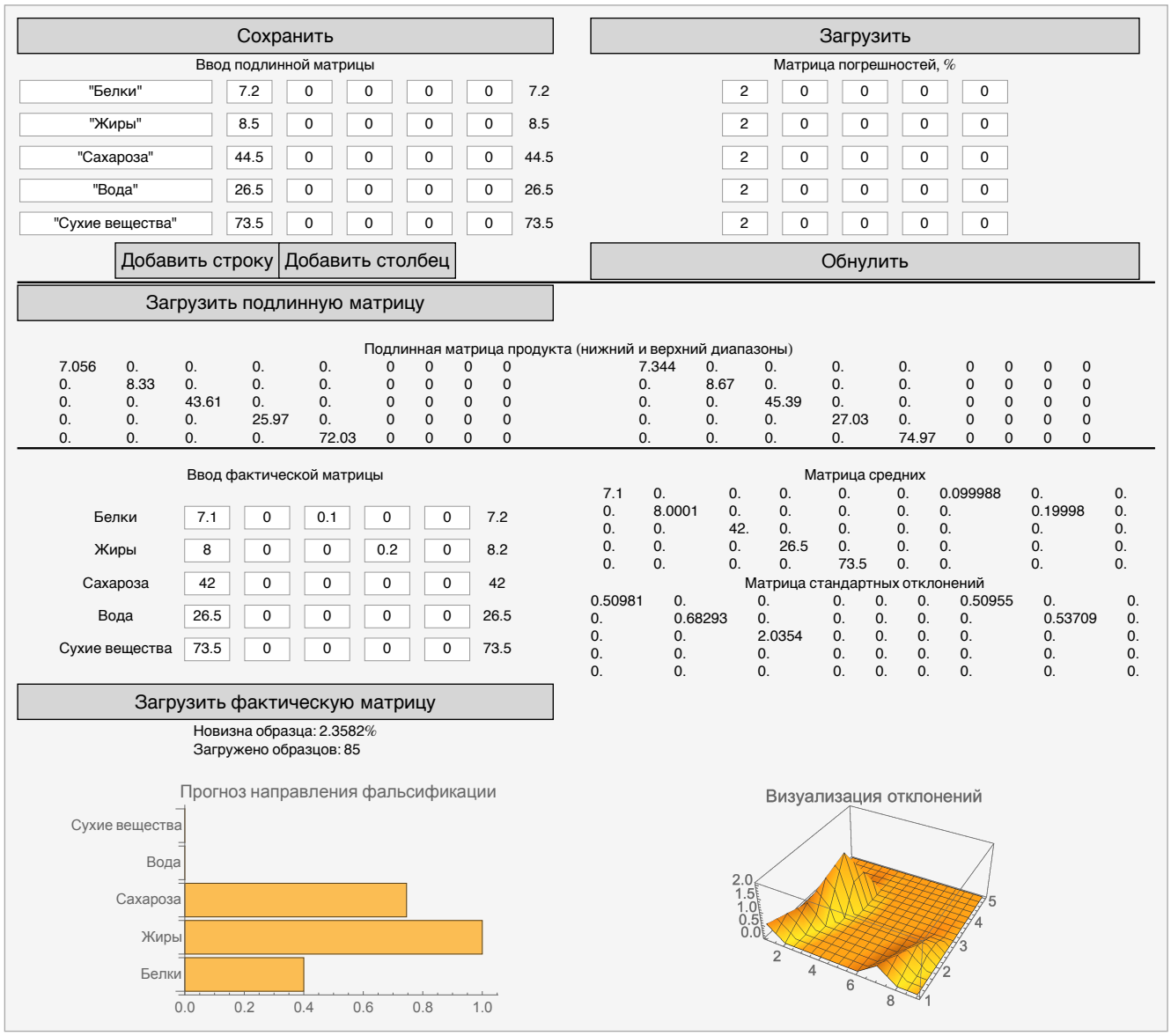
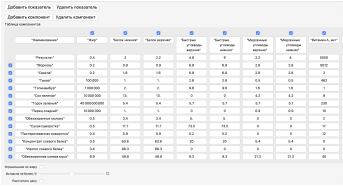
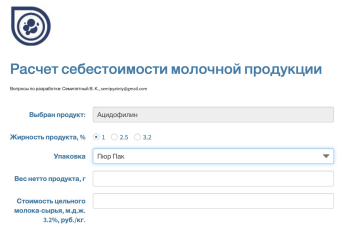


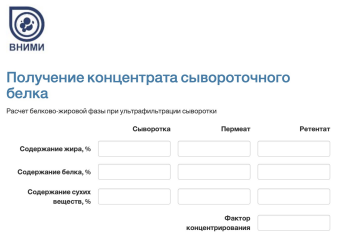
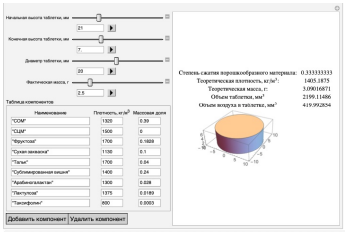
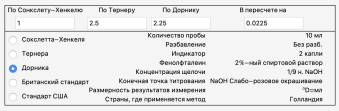
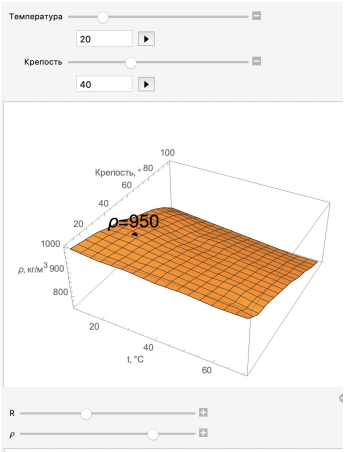
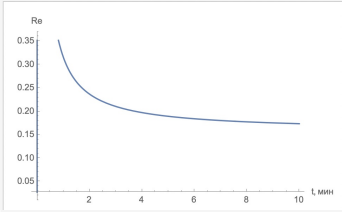
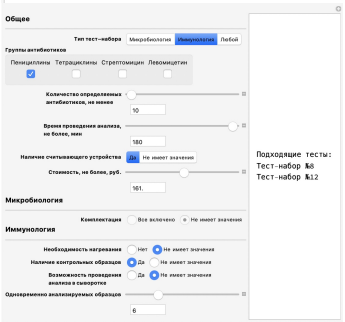
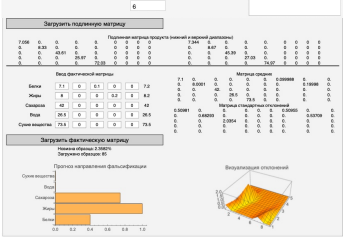
Рис. 22. Вид базовой программы многокритериальной идентификации продукта

Таблица 6. Описание пакета вспомогательных программ, используемых при построении и декомпозиции цифровых идентификационных профилей пищевых продуктов

Название и назначение	Вид	Ссылка на программу
Программа для моделирования и расчета рецептур поликомпонентных молочных, молокосодержащих и молочных составных продуктов с низкой, промежуточной и высокой влажностью		tinyurl.com/milkmodelprog
Расчет себестоимости молочной продукции		tinyurl.com/milkpriceprog

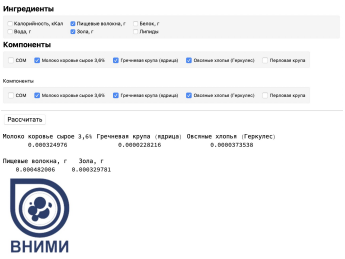
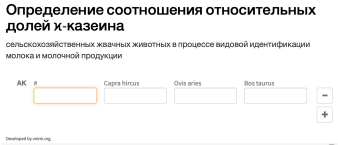
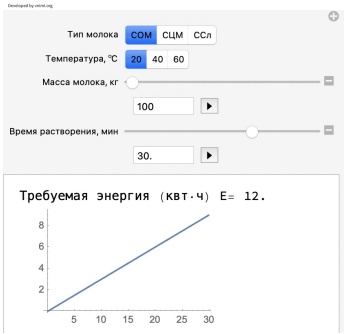
Продолжение на следующей странице

Таблица 6 – *Продолжение*

Название и назначение	**Вид**	**Ссылка на программу**
Расчет параметров фракционирования для молока, творога и концентрата сывороточного белка		tinyurl.com/separationprog tinyurl.com/tvorogprog tinyurl.com/ksbprog
Программа для проектирования параметров таблетированных продуктов на молочной основе		tinyurl.com/tabletprog
Программа–конвертер для пересчета различных единиц измерения кислотности молочных продуктов		tinyurl.com/convertprog
Программа для расчета плотности водно-спиртовых растворов в зависимости от их крепости и температуры		tinyurl.com/waterspiritprog
Программа для определения режимов течения в системе частица–жидкость при отсутствии внешнего воздействия		tinyurl.com/regimesprog
Выбор оптимального тест–набора для определения наличия антибиотиков в молоке и молочных продуктах		tinyurl.com/immuneprog
Программа для многокритериальной идентификации продукта		tinyurl.com/matrixprog

Продолжение на следующей странице

Таблица 6 – *Продолжение*

Название и назначение	**Вид**	**Ссылка на программу**
Программа для определения оптимальной рецептуры по целевому нутриентному составу функционального продукта		tinyurl.com/nutrientsprog
Программа для проектирования цельномолочных продуктов повышенной биологической ценности		tinyurl.com/biodesignprog
Программа для видовой идентификации молока и молочной продукции		tinyurl.com/allelesprog
Программа для расчета количества энергии, используемой в процессе восстановления сухого молока		tinyurl.com/energyprog

Основные результаты и выводы

1. Применительно к пищевым системам разработана, научно обоснована и апробирована мета–информационная методология идентификации, и предложен алгоритм цифрового профилирования на примере молочных продуктов
2. В рамках анализа научно–информационного материала обобщены и систематизированы принципы и современные решения в области идентификации, прослеживаемости и управления технологическими процессами применительно к пищевым системам, инвариантные относительно происхождения сырья. Детализируя все этапы жизненного цикла продукции от получения сырья до реализации в торговых сетях с точки зрения цифровой методологии к идентификации качественных и количественных характеристик, установлено несоответствие между традиционными схемами

мониторинга и фактическим уровнем развития технологий пищевых продуктов. Доказана приоритетность применения мета–аналитического континуального подхода относительно традиционных хемометрических идентификационных методов, склонных к несистематизированности и использованию частных решений.

3. Для классификации пищевых продуктов и мониторинга качества обосновано применение выпуклого объединения агрегированных характеристических нечетких функций, а также кластеризационного анализа данных для построения критериев дифференциации различных групп пищевой продукции. На базе единой методологии Agile–разработки использована современная итерация модели вероятностного классификатора, дающая обоснование для сокращения факторного пространства критериальной оценки, обеспечивающей прослеживаемость качества и безопасности пищевых систем.

4. Разработан универсальный логико-понятийный аппарат иерархического конструирования групп однородной пищевой продукции для оптимизации работы в рамках глобальных пищевых систем. Отвечая современным вызовам пищевой промышленности, модифицирована модель продукта в цифровом поле, включающая в себя кортеж метаданных, который является неотъемлемым атрибутом современного продукта, так как фактически несет в себе информацию относительно других групп продукции, базу данных идентификационных методик и аналитические данные. Установлено, что корректно спроектированный цифровой идентификационный профиль пищевого продукта должен соответствовать ряду критериев, в частности, предопределяющих его структуру и расположение в мета–информационном пространстве. Создан методологический аппарат базовых матриц, объединяющий рецептурные, технологические и мета–аналитические аспекты цифрового профилирования пищевых продуктов. Используя данную методологию, удалось конкретизировать уровень перехода качества в иерархии от подлинного до фальсифицированного продукта. Обобщенная модель технологии производства пищевого продукта была представлена в виде ориентированной сети, являющейся иерархической структурой технологической цепочки от сырья и полуфабриката до группы однородной готовой продукции. Доказано, что матричное представление рецептуры и последовательности технологических операторов обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционным представлением в качестве вектора состава.

5. Обосновано применение регрессионной модели пищевого продукта при реализации кластеризационных методик при дифференциации по многомерным критериям. Было продемонстрировано разделение молока и ряженки по жирнокислотному составу с использованием расстояния Махаланобиса. Универсальность подхода также продемонстрирована на растительном

сырье.

6. Впервые введено понятие идентификационного расстояния пищевых продуктов для реализации иерархического дифференцирования. Представлены графы дифференцирования по критериям кислотности, цветности, видовому составу микрофлоры и вкусовой идентичности национальных кисломолочных продуктов

7. Формализован математический аппарат моделирования состава пищевого продукта на основе базовых матриц и в соответствии с ним модифицирован метод генетического программирования для оптимизации процессов расчета сбалансированных поликомпонентных систем с произвольными ограничениями на состав и целевую функцию. Даны оптимальные значения параметров генетического алгоритма для расчета семейства рецептур на основе базового сырьевого компонента.

8. Получены комплексные результаты в пищевой отрасли в виде многокритериальной системы принятия решений, позволяющие эффективно ранжировать пищевые продукты по качеству и безопасности, и, в случае нарушений и привлечения арбитражных органов, дифференцировать административное воздействие на контрагентов пищевой промышленности.

9. Предложена для пищевых систем робастная иерархическая дифференцирующая схема, основанная на родстве типовых идентификационных признаков базовых матриц, использующая попарную кластеризационную методику на основе смешанной гауссовской модели, направленная на уменьшения количества аналитических методик. При этом точность полученных моделей при тестировании слепых образцов для молока ультрапастеризованного составила 100 %, а чувствительность 88 %, соответственно.

10. Для мониторинга качества пищевой продукции, а также для разработки новых линеек продуктов на основе базового пищевого полуфабриката, был создан программный комплекс, в который заложена логика аппарата базовых матриц.

11. Создан и интегрирован в единую динамическую обновляемую систему мета–информационного цифрового профиля пищевого продукта комплекс программных продуктов из 13 программ по идеологии Open Source, доступных в облачной вычислительной среде. Полученные результаты прошли апробацию в ИЛ «МОЛОКО», ИЦ ВНИИТеК. Цифровой профиль, оформленный в новом формате электронного СТО и распространяемый по системе Software as a Service (SaaS) на молоко питьевое пастеризованное и масло сливочное, передан и используется в 12 организациях.

Список трудов, опубликованных по материалам диссертации

Монографии

1. *Семипятный В. К.* Идентификация пищевых продуктов. Цифровые мета–информационные решения / В. К. Семипятный. — М. : ВНИМИ, 2021. — 131 с. — ISBN 978-5-6043854–8-7. DOI: 10.37442/978-5-6043854-8-7
2. Теория и практика молочно–консервного производства / А. Г. Галстян, А. Н. Петров, И. А. Радаева, С. Н. Туровская, В. В. Червецов, Е. Е. Илларионова, В. К. Семипятный. — М. : Издательский дом «Федотов Д. А.», 2016. — 181 с. — ISBN 978-5-9908238-7-7
3. Планирование и анализ результатов технологических экспериментов / Е. А. Фетисов, В. К. Семипятный, А. Н. Петров, А. Г. Галстян. — М. : ВНИМИ, 2015. — 98 с. — ISBN 978-5-906565-21-1

Статьи в журналах, индексируемых в WoS/Scopus

4. Methodological approaches to DNA authentication of foods, wines and raw materials for their production / A. G. Galstyan, V. K. Semipyatniy, I. Y. Mikhailova, K. K. Gilmanov, A. V. Bigaeva, R. R. Vafin // Foods. — 2021. — Т. 10, № 3. — DOI: 10.3390/foods10030595
5. Elements of DNA–technology forming quality and safe raw materials / K. K. Gilmanov, S. V. Tyulkin, R. R. Vafin, A. G. Galstyan, A. E. Ryabova, V. K. Semipyatny, S. A. Khurshudyan, N. S. Pryanichnikova // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. — 2020. — Т. 5, № 443. — С. 54—62. — DOI: 10.32014/2020.2518-170x.104
6. Multi–criteria food products identification by fuzzy logic methods / L. A. Oganesyants, V. K. Semipyatniy, A. G. Galstyan, R. R. Vafin, S. A. Khurshudyan, A. E. Ryabova // Foods and Raw Materials. — 2020. — Т. 8, № 1. — С. 12—19. — DOI: 10.21603/2308-4057-2020-1-12-19
7. Raw materials identification and manufactured products authentication technologies / R. R. Vafin, I. Y. Mikhailova, V. K. Semipyatny, K. K. Gilmanov, A. V. Bigaeva, E. G. Lazareva // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series chemistry and technology. — 2020. — Т. 6, № 444. — С. 119—126. — DOI: 10.32014/2020.2518-1491.106
8. *Галстян А. Г.* Идентификация виноматериалов с защищенным наименованием места происхождения с применением кластерного анализа / А. Г. Галстян, С. А. Хуршудян, В. К. Семипятный // Вопросы питания. — 2020. — Т. 89, № 5. — С. 119—126. — DOI: 10.24411/0042-8833-2020-10072
9. DNA authentication of brewery products: Basic principles and methodological approaches / L. A. Oganesyants, R. R. Vafin, A. G. Galstyan, A. E. Ryabova, S. A. Khurshudyan, V. K. Semipyatniy // Foods and Raw Materials. — 2019. — Т. 7, № 2. — С. 364—374. — DOI: 10.21603/2308-4057-2019-2-364-374
10. Effects of critical fluctuations of storage temperature on the quality of dry dairy product / A. G. Galstyan, A. N. Petrov, E. E. Illarionova, V. K. Semipyatniy, S. N. Turovskaya, A. E. Ryabova, S. A. Khurshudyan, R. R. Vafin, I. A. Radaeva // Journal of Dairy Science. — 2019. — Т. 102, № 12. — С. 10779—10789. — DOI: 10.3168/jds.2019-17229
11. Ensuring the stability of white grape wines taste characteristics with use of products based on polyvinylpolypyrrolidone / A. L. Panasyuk, E. I. Kuzmina, O. S. Egorova, V. K. Semipyatny, D. E. Nurmukhanbetova // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. — 2019. — Т. 2, № 434. — С. 174—180. — DOI: 10.32014/2019.2518-170x.52

12. Technological additives as an element of dry milk properties directed formation / A. G. Galstyan, S. N. Turovskaya, A. E. Ryabova, E. E. Illarionova, V. K. Semipyatniy, I. A. Radaeva, A. N. Petrov, D. E. Nurmukhanbetova, E. K. Assembayeva // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. — 2019. — Т. 4, № 436. — С. 95—102. — DOI: 10.32014/2019.2518-170x.102
13. Base matrices — Invariant digital identifiers of food products / L. A. Oganesyants, S. A. Khurshudyan, A. G. Galstyan, V. K. Semipyatny, A. E. Ryabova, R. R. Vafin, D. E. Nurmukhanbetova, E. K. Assembayeva // NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. — 2018. — Т. 6. — С. 6—15. — DOI: 10.32014/2018.2518-170X.30
14. Prospects for DNA authentication in wine production monitoring / L. A. Oganesyants, R. R. Vafin, A. G. Galstyan, V. K. Semipyatniy, S. A. Khurshudyan, A. E. Ryabova // Foods and Raw Materials. — 2018. — Т. 6, № 2. — С. 438—448. — DOI: 10.21603/2308-4057-2018-2-438-448
15. Indicators of quality of canned milk: Russian and international priorities / A. N. Petrov, A. G. Galstyan, I. A. Radaeva, S. N. Turovskaya, E. E. Illarionov, V. K. Semipyatniy, S. A. Khurshudyan, L. M. DuBuske, L. N. Krikunova // Foods and Raw Materials. — 2017. — Т. 5, № 2. — С. 151—161. — DOI: 10.21603/2308-4057-2017-2-151-161
16. *Galstyan A. G.* Theoretical backgrounds for enhancement of dry milk dissolution process: Mathematical modeling of the system «solid particles — liquid» / A. G. Galstyan, A. N. Petrov, V. K. Semipyatniy // Foods and Raw Materials. — 2016. — Т. 4, № 1. — С. 102—109. — DOI: 10.21179/2308-4057-2016-1-102-109

Статьи в журналах, рецензируемых ВАК

17. *Блиадзе В. Г.* Расчет параметров фракционирования / В. Г. Блиадзе, В. К. Семипятный, А. В. Бигаева // Молочная промышленность. — 2020. — № 8. — С. 32—35
18. Молекулярно–генетический метод анализа — путь повышения качества вина / В. К. Семипятный, Р. Р. Вафин, И. Ю. Михайлова, Е. Г. Лазарева // Пиво и напитки. — 2020. — № 3. — С. 37—39. — DOI: 10.24411/2072-9650-2020-10028
19. Прогнозирование качества игристого вина на основе определения дополнительных показателей физико-химического состава исходного виноматериала / Е. В. Дубинина, Л. А. Оганесянц, В. А. Песчанская, В. К. Семипятный, А. А. Чистова // Пиво и напитки. — 2020. — № 1. — С. 9—13. — DOI: 10.24411/2072-9650-2020-10010
20. Применение оптических анализаторов в практике контроля качества сырья и пищевых продуктов / С. А. Хуршудян, В. К. Семипятный, А. Е. Рябова, И. Ю. Михайлова, Е. Е. Илларионова // Пищевая промышленность. — 2019. — № 3. — С. 22—25
21. Экспериментальный критерий оценки энергоэффективности процессов растворения в пищевой промышленности / В. К. Семипятный, С. А. Хуршудян, А. Е. Рябова, Р. Р. Вафин, А. Н. Петров // Пиво и напитки. — 2019. — № 1. — С. 32—36
22. Мониторинг качества молочных продуктов / С. А. Хуршудян, А. Е. Рябова, Р. Р. Вафин, В. К. Семипятный, И. Ю. Михайлова // Молочная промышленность. — 2018. — № 11. — С. 23—24
23. Оптимизация экспериментального моделирования новых рецептур напитков методами математической статистики / В. К. Семипятный, А. Е. Рябова, О. С. Егорова, Р. Р. Вафин // Пиво и напитки. — 2018. — № 3. — С. 48—51
24. *Рябова А. Е.* Совершенствование методологии оценки консистенции продуктов, склонных к спонтанной кристаллизации сахаров / А. Е. Рябова, С. А. Хуршудян, В. К. Семипятный // Пищевая промышленность. — 2018. — № 12. — С. 74—76
25. Требования к сухому молоку для производства продуктов детского питания / И. А. Радаева, Е. Е. Илларионова, С. Н. Туровская, В. К. Семипятный // Молочная промышленность. — 2018. — № 5. — С. 53—55

26. Особенности минерального состава донских вин и виноматериалов как идентификационный показатель места происхождения / Р. П. Точилина, С. А. Гончарова, Е. В. Хорошева, В. К. Семипятный // Виноделие и виноградарство. — 2016. — № 3. — С. 14—17

Публикации в материалах конференций и журналах, индексируемых в РИНЦ

27. DNA authentication technologies for product quality monitoring in the wine industry / E. G. Lazareva, K. K. Gilmanov, A. V. Bigaeva, I. Y. Mikhailova, V. K. Semipyatny, R. R. Vafin // Food systems. — 2021. — Т. 3, № 4. — С. 11—14. — DOI: 10.21323/2618-9771-2020-3-4-11-14
28. Results designing and analysis when introducing new beverage identification criteria / I. I. Ageikina, E. G. Lazareva, I. Y. Mikhailova, V. K. Semipyatny // Food systems. — 2020. — Т. 3, № 3. — С. 4—7. — DOI: 10.21323/2618-9771-2020-3-3-4-7
29. *Рябова А. Е.* Инстантный напиток — перспективная форма пищевого продукта / А. Е. Рябова, В. К. Семипятный // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. — 2020. — С. 469—474. — DOI: 10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-469-474
30. *Семипятный В. К.* К вопросу автоматизации проектирования готовых рецептур продуктов из СМС / В. К. Семипятный, М. Н. Стрижко, Е. Е. Илларионова // Переработка молока. — 2020. — № 2. — С. 84—87. — DOI: 10.33465/2222-5455-2020-02-84-86
31. Water microelement composition influence on the efficiency of the milk powder dissolution process / S. N. Turovskaya, A. N. Petrov, I. A. Radaeva, E. E. Illarionova, V. K. Semipyatniy, A. E. Ryabova // Food systems. — 2019. — Т. 2, № 1. — С. 9—15. — DOI: 10.21323/2618-9771-2019-2-1-9-15
32. Водоподготовка в ликероводочной промышленности / И. Ю. Михайлова, И. И. Агейкина, В. К. Семипятный, М. Н. Стрижко // Инновационные процессы в пищевых технологиях: наука и практика. Материалы Международной научно–практической конференции. — 2019. — С. 250—256
33. *Илларионова Е. Е.* Молочные напитки: новые горизонты идентификации / Е. Е. Илларионова, И. Ю. Михайлова, В. К. Семипятный // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2019. — С. 120—122. — DOI: 10.21323/978-5-6043128-4-1-2019-3-120-122
34. К вопросу зависимости эффективности процесса гидратации сухого молока от качества пищевой воды / И. А. Радаева, Е. Е. Илларионова, С. Н. Туровская, В. К. Семипятный, А. Е. Рябова // Переработка молока. — 2019. — № 10. — С. 62—65. — DOI: 10.33465/2222-5455-2019-10-62-65
35. К вопросу создания сухих молочных основ с БАД для производства функциональных напитков / М. А. Шекунц, В. К. Семипятный, А. Е. Рябова, И. И. Агейкина // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2019. — С. 242—244. — DOI: 10.21323/978-5-6043128-4-1-2019-3-242-244
36. *Семипятный В. К.* Методология композиционной идентификации пищевых продуктов / В. К. Семипятный // Перспективные исследования и новые подходы к производству и переработке сельскохозяйственного сырья и продуктов питания. Сборник научных трудов XIII Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов организаций в сфере сельскохозяйственных наук. — 2019. — С. 301—304
37. Regularities of viscosity formation of condensed fat–free milk with sugar from heat treatment parameters / A. G. Galstyan, I. A. Radaeva, S. A. Khurshudyan, S. N. Turovskaya, V. K.

Semipyatniy, E. E. Illarionova // Food systems. — 2018. — Т. 1, № 1. — С. 13—18. — DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-1-13-18

38. Safety of canned milk as an integrated criterion of their technology effectiveness. Russian experience / S. N. Turovskaya, A. G. Galstyan, A. N. Petrov, I. A. Radaeva, E. E. Illarionova, V. K. Semipyatniy, S. A. Khurshudyan // Food systems. — 2018. — Т. 1, № 2. — С. 29—54. — DOI: 10.21323/2618-9771-2018-1-2-29-54
39. Исследование коагуляции белка в водно–спиртовых растворах / А. Е. Рябова, И. Ю. Михайлова, В. К. Семипятный, Е. Е. Илларионова // Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. — 2018. — С. 224—227
40. Исследование краевого угла смачивания в молочные водно–спиртовых эмульсиях / В. К. Семипятный, И. Ю. Михайлова, А. Е. Рябова, Е. Е. Илларионова // Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. — 2018. — С. 234—236
41. К вопросу расширения ассортимента сгущенных стерилизованных консервов / С. Н. Туровская, И. А. Радаева, Е. Е. Илларионова, А. Е. Рябова, В. К. Семипятный // Переработка молока. — 2018. — № 11. — С. 12—15
42. Особенности технологии сухих молочных напитков с плодово–ягодными наполнителями / С. Н. Туровская, И. А. Радаева, Е. Е. Илларионова, В. К. Семипятный // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2018. — С. 179—182
43. Перспективы аутентификации вин с использованием ДНК–маркеров / И. Ю. Михайлова, А. Е. Рябова, С. К. Семипятный, Е. Е. Илларионова // Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. — 2018. — С. 164—165
44. *Семипятный В. К.* Водоподготовка в технологиях пищевых продуктов / В. К. Семипятный // Научное обеспечение инновационных технологий производства и хранения сельскохозяйственной и пищевой продукции. Сборник материалов I Международной научно–практической конференции молодых ученых и аспирантов. — 2018. — С. 356—359
45. *Семипятный В. К.* Формирование научных основ мониторинга качества пищевых продуктов / В. К. Семипятный, Р. Р. Вафин // Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. — 2018. — С. 233—234
46. *Семипятный В. К.* Качество молочных напитков: проблемы, идентификация и мониторинг / В. К. Семипятный, Е. В. Колосова, М. И. Петренко // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2018. — С. 155—158
47. *Семипятный В. К.* К вопросу расчета оптимальных энергетических затрат процессов растворения в технологиях напитков / В. К. Семипятный, С. Н. Туровская, А. Б. Иразиханов // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2018. — С. 162—165
48. *Семипятный В. К.* Исследование экспоненциального члена уравнения скорости утопления частиц по закону Стокса / В. К. Семипятный, С. А. Хуршудян, А. Б. Иразиханов // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2018. — С. 159—161
49. *Галстян А. Г.* К вопросу о расширении области оценочных критериев качества пищевых продуктов / А. Г. Галстян, В. К. Семипятный // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2017. — С. 27—29
50. Конкурентоспособность отечественных сухих молочных продуктов / И. А. Радаева, Е. Е. Илларионова, С. Н. Туровская, В. К. Семипятный // Международная научно–практическая конференция, посвященная памяти Василия Матвеевича Горбатова. — 2017. — С. 280—283
51. *Семипятный В. К.* Молочные ликеры: состояние вопроса / В. К. Семипятный // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2017. — С. 112—114

52. *Семипятный В. К.* Водоподготовка — элемент технологий производства пищевых продуктов / В. К. Семипятный, С. Н. Туровская, Е. Е. Илларионова // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2017. — С. 110—111
53. *Хуршудян С. А.* Разработка технологий эмульсионных ликеров / С. А. Хуршудян, В. К. Семипятный // Актуальные вопросы индустрии напитков. — 2017. — С. 131—133
54. Аспекты оценки коэффициента однородности кристаллизации лактозы / С. Н. Туровская, А. Е. Рябова, В. К. Семипятный, А. Г. Галстян, А. Н. Петров // Переработка молока. — 2015. — № 7. — С. 42—43
55. *Галстян А. Г.* Алгоритм расчета теплового баланса процесса восстановления сухого молока / А. Г. Галстян, В. К. Семипятный, С. Н. Туровская // Современные достижения биотехнологии. Актуальные проблемы молочного дела. Материалы V Международной научно–практической конференции. — Северо–Кавказский федеральный университет. 2015. — С. 74—76
56. К вопросу об усовершенствовании математическго аппарата оценки коэффициента однородности кристаллов лактозы / А. Г. Галстян, С. Н. Туровская, И. А. Радаева, В. В. Карапетян, А. Е. Рябова, В. К. Семипятный // Научное обеспечение молочной промышленности микробиология, биотехнология, технология, контроль качества и безопасности. Сборник научных трудов. — Всероссийский научно–исследовательский институт молочной промышленности. 2015. — С. 30—35

Результаты интеллектуальной деятельности

57. Программа для определения идентификационного расстояния сортовой принадлежности в методиках генной аутентификации виноматериала : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Л. А. Оганесянц, В. К. Семипятный, Р. Р. Вафин, А. Е. Рябова, Е. Г. Лазарева, А. Г. Галстян. — № 2020612766 ; заявл. 03.03.2020
58. Программа для определения оптимальной рецептуры по целевому нутриентному составу функционального продукта : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Л. А. Оганесянц, В. К. Семипятный, А. Е. Рябова, И. И. Агейкина, К. А. Геворкян, А. Г. Галстян. — № 2020610588 ; заявл. 16.01.2020
59. Программа статистического анализа дискриминационных методик определения происхождения виноматериала : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Л. А. Оганесянц, В. К. Семипятный, А. Е. Рябова, С. А. Хуршудян, А. В. Бигаева, А. Г. Галстян, Д. В. Андриевская. — № 2019667561 ; заявл. 25.12.2019
60. Выбор оптимального тест-набора для определения наличия антибиотиков в молоке и молочных продуктах : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / З. Ю. Белякова, Н. С. Пряничникова, И. А. Макеева, В. К. Семипятный, Н. В. Стратонова. — № 2018618952 ; заявл. 31.05.2018
61. Программа для многокритериальной идентификации продукта : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / В. К. Семипятный, С. А. Хуршудян, С. Н. Туровская, З. Ю. Белякова, А. Е. Рябова, А. Г. Галстян. — № 2018662200 ; заявл. 01.10.2018
62. Программа для моделирования состава поликомпонентных продуктов : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / В. К. Семипятный, А. О. Евсюкова, И. А. Радаева, Е. Е. Илларионова, Н. С. Пряничникова, А. Г. Галстян. — № 2018660351 ; заявл. 22.08.2018
63. Программа для определения режимов течения в системе частица-жидкость при отсутствии внешнего воздействия : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / В. К. Семипятный, А. Г. Галстян, С. Н. Туровская, Н. С. Пряничникова. — № 2017662377 ; заявл. 03.08.2017

64. Программа для расчета времени отстаивания частиц в растворах с варьируемыми параметрами среды : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / А. Г. Галстян, В. К. Семипятный, Е. Е. Илларионова, З. Ю. Белякова. — № 2017662378 ; заявл. 03.08.2017
65. Программа для расчета скорости всплывания частиц в растворах с варьируемыми параметрами среды : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / В. К. Семипятный, А. Г. Галстян, И. А. Радаева, Н. С. Пряничникова. — № 2017662376 ; заявл. 03.08.2017
66. Программа для расчета объемно–концентрационных характеристик водно-спиртовых растворов с учетом эффекта контракции : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Л. А. Оганесянц, А. Г. Галстян, В. К. Семипятный. — № 2016616350 ; заявл. 11.04.2016
67. Программа для расчета плотности водно–спиртовых растворов в зависимости от их крепости и температуры : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / Л. А. Оганесянц, А. Г. Галстян, В. К. Семипятный. — № 2016660788 ; заявл. 11.04.2016
68. Программа для моделирования и расчета рецептур поликомпонентных молочных, молокосодержащих и молочных составных продуктов с низкой, промежуточной и высокой влажностью : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / А. Г. Галстян, В. К. Семипятный, С. Н. Туровская, В. В. Карапетян, Е. Е. Илларионова, Н. С. Пряничникова, Т. И. Маслова. — № 2015615088 ; заявл. 18.03.2015
69. Программа–конвертер для пересчета различных единиц измерения кислотности молочных продуктов : Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ / А. Г. Галстян, В. К. Семипятный, В. В. Червецов, И. А. Радаева, С. Н. Туровская. — № 2015615089 ; заявл. 05.03.2015

Список используемых терминов

- Компонент рецептуры — вещество, входящее в состав продукта, неразложимое на составляющие в рамках задачи проектирования;
- Ингредиент рецептуры — составное вещество, входящее в состав продукта;
- Базовый пищевой полуфабрикат — продукт, имеющий базовую матрицу, на основе которого в промышленных условиях изготавливается однородная группа пищевой продукции;
- Генетическое программирование — методология компьютерных наук, адаптирующая принципы биологического естественного отбора к реализации программ. Основы методологии изложены Джоном Холландом.