

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

*На правах рукописи*



**АКИМОВ Сергей Сергеевич**

**МЕТОД И АЛГОРИТМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ НА  
ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА БИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,  
статистика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Боровский Александр Сергеевич

Оренбург – 2024

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Исследование в области повышения эффективности биотехнических систем .....	11
1.1 Биотехническая система как частный случай стохастической системы.....	11
1.2 Анализ современных методов функционирования биотехнических систем и соответствующего программного обеспечения.....	14
1.3 Современные информационные технологии для обработки данных в системе формирования рациона питания.....	24
1.4 Степень разработанности темы исследования.....	30
1.5 Системный анализ процесса создания цифрового двойника биотехнической системы.....	34
1.6 Цель и задачи исследования.....	43
1.7 Выводы по первой главе.....	44
Глава 2. Методы анализа связей для реализации системы поддержки принятия решения при формировании рациона питания .....	45
2.1 Обоснование выбора метода анализа связей для проведения исследования ...	45
2.2 Обзор методов математического моделирования.....	47
2.3 Обзор методов статистической обработки данных .....	53
2.4 Обзор методов оценки эффективности предлагаемых мероприятий .....	59
2.5 Разработка концептуальной модель принятия решения для цифрового двойника биотехнической системы.....	61
2.6 Выводы по второй главе.....	64
Глава 3. Метод и алгоритмы оценки динамики межэлементных связей микроэлементов в цифровом двойнике биотехнической системы .....	65
3.1 Математическая модель оценки продуктивности с учетом нагруженности метаболизма и динамики межэлементных связей .....	65
3.2 Разработка метода и алгоритмов оценки динамики межэлементных связей ...	76

3.3 Разработка прототипа системы поддержки принятия решений для управления эффективностью функционирования биотехнической системы.....	92
3.4 Выводы по третьей главе.....	100
Глава 4. Экспериментальная проверка предлагаемого метода, алгоритмов и системы поддержки принятия решения.....	101
4.1 Разработка схемы эксперимента.....	101
4.2 Результат применения системы поддержки принятия решений в области управления эффективностью функционирования биотехнической системы.....	105
4.3 Выводы по четвертой главе.....	110
Заключение .....	111
Список литературы .....	116
Приложение А. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ .....	133

## Введение

**Актуальность темы.** В настоящее время в России действует пять государственных программ в области сельского хозяйства, три из которых напрямую связаны с молочным животноводством, что свидетельствует о важности данной отрасли для нашей страны. Кроме того, согласно Доктрине продовольственной безопасности, пороговое значение самообеспеченности для молока и молочных продуктов составляет 90%. Однако согласно данным Национального союза производителей молока это значение составляет 84,3% по итогам 2023 года.

Для решения задачи повышения самообеспеченности молочной продукцией необходима интенсификация молочного производства, чему способствуют современные информационные технологии. Поэтому на сегодняшний день назрела необходимость цифрового перехода к новому типу производства. Реализовать подобный переход помогает технология цифровых двойников биотехнических систем. Создание таких цифровых двойников позволит оперативно регулировать молочную продуктивность за счет управления биотехнической системой.

Один из способов управления биотехнической системой – регулирование кормовых добавок, которое позволяет корректировать микроэлементный статус. Микроэлементный статус – совокупность взаимосвязанных между собой ключевых элементов в живом организме, отвечающих за протекание физиологических процессов, в том числе за метаболизм. Одной из причин снижения удоев является высокая степень нагруженности метаболизма, под которой понимается состояние замедления метаболических реакций, вызванное избыточным накоплением тяжелых металлов и токсичных составляющих в биологическом организме.

С целью уменьшения нагруженности метаболизма необходимо приводить метаболические реакции к нормальному состоянию, что приводит к повышенной выработке молока. Для анализа степени нагруженности метаболизма часто применяется оценка микроэлементного статуса с помощью корреляционно-регрессионного анализа. Однако данный аппарат не учитывает динамику связей

между микроэлементами, что снижает достоверность результатов корреляционно-регрессионного анализа, приводит к снижению эффективности функционирования биотехнической системы и уменьшению производства молока.

Для увеличения производства молока необходимо разрабатывать и внедрять математические модели, призванные точно рассчитать необходимую концентрацию элементов, с учетом динамики их взаимосвязей для коррекции микроэлементного статуса при помощи кормовых добавок. Обширность расчетов и изменчивость ключевых параметров предполагает разработку специализированного программного обеспечения, которое, в силу ряда манипуляций, проводимых исключительно с участием человека, целесообразно выполнить в виде системы поддержки принятия решений.

Таким образом, актуальной задачей является создание цифрового двойника, включающего в себя систему поддержки принятия решений для управления функционированием биотехнической системы путем коррекции микроэлементного статуса с учетом динамики связей между ними.

**Степень разработанности темы исследования.** Научные разработки диссертационного исследования базируются на трудах российских и зарубежных авторов в области функционирования биотехнических систем, в том числе при помощи современных информационных технологий и цифровых двойников.

Управление молочным производством, различные информационные и инновационные системы, применяемые в области молочного производства, в том числе ЦД, рассматривали М.А. Ананьев, Ю.В. Ухтинская, Л.В. Антонов, А.Н. Анищенко, Г.А. Волкова, Ю.А. Иванов, В.К. Скоркин, П.И. Гриднев, Д.К. Ларкин, М.Ю. Кабулова, Э.И. Рехвиашвили, А.М. Козина, Л.П. Семкив, Т.Е. Маринченко, А.М. Седов, Н.А. Соколов, И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин, Е.М. Подольникова, А.О. Храмченкова, Н.М. Сурай, М.Г. Кудинова, Е.В. Уварова, Е.И. Жидких, А.М. Чекалдин, Г.Э. Шахназарян, P.B.M. Berentsen, P.J.M. Raedts, R.P.Rawnsley, A. Berman, P.J.C. White, S.C. Garcia, D.F. Chapman, G.R. Edwards, N. Lane. Результат анализа их трудов показывает недостаточное насыщение молочного производства современными системами управления на основе

коррекции микроэлементного статуса. Сказанное выше обуславливает проведение дальнейших разработок в области создания системы поддержки принятия решений для эффективного функционирования биотехнической системы.

**Объект исследования:** процесс управления биотехнической системой.

**Предмет исследования:** методы, модели и алгоритмы выявления эффективного управляющего воздействия в системе поддержки принятия решения.

**Цель и задачи исследования.** Цель работы – повышение эффективности функционирования биотехнической системы на основе применения цифрового двойника в системе поддержки принятия решения.

Задачи:

1. Разработать концептуальную модель принятия решения на основе цифрового двойника биотехнической системы с использованием микроэлементного статуса.

2. Разработать математическую модель эффективности функционирования биотехнической системы с учетом нагруженности метаболизма и динамики межэлементных связей.

3. Разработать метод и алгоритмы оценки динамики межэлементных связей, основанные на корреляционных плеядах, позволяющие определять неизвестные параметры модели оценки эффективности функционирования биотехнической системы.

4. Разработать прототип системы поддержки принятия решений для управления эффективностью функционирования биотехнической системы.

**Методы исследования.** В исследовании использованы методы системного анализа и анализа связей, в том числе: декомпозиция, позволяющая проанализировать процесс создания цифрового двойника как систему; кластерный анализ, определяющий кластеры для коррекции микроэлементного статуса в каждом из них; корреляционных плеяд, визуализирующих динамику связей микроэлементов; анализ иерархий, обеспечивающий выбор решения; корреляционное оценивание для выявления взаимных связей; регрессионное моделирование, необходимое для получения оценок модели; теория

алгоритмизации и разработки программного обеспечения, применяемые с целью разработки системы поддержки принятия решений; оценка экономической эффективности, обосновывающая выбранные решения.

**Область исследования.** Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п. 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

#### **Научная новизна исследования.**

1. Концептуальная модель цифрового двойника биотехнической системы, *отличающаяся* стохастическим описанием поведения микроэлементного статуса (соответствует пункту 2 паспорта специальности).

2. Разработанная математическая модель эффективности функционирования биотехнической системы *отличается* от известных тем, что ее основу составляет учет динамики взаимных связей между элементами, который обеспечивает прогнозирование их изменения, позволяет оценить трансформацию нагруженности метаболизма и степень продуктивности молочного производства (соответствует пункту 3 паспорта специальности).

3. Разработанные метод и алгоритмы оценивания динамики межэлементного взаимодействия в своей основе содержат оценку взаимных связей посредством корреляционных плеяд с постоянно изменяющейся силой взаимодействия между элементами, *отличающиеся* от других тем, что указанные изменения силы связи меняют отображение плеяды, позволяя фиксировать динамику изменения самих

связей и с применением логико-вероятностных методов осуществлять их коррекцию (соответствует пункту 4 паспорта специальности).

**Теоретическую значимость** имеют полученные в результате исследования методы повышения эффективности функционирования биотехнической системы, базирующиеся на исследовании микроэлементного статуса и степени нагруженности метаболизма, алгоритмическое обеспечение, построенное на основе полученного метода, и система поддержки принятия решений, призванная повышать молочную продуктивность.

**Практическая значимость.** Система поддержки принятия решений в области управления биотехнической системой может быть использована в деятельности любых фермерских хозяйств, при наличии возможности оценивать и корректировать микроэлементный статус биологического организма. Эффективность разработки подтверждена улучшением производительности группы животных из четырех молочных хозяйств – прирост удоев в экспериментальной группе уже через три месяца составил 22,4% по сравнению с количеством удоев до эксперимента.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Концептуальная модель принятия решений для цифрового двойника биотехнической системы, представляющая собой поэтапные действия, подкрепленные соответствующими данными и математическим аппаратом, выполняемые для повышения эффективности функционирования биотехнической системы путем изменения концентрации элементов, приводящей к оптимальному состоянию микроэлементного состава.

2. Математическая модель оценки эффективности функционирования биотехнической системы, основанная на взаимном влиянии микроэлементов и межэлементных связей, которая позволяет учесть динамику изменения корреляционных связей и за счет этого оценивать продуктивность производства молока.

3. Метод и алгоритмы оценки динамики межэлементных связей, основанные на расчете изменения микроэлементного состава, дающие возможность



спрогнозировать динамику изменения микроэлементов и на основе этого определить необходимую концентрацию добавок в рацион питания животных.

4. Прототип системы поддержки принятия решений для управления эффективностью функционирования биотехнической системы, основанный на построенных ранее модели эффективности и методе оценки динамики межэлементных связей и позволяющий увеличивать продуктивность производства молока.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты диссертационной работы представлены программным комплексом в виде программного продукта «Программа оценки динамики межэлементных связей микроэлементного состава организма «EDIC» для оценки и анализа продуктивности молочного производства. Результаты исследования являются актуальными для молочных животноводческих хозяйств.

**Личный вклад соискателя.** Все модели и алгоритмы, выносимые на защиту, а также реализующее их программное обеспечение разработаны лично автором. Постановка задач исследования, формулировка положений научной новизны, а также координация процесса экспериментальной проверки и апробации результатов исследования осуществлялись совместно с научным руководителем.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертации обсуждены и получили апробацию в статьях и выступлениях на международных и всероссийских научных конференциях: российская научно-практическая конференция с международным участием «Фундаментальные основы технологического развития сельского хозяйства» (24-25 октября 2019, Оренбург); IOP Conference Series: Earth and Environmental Science «The proceedings of the conference AgroCON-2019» (18-19 April 2019, Kurgan); Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference «Modern Management Trends and the Digital Economy: from Regional Development to Global Economic Growth» (MTDE 2020) «Advances in Economics, Business and Management Research» (16-17 April 2020, Yekaterinburg); XI международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (29-30 ноября

2021, Казань); IOP Conference Series: Earth and Environmental Science «International Conference on World Technological Trends in Agribusiness» (04-05 July 2021, Omsk); Международная научно-практическая конференция «Современные исследования и инновации в науке и технике» (2 декабря 2021, Москва); XII Международная научно-практическая конференция «Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки» (06 октября 2023 года, Москва), X Всероссийская конференция «Компьютерная интеграция производства и ИППИ-технологии» (18-19 ноября 2021, Оренбург); Всероссийская научно-методическая конференция (с международным участием) «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры» (26-27 января 2022 и 2023, Оренбург).

Диссертационная работа выполнена при поддержке гранта на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития 075-15-2024-550.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 4 в рецензируемых печатных изданиях, утвержденных ВАК России, 5 в издании Scopus и WoS, 1 монография, получены 2 свидетельства о регистрации прикладной программы «SMES» и «EDIC», получено 3 акта о внедрении результатов работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста, включая 48 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 127 наименований.

# **Глава 1. Исследование в области повышения эффективности биотехнических систем**

## **1.1 Биотехническая система как частный случай стохастической системы**

*Стохастическая система* – это система, в которых присутствуют изменения, имеющие случайный характер. С математической точки зрения, стохастическая система при любом входном сигнале выдает на выход некоторое распределение вероятностей, определенное в пространстве выходных сигналов.

В процессе изучения стохастических систем необходимо учесть, что взаимосвязи таких систем в обобщенном случае также представляют собой стохастические величины, которые могут в процессе работы системы случайно возникать, случайно нарушаться, а также менять направление и силу связи.

В настоящее время, в прикладных исследованиях в области управления стохастическими системами, выделяются две ключевые задачи:

- прямая задача – определение стохастических характеристик выходного сигнала при известных характеристиках входного сигнала;
- обратная задача – определение стохастических характеристик входного сигнала при известных характеристиках выходного сигнала.

Стохастические системы возникают в результате воздействия некой случайной составляющей на систему. Чаще всего стохастическое воздействие обеспечивается шумом, попадающим из источника либо вместе с входным сигналом, либо в произвольном месте системы, где возможно проникновение подобного шума. Источником шума могут быть самые разнообразные явления и процессы, которые, проникая в систему, оказывают воздействие на выходной сигнал, что заставляет корректировать сигнал управления посредством различных методов, чаще всего, при помощи фильтрации шумов.

Другим вариантом стохастического воздействия является взаимосвязь параметров, формирующих сигнал. В этом случае возмущение, затрагивающее одни параметры, через их связи оказывает воздействие и на другие, и таким образом, меняется запланированный отклик системы. В этом случае необходимо оценивать как параметры, так и связи между ними и формировать управляющий сигнал только с учетом взаимной увязки параметров в единую систему.

В настоящее время существует множество сфер для применения стохастических систем. Широко известно применение стохастических систем в аэрокосмической и робототехнической областях. При управлении техническими объектами стохастические системы реализуются в виде специальных устройств – регуляторов, призванных следить за состоянием системы во внешней среде и корректировать ее поведение посредством формирования управляющего сигнала. Немаловажным является, также применение теории стохастических систем для обработки информации в условиях помех, которые представляют собой случайный сигнал, влияющий на работу системы.

Стохастические системы широко применяются в экономических и финансовых системах при описании потребительского поведения, спроса и предложения, формирования цены. Такие системы применяются при исследовании физических явлений, в частности, при оценке влияния свойств ультрадисперсных частиц на общие характеристики материалов. Кроме того, данными системами описываются также биомедицинские и агропромышленные исследования, где случайное воздействие характеризуется связанностью параметров в биологических объектах живой природы. Реакция живых организмов на любые внешние воздействия представляет собой случайный отклик, который не подлежит прогнозированию детерминированными моделями.

*Биотехническая система* (БТС) представляет собой особый класс систем, которые образованы совокупностью технических и биологических элементов, образующих единое целое и связанных единым контуром управления. Любые технические, конструктивные и проектные решения должны преследовать цель максимального взаимодействия с биологическими элементами системы.

Современные БТС состоят из биологической и технической подсистем, которые имеет объединение в виде прямых и обратных связей, а также управляется общими алгоритмами управления.

Техническая подсистема служит для осуществления определенного вмешательства в контур управления биологической подсистемы. Чаще всего, подобное вмешательство представляет собой некое информационное воздействие, при котором осуществляется формирование сигналов, оказывающих влияние на те или иные элементы биологической подсистемы.

В настоящее время выделяют три основных типа биотехнических систем:

- эргатические системы, при которых роль звена управления осуществляется человеком, а система учитывает его биологические параметры;
- органические системы, которые строиваются непосредственно в живой организм, беря на себя часть биологических функций
- системы управления поведением, которые представляют собой комплексные системы, обеспечивающие управление целыми популяциями животных и отвечающие за достижение у них определенных показателей.

Процесс повышения производительности молочных животных путем формирования рациона питания, при условии проведения коррекции биологических показателей относится к вопросам управления БТС третьего типа. В этом случае рассматривается совокупность организмов, не являющихся строгими копиями друг другу, а потому можно говорить о неких усредненных значениях и показателях, а также о вероятности достижения тех или иных показателей. Иными словами, совокупность животных представляет собой вероятностную составляющую БТС, что соответствует определению стохастической системы.

Таким образом, в настоящее время существует большое количество сфер, представляющих собой стохастические системы, управление которыми необходимо осуществлять с учетом влияния случайной составляющей на выходной сигнал. В рамках данной работы выбрана биотехническая система для повышения производительности молочных животных путем формирования рациона питания, в которой совокупность животных представляет собой стохастическую систему.

## 1.2 Анализ современных методов функционирования биотехнических систем и соответствующего программного обеспечения

Одной из важнейших отраслей сельского хозяйства в нашей стране является молочное животноводство [103]. Данная отрасль характеризуется относительно длительной продолжительностью производственного цикла и низким уровнем приспособленности к условиям рынка [57]. В настоящее время в России действует пять государственных программ в области сельского хозяйства, три из которых напрямую связаны с молочным животноводством, что свидетельствует об актуальности данной отрасли для нашей страны.

Согласно Доктрине продовольственной безопасности (утверждена указом Президента РФ от 21.01.2020 г. № 20) [95], ключевая задача государства состоит в бесперебойном обеспечении населения продовольственными товарами. В ее положениях пороговое значение самообеспеченности для молока составляет 90%. Однако, по данным Национального союза производителей молока это значение составляет 84,3% по итогам 2023 года (рисунок 1.1) [20].

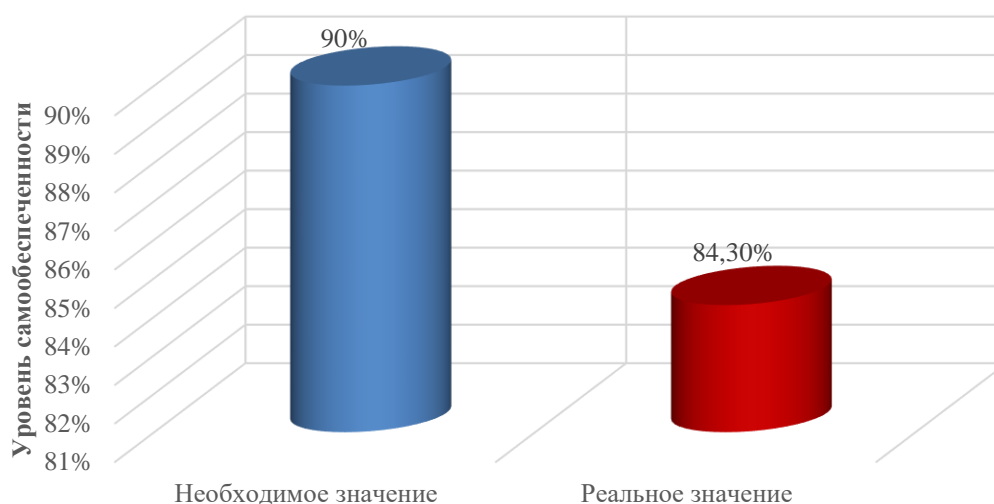


Рисунок 1.1 – Уровень достижения порогового значения самообеспеченности молока в России

Согласно проведенному литературному обзору, первопричина данной ситуации заключается в том, что для данной сферы разработано недостаточно интеллектуальных решений, способных повысить уровень производства молочной продукции [5, 14, 19, 43, 56, 94]. Большая часть работ указывает на прямую зависимость между внедряемыми интеллектуальными решениями и эффективностью функционирования биотехнической системы.

Под *эффективностью функционирования биотехнической системы* в данной работе подразумевается итоговый выход молока на конкретное животное [54]. Ключевым аспектом, оказывающим влияние на эффективность функционирования БТС, является рацион питания [23, 68, 73]. Поскольку продуктивность является в большей степени результатом питания животных, то основной упор для ее достижения необходимо делать на управление процессом формирования рациона питания, с целью повышения эффективности рациона.

Под *эффективностью рациона питания* в данной работе понимается такой его состав, чтоб продуктивность животного (в виде выхода молока) была бы максимальной. В этом случае, управлению подвергается не продуктивность как таковая, а рацион питания, коррекция которого приведет к росту продуктивности животного [60]. Таким образом, задача роста продуктивности сводится к достижению эффективности рациона питания.

Крупные хозяйства, обладающие большей материальной и научно-технической базой и, как следствие, большими возможностями, стараются наращивать продуктивность интенсивным путем, для чего прибегает к различным методам формирования рациона питания. Как правило, формально такие методы не выделяют, поскольку каждое конкретное предприятие может легко комбинировать рекомендации различных методов.

1. Нормативный метод – заключается в формировании рациона на основе комбинирования определенных кормов, сформулированных в нормах и правилах кормления [40]. Корма задаются в заданных пропорциях друг к другу [1, 18, 37].

2. Метод оценки питательности – при котором формирование рациона осуществляется взвешенной суммой питательных веществ, определенных заранее

в каждом корме, исходя из их стандартных параметров [15, 78]. Исследования данного метода нашли отражение в трудах различных авторов [67, 80, 81].

3. Метод оценки состава пищевой ценности – подразумевает отдельный учет пищевой ценности по белкам, жирам и углеводам; в соответствии с пищевой ценностью подбираются и сами корма. Данный метод широко освещался в различных трудах, посвященных молочному животноводству [13, 28, 57, 98]. Указанный метод лежит в основе данной работы, как наиболее распространенный.

Однако несмотря на то, что состав может быть подобран с высокой точностью, производительность животных не всегда оказывается высокой. Причины кроются в особенностях живых организмов, которые подвержены влиянию множества факторов, оказывающих влияние на продуктивность. Решение данной проблемы видится в дополнительных исследованиях в области питания животных и выявлении групп факторов, оказывающих значимое влияние на их продуктивность. Исследования в данной сфере [90], позволили выявить несколько дополнительных направлений в вопросах формирования рациона, регулирующих не сами корма, а кормовые добавки животных.

1. Степень усваиваемости кормов. Данное направление предполагает, что продуктивность снижается за счет плохого переваривания корма [39, 88, 118].

2. Состав аминокислот. Согласно данному методу, продуктивность молочного производства снижается из-за нарушения баланса аминокислот в организме животных [55, 65, 83].

3. Витаминный баланс. Наличие витаминов в нужном количестве необходимое условие для нормального функционирования любого организма, и нарушение данного правила влечет за собой снижение всех органических функций животных, в том числе и выработку молока [19, 103].

4. Микроэлементный состав (МЭС). В настоящее время для оценки внутреннего состояния различных живых организмов зачастую используют оценку показателей микроэлементного состава [54, 62]. Данный состав, как правило, определяется набором из 25-и элементов, оказывающих существенное влияние на организм [11, 69, 87].



Анализ всех направлений в области формирования рациона позволил сделать предположение, что наиболее перспективным в вопросах повышения эффективности рациона является именно МЭС, в виде наночастиц химических элементов. Особенностью использования МЭС в качестве индикатора продуктивности животных является тот факт, что поступление МЭС в организм гипотетически измеримо и контролируемо [59]. Предполагается, что существует такой МЭС системы «корма-животные-продуктивность», при котором продуктивность молочного скота является максимальной [7, 26].

Приведем обобщенную схему, учитывающую все современные методы формирования рациона питания животных в виде дерева событий (рисунок 1.2).

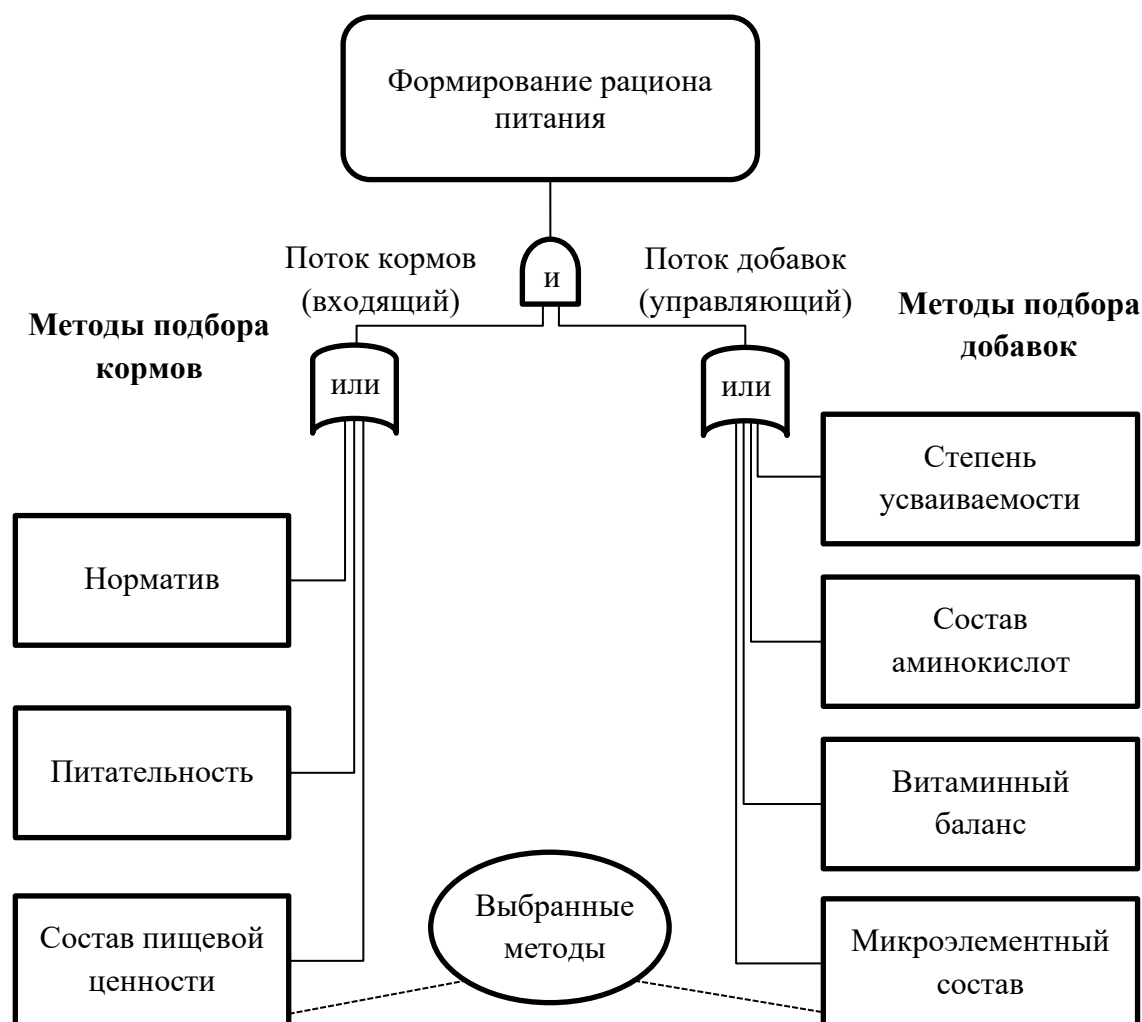


Рисунок 1.2 – Схема методов формирования рациона питания из кормов и добавок

В качестве ключевого способа формирования рациона выбран метод, определяющий состав пищевой ценности, который реализуется посредством различных нормативов и потому мало пригоден для выполнения функций управления биотехнической системой. В качестве метода для выбора кормовых добавок определен МЭС, управление которым посредством корректировки элементов в организме животных может позволить нарастить выпуск молока за счет подбора эффективного рациона, с точки зрения баланса элементов [24]. Регулирование кормовых добавок позволяет получить возможность управления эффективностью рациона питания.

Для реализации методов автоматизации процесса формирования рациона питания животных в настоящее время применяется ряд программного обеспечения (ПО), способного автоматизировать данный процесс. Приведем краткий обзор таких программ.

1. 1С: Цифровое животноводство. Оперативный учет и управление производством КРС.

Основное назначение данного программного продукта – оперативное управление животноводческим производством на предприятиях сектора АПК, связанные, в первую очередь, с разведением молочного крупного рогатого скота. Предлагаемые решения позволяют автоматизировать ряд процессов, в том числе планирование и контроль ключевых показателей, оперативный учет результатов выполнения задания в области зоотехники и ветеринарии, автоматизация работы с результатами кормления и доения, сбор статистики.

Программа направлена на обеспечение оперативного сбора и обработки поступающей технологической информации на месте, без необходимости обработки данных в другом месте. Имеется возможность подключения мобильного приложения для более оперативного контроля за работой. Технология позволяет учитывать каждое животное посредством создания цифровых двойников для более точного управленческого учета.

Внешний вид программы приведен на рисунке 1.3.

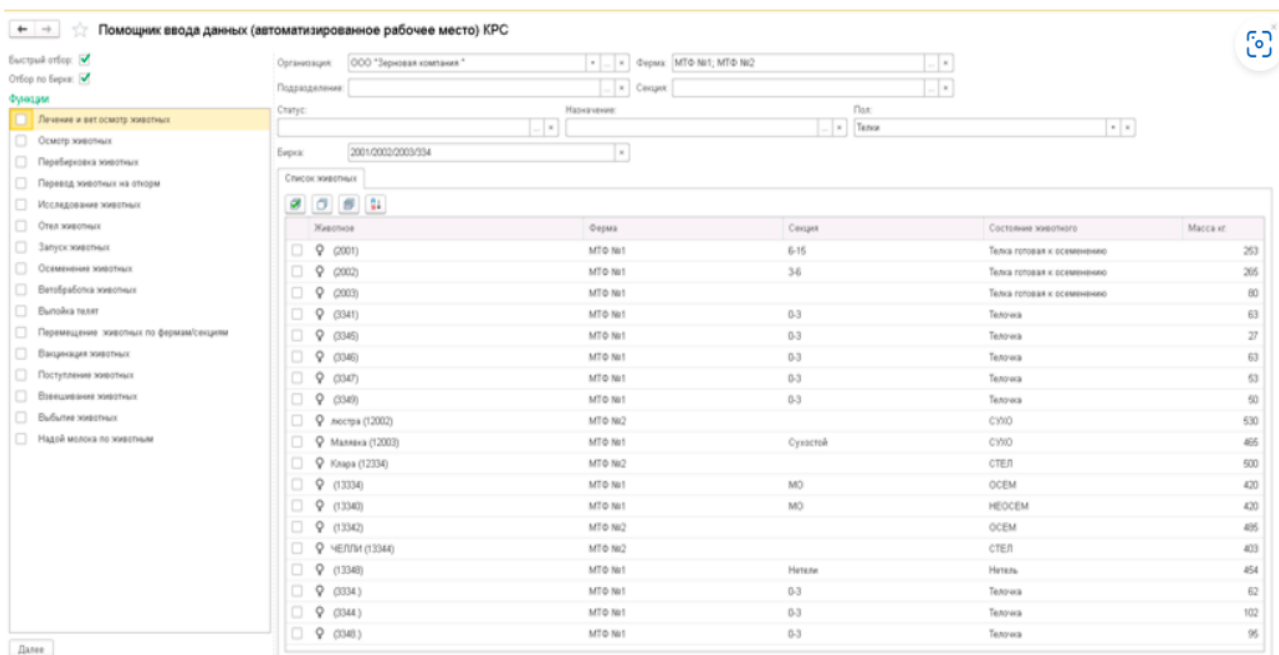


Рисунок 1.3 – Внешний вид программы «1С: Цифровое животноводство. Оперативный учет и управление производством. КРС»

## 2. Коралл.

Программа предназначена для формирования рационов питания животных, в том числе молочных, с возможностью коррекции рациона посредством кормовых добавок. В базах данных программы присутствуют готовые наборы рецептов, для каждого из которых представлено обоснование с точки зрения зоотехники и экономики. Вновь создаваемые рецепты можно записывать в базы данных для дальнейшего использования.

Возможности оптимизации рационов настраиваются по показателям прибыли или сбалансированности. При этом имеется возможность генерации семейства рационов, близких к исходным или вновь задаваемым.

В программе также предусмотрена возможность планирования кормовой базы. В программе формируются подготовленные заявки, затем анализируется обеспеченность данных заявок кормами в наличии, что позволяет сформировать базу кормления и рассчитать ее экономическую эффективность.

Внешний вид программы «Коралл» приведен на рисунке 1.4.

ЛАК 16бингр-летний от 2.08.12, ОАО Красный Октябрь. Расчет - Макс. сбалансированность

Рацион Структура рациона Примечания Исходные данные Производственное задание

по названию по группе

Состав	%	мин, кг	Масса	макс, кг	Стоимость, руб	МДж
Бобы кормовые	2.778	0.000	954.000 г	3.000	2.385	10.3
Ботва сахарной свёклы	1.132	0.000	388.800 г	12.000	0.156	0.5
Глютеиновый корм	0.288	0.000	99.000 г	1.500	0.069	1.1
Дерть ячменная	3.407	0.000	1.170 кг	5.000	3.767	12.3
Дикальцийфосфат	0.117	0.000	40.080 г	0.200	0.301	0.0
Зерно овса	0.283	0.000	97.200 г	3.000	0.544	0.9
Зерно ячменя	1.838	0.000	631.054 г	4.000	1.893	6.6
Кукуруза молочной спелости	0.734	0.000	252.000 г	3.000	0.302	0.5
Липрот	0.339	0.000	116.400 г	1.000	2.386	1.5
Меласса из свеклы	1.310	0.000	450.000 г	3.000	0.495	4.2
Отава естественного сенокоса	19.656	0.000	6.750 кг	45.000	4.725	17.6
Отруби пшеничные	4.630	0.000	1.590 кг	5.000	2.226	14.1
Патока кормовая	2.048	0.000	703.200 г	2.000	1.547	6.6
ПР-ЛАК 16бингр-летний 0.5%	0.500	0.000	171.707 г	0.687	2.962	0.0
Пшеница твердая	3.407	0.000	1.170 кг	5.000	4.446	12.5
Сенаж вико-овсяный	7.688	0.000	2.640 кг	40.000	5.544	10.0
Солома ячменная	5.119	0.000	1.758 кг	5.000	1.934	10.0
Трава злаковоразнотравного луга	37.040	0.000	12.720 кг	40.000	5.088	37.0
Трава тимopheевка	7.688	0.000	2.640 кг	40.000	1.056	8.6

влажность 52.31 % 34.34 кг 41.83 154.38

Корм Сбалансированность Питательность Компонент Эффективность Печать Семейство

Рисунок 1.4 – Внешний вид программы «Коралл»

3. Информационно-аналитическая система «СЕЛЭКС» – Молочный скот. Племенной учет в хозяйствах.

Данная информационно-аналитическая система предоставляет каждому пользователю возможность реализации полного замкнутого цикла информационной обработки, касающейся данных по молочным животным в хозяйстве любого размера. Данные накапливаются и обособляются в специализированных базах, позволяющих надежно хранить и оперативно извлекать данные для дальнейшего использования.

Помимо хранения данных, программа позволяет выполнять учет ключевых значений, расчет показателей продуктивности, формировать выписки и акты в установленных формах, планировать ветеринарные и зоотехнические мероприятия, а также осуществлять обмен данных с другими программными продуктами, в том числе стандартными офисными приложениями.

Внешний вид программы приведен на рисунке 1.5.

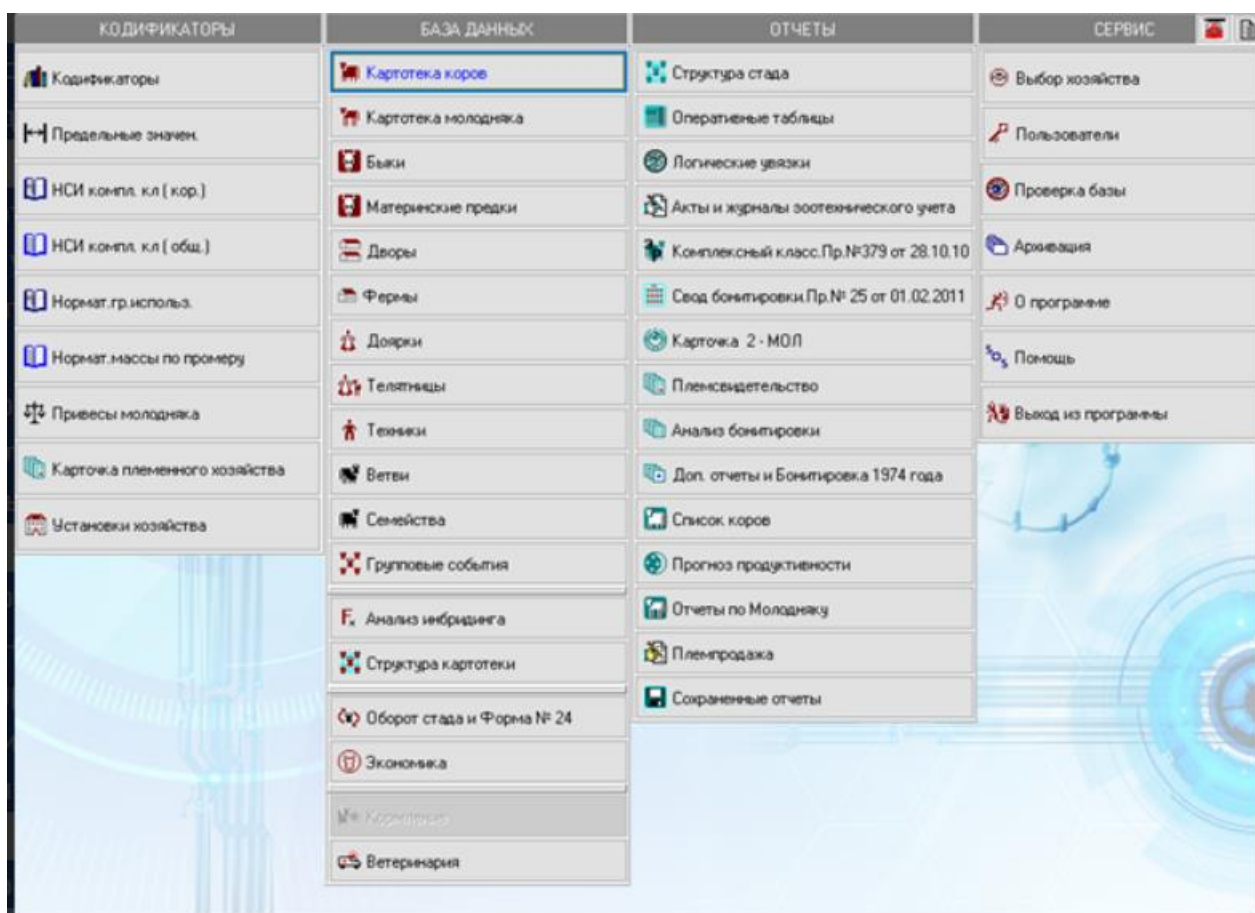


Рисунок 1.5 – Внешний вид программы «СЕЛЭКС» – Молочный скот. Племенной учет в хозяйствах»

#### 4. WinPas.

«WinPas» представляет собой программу для балансировки рецептов кормления животных, адаптированной под различные операционные системы.

Программа очень проста для управления и в обслуживании. Основная функция программы заключается в подготовки и балансировки рациона питания для животных широкого назначения. Кормовой рацион питания может включать как традиционные корма, так и концентраты, добавки, премиксы и т.д.

Функционал программы достаточно высок, что достигается посредством оптимизации многих функций и простого интерфейса. Программа не требует особой квалификации для операторов, она доступна для управления даже человеку, не знакомому с компьютерными технологиями.

Внешний вид программы «WinPas» приведен на рисунке 1.6.

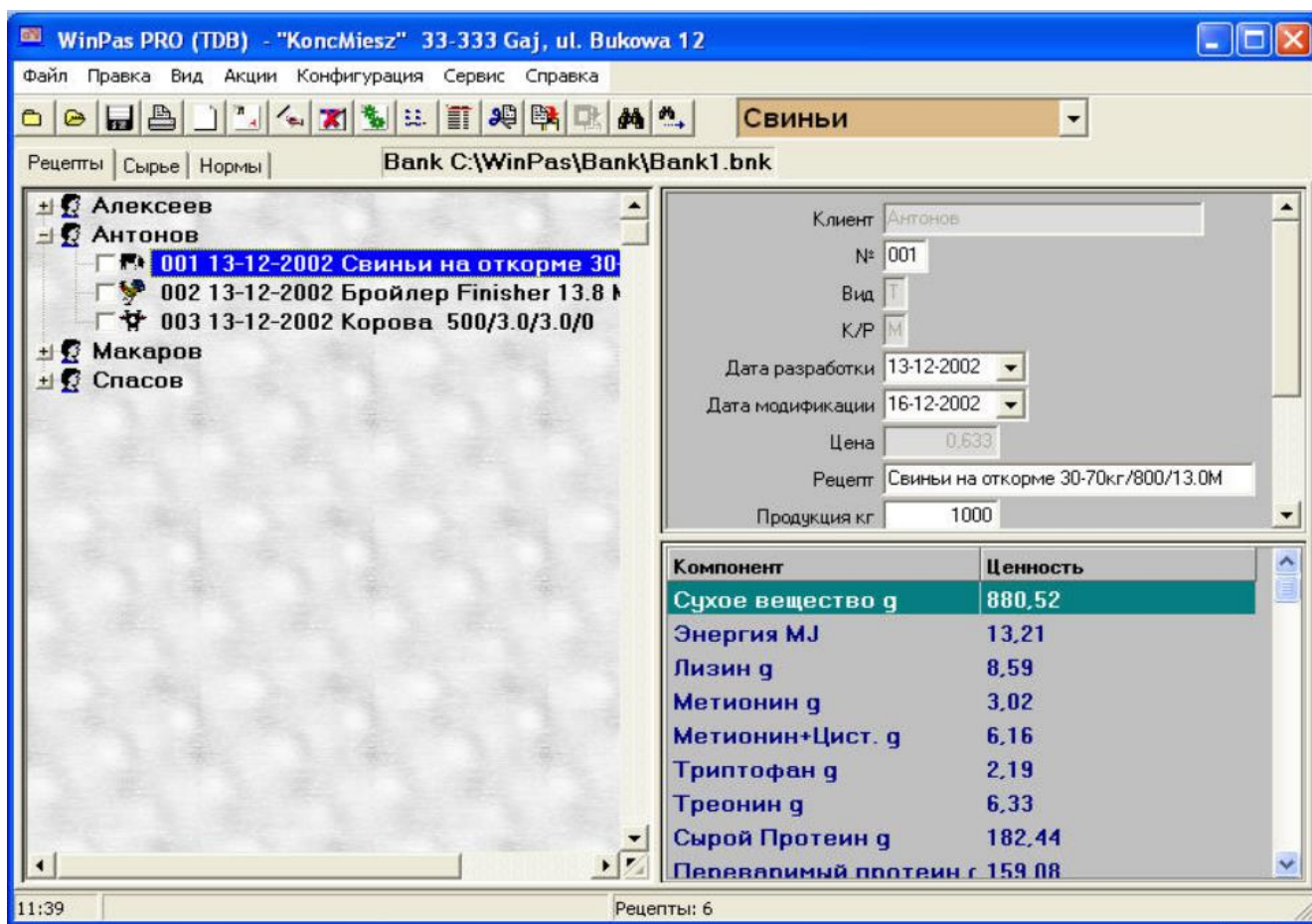


Рисунок 1.6 – Внешний вид программы «WinPas»

Для проведения сравнительного анализа указанного ПО проведем сопоставление. Для оценки рассматриваемых программ выбраны такие параметры как учет удоев, учета основных показателей, под которыми понимаются описательные данные животных – номер, кличка, размеры, возраст и т.д.; учет второстепенных показателей, под которыми понимаются результаты анализов переваримости, оценка аминокислотного и витаминного баланса, расчет показателей МЭС; возможность расчета рациона питания по вводимым данным; оценки предлагаемого рациона с точки зрения его эффективности; учет кормовых добавок в рационе, в том числе с расчетом питательного, витаминного и микроэлементного содержания; возможность формирования рекомендаций по рациону питания животных.

Все результаты занесены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Сопоставление различного ПО для формирования рациона питания по различным критериям

Критерии	1С: Цифровое животноводство	Коралл	СЕЛЭКС	WinPas
Учет удоев на животное	+	+	+	+
Учет основных показателей	+	+	+	+
Учет второстепенных показателей	–	–	+	–
Расчет рациона питания	+	+	–	+
Оценка эффективности рациона питания	–	+	–	–
Учет кормовых добавок	–	–	–	+
Формирование рекомендаций	–	–	–	–

Проведенный анализ показал, что выявленным критериям частично соответствуют только часть программных продуктов. Так второстепенные показатели учитывает только ПО «СЕЛЭКС», проведение оценки эффективности рациона предлагает только «Коралл», а кормовые добавки позволяет учесть только лишь «WinPas». Формирование рекомендаций для пользователя в плане выбор рациона не предполагает ни одно перечисленное ПО.

Все перечисленные программы позволяют формировать рацион, учитывать продуктивность, некоторые предлагают функции оптимизации затрат. Однако данные ПО ориентированы только на поступление питательных веществ, без учета дополнительных показателей, отображающих состояние животного. Потому необходима разработка собственного решения с возможностью формирования рекомендаций и основанный на учете МЭС животного, что проще всего реализовать в виде системы поддержки принятия решений.

Таким образом, в настоящее время имеются трудности в обеспечении продовольственной безопасности при производстве молока, которое зависит от эффективности рациона питания. Определено, что управляющее воздействие формируется за счет управления кормовыми добавками. Рассмотренные методы формирования рациона позволили выбрать коррекцию МЭС как основной метод для управления рационом питания.

### **1.3 Современные информационные технологии для обработки данных в системе формирования рациона питания**

Реализация задач, стоящих сегодня перед молочным животноводством, выполнимы только при наличии и использовании современных информационных технологий, способствующих применению передового математического аппарата для нужд цифровой трансформации АПК [2, 81].

Однако, для проведения цифровой трансформации необходимо обрабатывать достаточно большие массивы данных [80, 108]. Для этого требуется все данные об объекте сектора АПК переводить в цифровую плоскость, иначе говоря – создавать цифровую копию (ЦК) объектов АПК [93]. Внедрение специализированных алгоритмов анализа и систем интерпретации данных в ЦК, с целью получения объективной взвешенной оценки решения позволяют создавать новый перспективный продукт – цифровой двойник [43].

Согласно ГОСТ Р 57700.37-2021, утвержденному Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии №979-с от 16.09.2021 г. цифровой двойник (ЦД) – это виртуальная модель объекта, точно воспроизводящая форму и действия оригинала, с которым синхронизирована [32]. В зависимости от объекта, ЦД может принимать различную форму, от набора данных в базе, до визуальной модели объекта.

В рамках проводимых исследований [29, 66, 72, 92] определено, что ЦД является необходимым решением в области информационных технологий, которая может обеспечить цифровой переход сектора АПК и существенно повысить эффективность предприятий сельского хозяйства в самой ближайшей перспективе.

Применение ЦД позволяет экономить время и средства, с в случае использования его для сложных и дорогостоящих технических объектов, а также дает возможность избегать возможного вреда в случае работы с живыми системами на живой организм [25, 109]. Концепция ЦД возникла в результате изучения процессов управления жизненным циклом продукции. Автор данного термина, инженер М. Grieves [114], предполагал, что ЦД представляет собой



интегрированное сочетание физического объекта, виртуального объекта и объединяющих их потоков данных (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Визуальное представление цифрового двойника

Несмотря на то, что ЦД может создаваться для целого комплекса объектов (например, молочного комплекса, с глубокой цифровой проработкой всей инфраструктуры), наиболее перспективным видится создание ЦД для конкретных живых объектов – животных, обладающих набором характеристик, подлежащих оцифровке [84]. Объединение совокупности подобных ЦД дает возможность создавать на их основе более сложные модели, которые можно организовать в совокупности, отвечающие за целые животноводческие комплексы. В этом случае достигается более высокая детализация создаваемых комплексов, что приводит к получению более взвешенных и рациональных решений [77].

Другое преимущество – универсальность. Несмотря на естественные биологические различия, ЦД животного аккумулирует в себе все ключевые данные о нем и способно применяться к любому животному. Это резко отличает ЦД животных от ЦД молочных комплексов, которые имеют гораздо более уникальную структуру (разные размеры, систему функционирования и, как следствие, разные взаимосвязи) [71]. Данное обстоятельство не дает возможность создавать универсальные ЦД для животноводческих хозяйств, тогда как ЦД животного может быть универсализировано [27].

В современном понимании, ЦД животного состоит из двух основных составляющих – ЦК, представляющей собой базу данных, снятых определенным образом с живого объекта и аналитической системы, представленной, с учетом

особенностей реального объекта, как правило, системой интерпретации данных (рисунок 1.8).

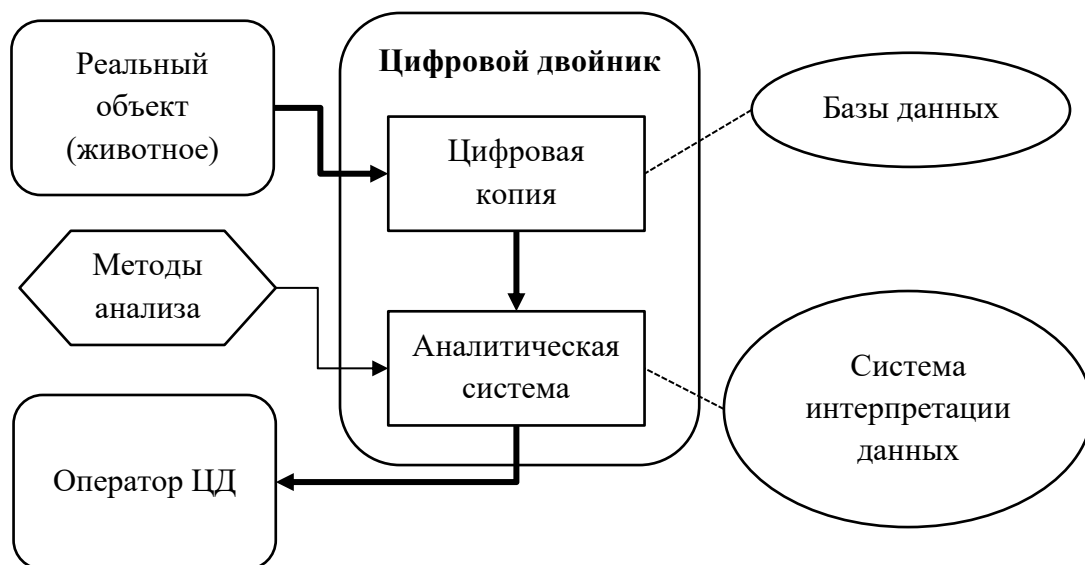


Рисунок 1.8 – Состав цифрового двойника реального объекта

Для оценки современного состояния проблемы разработки ЦД необходимо проанализировать данные, которые должны включаться в ЦК [53, 60]. Основой проблематики управления в рассматриваемой отрасли является бессистемность оперативной оценки показателей, описывающих конкретные характеристики состояния животных [39].

Указанные показатели нуждаются в анализе и корректировке для достижения эффективности работы предприятий молочной отрасли и продуктивности самих животных [34]. Важнейшим аспектом поставленной задачи является тот факт, что все показатели, собираемые в молочной отрасли, имеют сильно различающуюся природу, формат и принадлежность, что является сильнейшим затруднением для их сопоставления [15].

Поскольку задача, стоящая перед молочным животноводством, заключается в повышении производства молока, которое, в свою очередь, является отражением внутреннего состояния животных, то главенствующая роль отводится таким показателям, которые могли бы однозначно оценить такое состояние [64, 76, 104].

В предыдущих разделах было определено, что основными данными, которые необходимо рассматривать для повышения продуктивности молочного животноводства путем формирования эффективного рациона питания является МЭС животных.

Животное представляет собой сложную живую систему, с большим количеством различных внутренних показателей и связей с внешней средой [97]. Поскольку в рамках данного исследования основной упор делается на оценку влияния и корректировку МЭС, то необходимо выделить в животном именно те параметры и внешние воздействия, которые непосредственно участвуют в создании рассматриваемого цифрового двойника (рисунок 1.9).

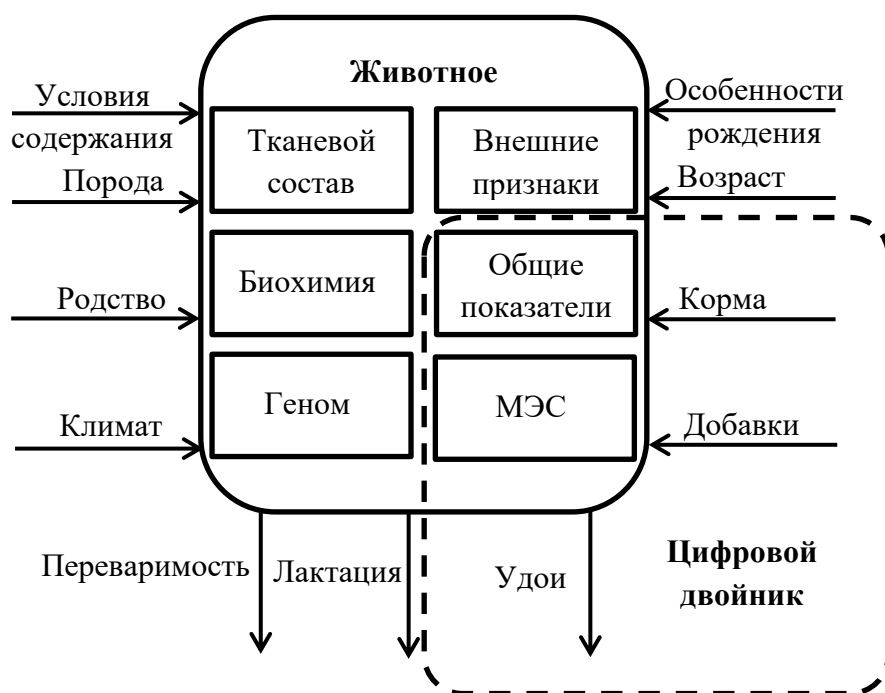


Рисунок 1.9 – Выбор параметров для создания цифрового двойника

Поскольку целью создания ЦД является не простой перенос данных на цифровой носитель, а возможность управления параметрами таким образом, чтоб добиться определенных показателей результирующих значений, то в рамках создания ЦД необходимо рассматривать создание аналитической системы интерпретации данных, базирующейся на реализации возможности управления параметрами объекта. Для реализации данной задачи необходимо все выделенные

на рисунке 1.9 параметры и потоки воздействия представить в виде стандартной схемы управления, с выделением входных и выходных данных, а также управляющего воздействия [38]. Результат создания подобной схемы для рассматриваемого ЦД приведен на рисунке 1.10.

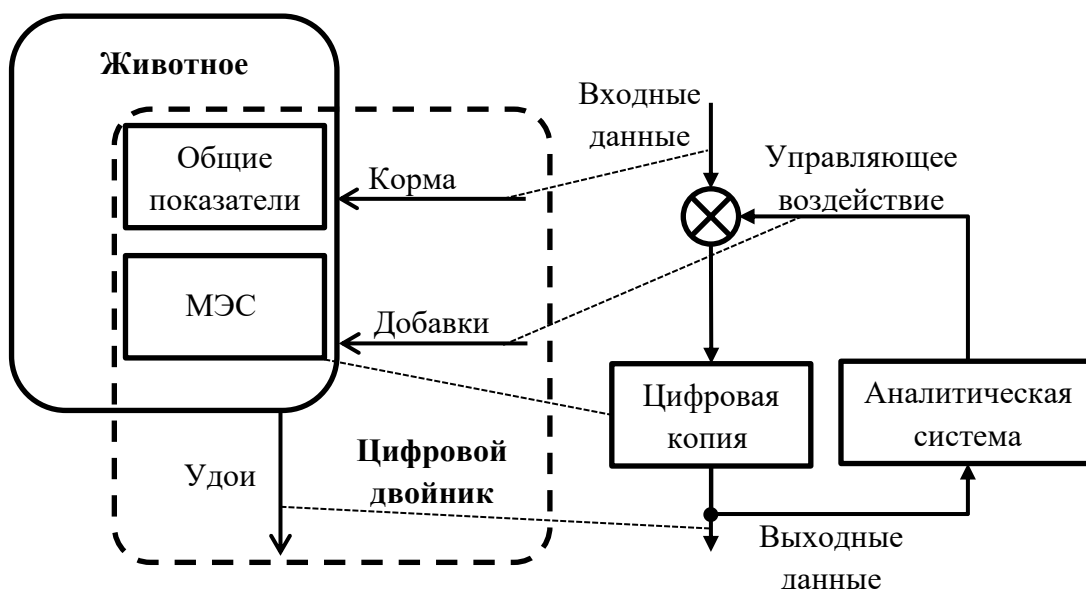


Рисунок 1.10 – Схема управления данными в цифровом двойнике

Разработка ЦК подразумевает оперативный перенос результатов исследований в виде данных на цифровые носители, а создание аналитической системы предполагает перспективное наличие у нее возможности сформировать такое управляющее воздействие, которое дало бы возможность увеличить показатели продуктивности, отображаемые в ЦД.

Создание системы автоматизированного управления предполагает создание ЦД БТС. Поскольку БТС включает в себя, помимо животного, еще и ряд технических подсистем и требует реализации различных операций (закупки корма и добавок, их загрузка в кормушки, манипуляторы доения, лабораторное оборудование и процесс забора анализов), которые не могут быть выполнены без участия человека, ее реализация в настоящих условиях может быть только в виде системы поддержки принятия решений (СППР) [122]. Для этого необходимо в

рамках ЦД создать аналитико-рекомендательную систему для формирования управляющего сигнала, передаваемого ЛПП (рисунок 1.11).

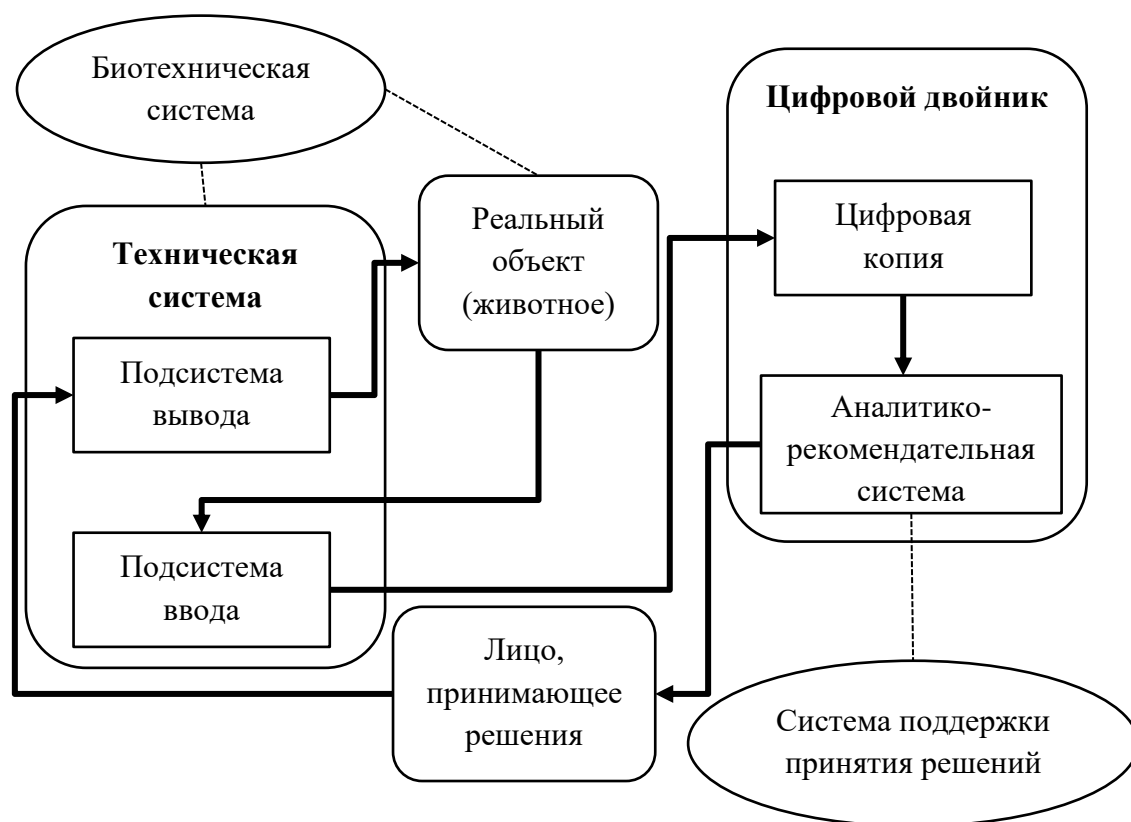


Рисунок 1.11 – Состав цифрового двойника биотехнической системы

В данной работе будем использовать именно такое понимание *цифрового двойника биотехнической системы*: совокупность данных о животном на виртуальном носителе (ЦК) и алгоритмов обработки этих данных посредством СППР.

Таким образом, в настоящее время молочное производство не достигает необходимых уровней, чему причиной, в том числе, слабая насыщенность отрасли ЦД. В рамках создания ЦД БТС необходимо сначала создать ЦК на основе данных МЭС, а также разработать СППР, позволяющей формировать рацион питания животного.

#### 1.4 Степень разработанности темы исследования

Проблемой применения различных информационных технологий, в том числе ЦД для решения задачи формирования эффективного рациона питания занимались многие отечественные и зарубежные ученые [9, 42, 48]. Во многих работах отмечается, что современные информационные технологии позволяют решать значительное количество задач в области планирования и управления предприятиям любого типа [47, 75, 100]. Потому достаточно больше количество исследователей в данной сфере считает, что для полноценного управления хозяйством сельскохозяйственной отрасли необходима разработка и массовое применение интеллектуальных систем поддержки принятия решения [22, 121].

Однако многие исследователи [14] отмечают, что весьма острой проблемой сельскохозяйственного производства нашей страны является существенное отставание в области техники и технологий. Это приводит к затормаживанию развития инноваций, в частности к отставанию в сфере мониторинга [41], информатизации [33], применения интернет-технологий [101], сквозных технологий [45] и современных систем управления производством [105].

Также, ряд исследователей отмечает, что в настоящее время в большинстве случаев не применяется оценка рациона питания животных, что приводит к стагнации сельскохозяйственного производства [13]. Потому в качестве решения предлагается смена подхода, который позволил бы в полной мере раскрыть ресурсный потенциал каждого региона с учетом производственной специфики.

Значительная часть работ, посвященных созданию ЦД для учета продуктивности или управлению, в том числе посредством формирования рациона, в большинстве случаев, посвящены исключительно техническим аспектам создания банных, без углубленных аналитических методов [28, 89, 98]. Сегодня же разрабатываемые модели позволяют найти оптимальное решение при анализе внутренней среды живого организма, с сокращением затрат на подобные работы. При создании таких моделей наиболее часто применяется дискретно-событийное моделирование, основное на логико-математическом аппарате [82].

Обобщающим решением подобных направлений служит разработка и создание виртуального полигона для моделирования животных процессов [35]. Данный полигон предполагает разработку цифровых образцов животных с переносом основных их характеристик на цифровые устройства, и далее проектирование всех возможных взаимодействий, организуемых внешними службами в формате двухсторонней связи, с целью проведения виртуальных испытаний. При этом, однако, вопросы оптимального формирования рациона для достижения повышенной продуктивности также не рассматриваются.

В исследовании [58] проведено сравнение ряда информационных систем, для чего использован ряд критериев, таких как функциональная полнота применяемого информационного решения, ориентация на конкретную отрасль, положительный или негативный опыт применения программного продукта и т.д. Вместе с тем отмечается, что рассматриваемые системы лишь облегчают учет, проводимый на предприятии, но не являются системами поддержки принятия решений [16].

Принципиальная важность применения современных информационных методов для оценки важнейших параметров молочного производства отмечены в работе [44]. В ней авторы, путем построения диаграммы Парето, проводят оценку качественного состава выпускаемой молочной продукции на примере конкретного хозяйства и анализируют ее взаимосвязь с рационом питания животных. Сбор и анализ данных позволил получить необходимую базу исследования и принять управленческие решения, призванные повысить эффективность работы молочного предприятия. При этом, вопрос формирования оптимального рациона также не рассматривается, оптимизируются сами хозяйственные операции.

В работе [86] приведено формирование кормового рациона молочных животных на основе оптимизационного моделирования, что позволяет получить более точные модели для данного процесса. В исследовании [91] на основе многомерного кластерного анализа авторы проводят обобщенную оценку эффективности управления молочным животноводством с точки зрения организации питания. Исследователи в работе [96] рассматривают формирование кормового рациона скота используя оптимизационное моделирование, найдя

зависимость между рационом и производительностью молочного животноводства. Однако данные методы не отражаются в разработки программного обеспечения.

Исследование [83] посвящено механизмам управления молочным производством, основанном на управлении рационом питания. Проведено комплексное изучение производительности на длительном промежутке времени. Выявлена строгая тенденция к снижению производства молока в натуральных хозяйствах, по сравнению с крупными владениями. Это объясняется невозможностью маленьких хозяйств обеспечивать высокий уровень производительности, поскольку отсутствуют возможности для использования научного потенциала и современных информационных систем. Формированию рациона в данной работе отводится только роль критерия сравнения.

В работе [12] рассмотрено множество разнообразных программных продуктов, позволяющих тем или иным способом воздействовать на молочное производство. Функционал применяемых сегодня программ весьма различен, начиная от простых программ учета в среде 1С, и заканчивая системами управления «умной фермой». В исследовании [79] авторами рассмотрены практические решения в области производства молока, призванные повысить эффективность деятельности таких предприятий. В частности, рассматривается отечественная система «Стимул», обеспечивающая управление процессом кормления и доения, однако, не выполняющая функций поддержки принятия решения при формировании рациона питания.

Автор исследования [1] предлагает систему управления молочным производством, основанную на системе управления данными. В работе отмечается, что многие проблемы, снижающие эффективность работы предприятия и качество выпускаемой продукции, могут быть решены при правильной организации информационного обмена, для чего необходим целый комплекс программ взаимодействия с базами данных предприятия. Реализация программного решения проведена в программных продуктах MATLAB и MS SQL Server.

В работе [30] авторы акцентируют внимание на широкое применение современных информационных технологий для управления молочным



производством, в том числе, в рамках разработки управляющих систем и СППР. Согласно результатам, авторами предлагается концепция в области формирования набора цифровых технологий, позволяющая генерировать и предоставлять данные, необходимые в принятии решений в области молочного производства.

Разработкой программ в рамках ЦД, призванных улучшить взаимодействие объекта с виртуальной копией и оказать поддержку в выборе решений, в настоящее время занимается ряд отечественных компаний, в том числе, НИИ «Сколково» [56]. При этом все имеющиеся попытки сравнения отечественного и зарубежного опыта внедрения ЦД в сектор АПК приводят к выводу о недостаточности разработок в области создания подобных систем в нашей стране [36].

Авторы работы [8] приводят различные модели минерального обмена в организме животных, определяя взаимосвязи между МЭС животного и его продуктивностью. Анализ позволил выявить, что большая часть моделей, предлагаемая в работах, приводится в стационарном виде, без учета изменений показателей во времени, что не отражает реальную действительность.

В работах ряда авторов показываются примеры применения наночастиц в биомедицинских исследованиях, в том числе вопросы их синтеза [112], определения аналитов [126], ускорения метаболических процессов [124]. Все авторы сходятся во мнении о необходимости применения наночастиц при анализе МЭС биологических организмов.

В работе [46] предложена комплексная модель для управления рационом питания, однако отмечается, что для упрощения ее использования необходимо также создать СППР для продуктивности молочного животноводства.

Таким образом, обзор исследований выявил как разнообразие подходов к повышению продуктивности молочного животноводства, так и некие обобщенные принципы. Представлено большое количество решений для молочного производства, однако практически не приведены примеры реализации систем поддержки принятия решений, направленных на формализацию рациона питания, особенно учитывающих микроэлементный состав организма животных.

## **1.5 Системный анализ процесса создания цифрового двойника биотехнической системы**

Проведенное библиографическое исследование позволяет, в целях проведения исследования процесса создания ЦД БТС, регулирование которой должно повысить производительность молочных животных, выдвинуть следующий тезис: продуктивность молочного производства зависит от его МЭС. Следствием этого тезиса является следующее заключение: существует такой МЭС, при котором продуктивность молочного производства является максимальной.

Выводом из следствия является то, что глобальная задача повышения производительности молочных хозяйств сводится к подбору определенного состава МЭС и его постоянного поддержания для каждого животного, тогда выход молока, как с конкретного животного, так и в общем с молочного хозяйства будет максимальным (при соблюдении прочих условий, таких как нормы питания, содержания, поддержание здоровья животных и т.д., которые не входят в задачи данного исследования). Проведем исследование ЦД БТС в рамках определенного тезиса и его следствия.

Исследование проводится в несколько этапов [17]:

- построение теоретической модели;
- анализ полученной модели;
- синтез модели управления;
- исследование устойчивости полученного решения;
- проведение идентификации моделируемой системы;
- экспериментальная проверка модели;
- внедрение.

Первые два этапа связаны с формализацией задачи управления производственным процессом на предприятиях в рамках создания ЦД.

На первом этапе, с целью получения теоретической модели для объекта исследования, необходимо определить место ЦД БТС в рамках всей функционирующей системы предприятия. Согласно ГОСТ Р 55272-2012 «Системы

менеджмента организаций» под организационной системой понимается некий определенный комплекс взаимосвязанных между собой частей системы, формирующих в своей совокупности единое целое и управляемых на основе получаемой и передаваемой информации [31]. Таким образом можно сделать вывод, что предприятие молочного производства представляет собой организационную систему.

Место ЦД на предприятии молочного животноводства описывается структурой, представленной на рисунке 1.12.

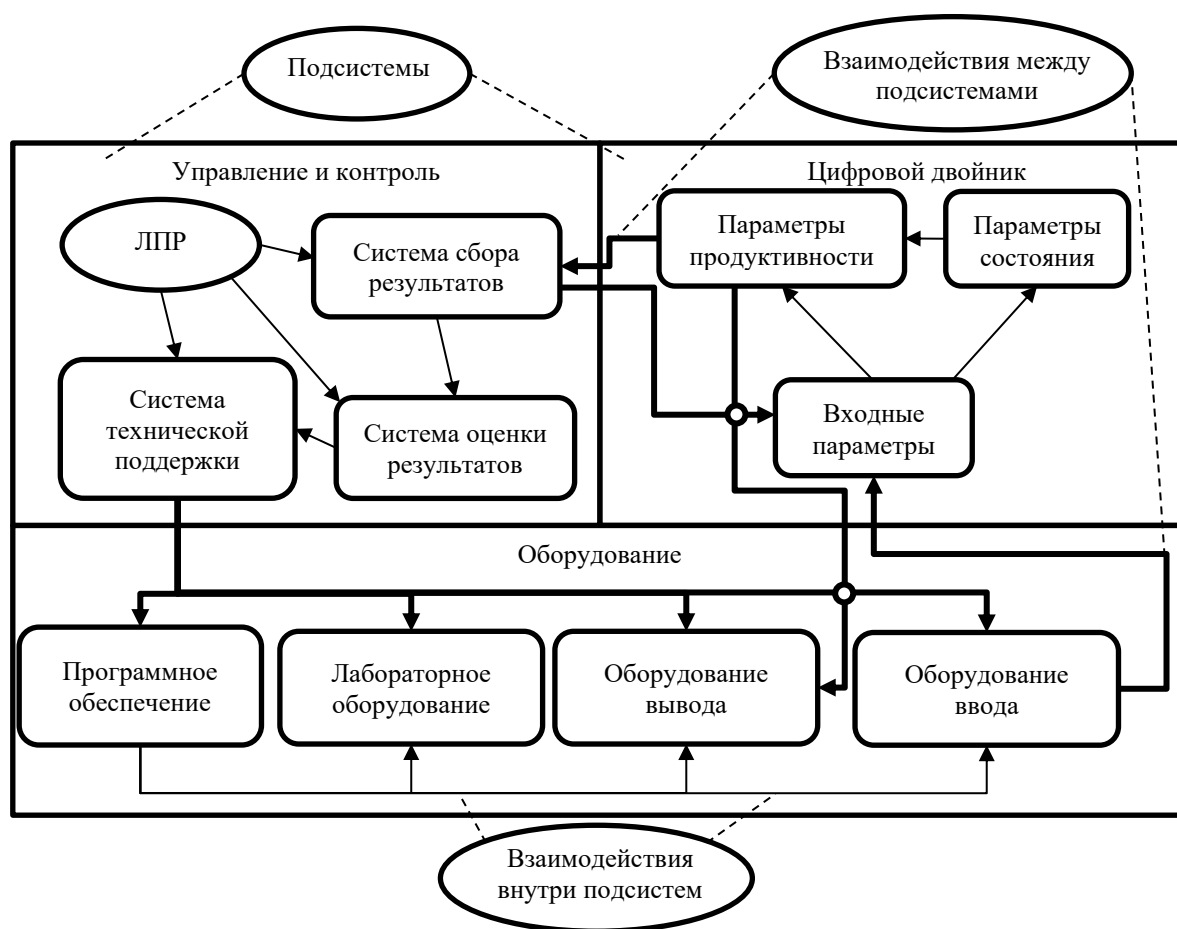


Рисунок 1.12 – Место цифрового двойника на предприятии молочного производства

Из рисунка 1.12 видно, что контроль ЦД осуществляет система сбора результатов через проведение оценочных исследований, с участием системы технической поддержки. Система технической поддержки необходима для

выполнения технических операций, обеспечивающих взаимодействие живой системы с информационной системой, в которой реализуется ЦД.

Процесс формирования рекомендаций по управляющему воздействию в рамках разработки ЦД, представляет собой процесс с собственными показателями и внутренними связями. Поскольку формирование рекомендаций напрямую зависит от всех информационных потоков, то для этого необходимо учесть все входящие и исходящие потоки, механизмы и внешние воздействия на данный процесс.

Для анализа используем методологию SADT – методологию структурного анализа, которая позволяет представить комплексный процесс моделирования с учетом воздействия всех ключевых факторов посредством особого графического языка [61].

Схема факторного влияния на создание рекомендаций по формированию управляющего воздействия приведена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.13 – Влияние различных факторов на процесс создания рекомендаций по формированию управляющего воздействия

Согласно рисунку 1.13, в рассматриваемую систему входит два потока – входные данные из внешних источников и управляющее воздействие, призванное скорректировать параметры состояния с точки зрения максимизации параметров продуктивности. При этом выходным потоком системы являются рекомендации для формирования управляющего воздействия, которые затем вновь возвращаются в систему в виде входящего потока управления.

В целях анализа полученного «черного ящика» необходимо провести декомпозицию факторного воздействия на ЦД БТС из рисунка 1.12. Результаты отображены на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Декомпозиция факторного воздействия на разрабатываемый цифровой двойник

Согласно рисунку 1.14 потоки данных поступают в различные системы оценки, при этом входящий поток отдельно не анализируется, анализу подвергается суммирование входного и управляющего воздействий. Затем для параметров состояния осуществляется расчет отклонений значений от эталона, в

результате чего определяется недостаток или избыток значений исследуемых параметров.

Далее выбирается способ изменения данных за счет изменения управляющего воздействия – как правило это подразумевает выбор альтернатив из некоторых наборов данных. В итоге создаются конкретные и точные рекомендации по формированию управляющего воздействия на параметры биологического объекта.

Анализ литературных источников и проведенные натурные испытания позволили выявить проблему нестабильности связей между отдельными элементами. Указанная проблема взаимных связей достаточно наглядно иллюстрируется попыткой подобрать необходимые дозировки для нормализации элемента в организме (в данном случае – наночастиц йода), производя каждый раз перерасчет новых отношений между микроэлементами и составляя новые уравнения регрессии (рисунок 1.15) [67].

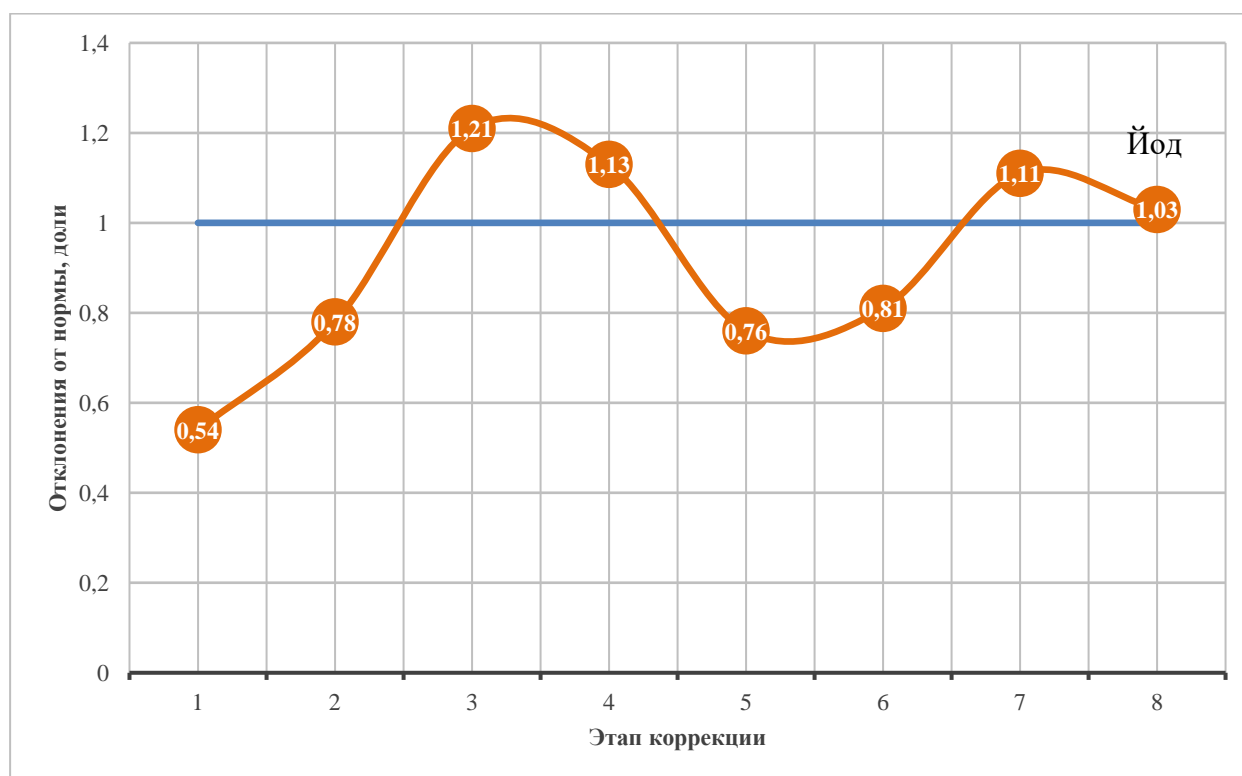


Рисунок 1.15 – Попытка корректировки элемента (йода) в организме ЖИВОТНОГО

На рисунке 1.15 показаны попытки скорректировать один элемент относительно его нормы, добавляя элементы антагонисты и протагонисты в корм животного в виде специализированных добавок. На каждом из этапов применялся регрессионный анализ, для чего строилось регрессионное уравнение, затем подбирались коэффициенты уравнения регрессии; данный процесс повторялся несколько раз, и каждый раз возникала необходимость заново определять коэффициенты регрессионного уравнения, однако итоговое значение МЭС либо не достигало нормы, либо значение йода становилось слишком высоким, что также является недопустимым при формировании рациона.

Отклонение от нормы требовало следующей коррекции данного элемента в кормовых добавках, повторение всех математических процедур, составление нового баланса кормовых добавок и в итоге приближенное к норме значение было достигнуто только лишь на восьмом шаге коррекции.

Как показали проведенные исследования, данное положение сложилось из-за динамичности связей между элементами, которые существенно связаны с СНМ, потому с изменением концентрации эффект антагонистов и протагонистов изменяется, что не дает возможности достаточно точно рассчитать необходимые дозы. Это приводит к постоянной новой корректировке элемента, включающей как математический перерасчет связей, так и новое определение доз, которые, в свою очередь, оказываются недостаточно корректным [113].

Неэффективность подобных процедур углубляется тем, что для каждого последующего анализа МЭС должно пройти не менее двух-трех недель, что вызвано исключительно особенностями организмов животных и скорости отражения изменений в составе элементов внутри животного; в противном случае изменения в организме еще не будут заметны и не могут быть выявлены путем обычного анализа.

Причина подобного изменения регрессионных коэффициентов заключается в том, что взаимодействие между различными элементами существенно влияет на обмен веществ и, соответственно, на итоговую выработку молока. Связанность и

взаимное влияние элементов может иметь различные корни, и встречается на разных уровнях воздействия, в том числе на уровне наночастиц.

Схематично взаимодействие между СНМ, связями МЭС и продуктивностью животных показано на рисунке 1.16.

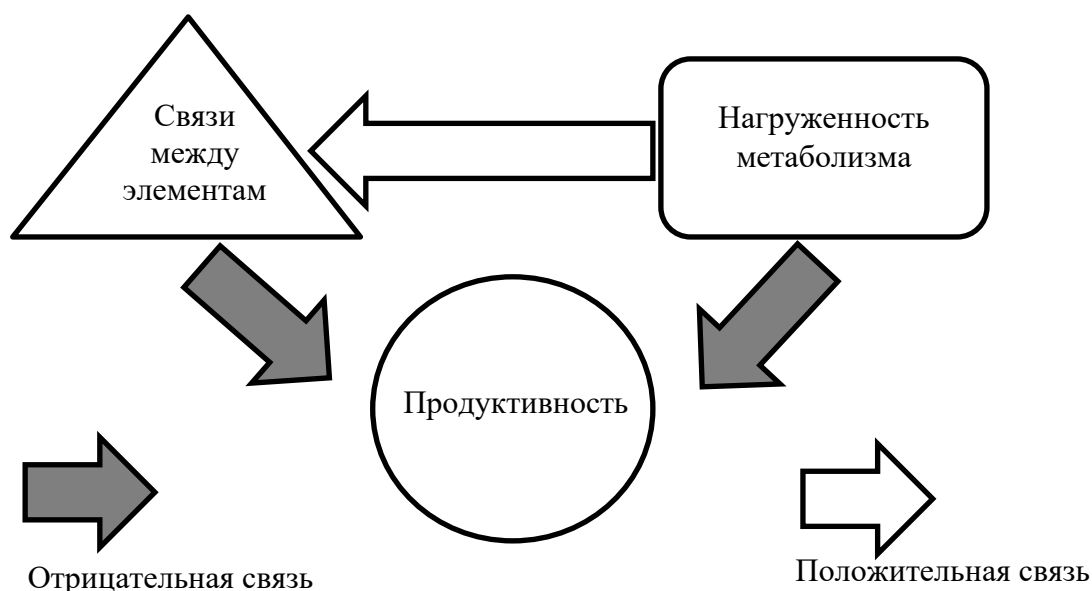


Рисунок 1.16 – Взаимодействие показателей нагруженности метаболизма, связей между элементами и продуктивности

Согласно представленному рисунку 1.16, помимо достаточно хорошо изученного взаимодействия продуктивности и нагруженности метаболизма, являющихся взаимнообратными величинами, существует, также практически не учитываемый эффект связей между элементами, который оказывает весьма существенно воздействие на продуктивность и сам становится ключевым объектом воздействия нагруженности метаболизма [117].

Устранение данной проблемы требует глубокой математической проработки процесса формирования рациона питания, особенно в вопросах, касающихся связей между процессами внутри организма животного. Для этой цели необходимо разработать математическую модель, учитывающую динамику связей между элементами. Разработка такой модели должна включать в себя коэффициенты,



описывающих изменение динамики связей МЭС в зависимости от их концентрации.

В соответствии с логикой проводимого исследования разработана обобщенная схема взаимодействия животного и информационно-технических систем (рисунок 1.17).

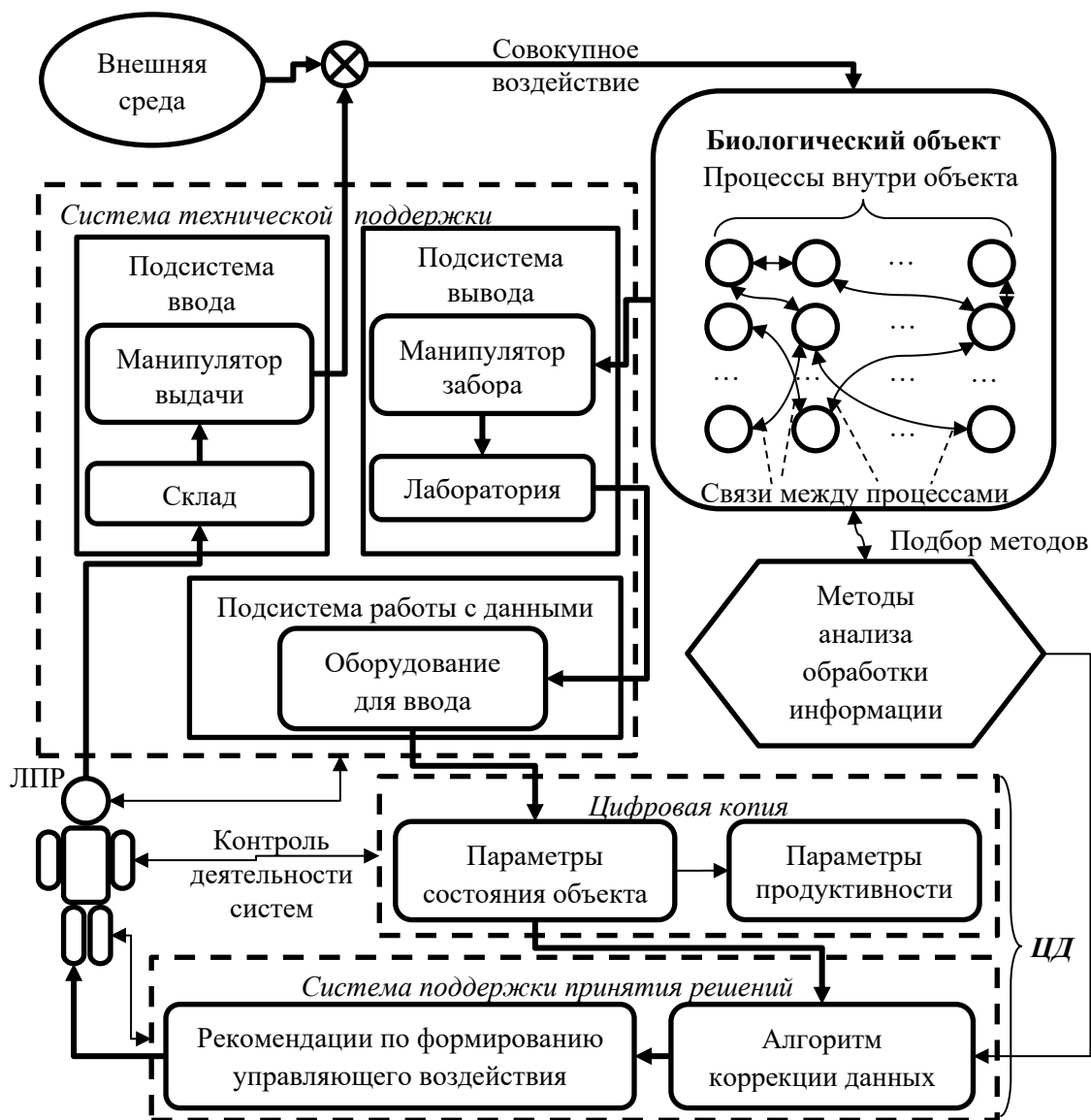


Рисунок 1.17 – Схема взаимодействия реального объекта и информационно-технических систем

Схема на рисунке 1.17 учитывает:

– биологический объект как живую систему, в которой взаимосвязаны различные процессы, подлежащие отдельному анализу с применением

специальных методов – данные методы разрабатываются и внедряются в систему посредством алгоритмов в СППР;

– систему технической поддержки, представленную подсистемами ввода, вывода и работы с данными, обеспечивающие взаимодействие живой системы и цифровых объектов;

– ЦД, состоящий из ЦК, в которой отображаются параметры состояния и параметры продуктивности, и СППР, реализующей алгоритм коррекции данных с применением указанных выше специальных методов и дающей рекомендации по формированию управляющего воздействия. Контроль деятельности систем осуществляет ЛПР.

Сам процесс взаимодействия между элементами реализуется через получение данных от животного посредством системы технической поддержки, после чего данные отображаются в ЦД и, далее, посредством СППР вырабатывается такое оптимальное изменение данных, необходимое для получения большей продуктивности конкретного животного; изменение данных осуществляется при помощи корректировки управляющего воздействий, осуществляемого на конкретное животное также системой технической поддержки.

Таким образом, проведен системный анализ ЦД БТС, который позволил выявить объект и субъект управления, потоки, механизмы и внешние воздействия на ЦД, а также, в результате проведенной декомпозиции, определена внутренняя структурная последовательность действий над данными в рамках реализации ЦД. Также определено, что связи между микроэлементами внутри организма животного подвержены значительной динамике в зависимости от их концентрации, что требует разработку новых математических моделей. Проведенный анализ позволил получить схему взаимодействия животного и информационно-технических систем, к которым относятся система технической поддержки и ЦД, состоящий из ЦК и СППР, собирающий, анализирующий данные и передающий необходимые рекомендации ЛПР.

## 1.6 Цель и задачи исследования

Исходя из проведенного обзора и анализа основных аспектов формирования эффективного рациона питания, сформулированы цель и задачи исследования.

Цель работы – повышение эффективности функционирования биотехнической системы на основе применения цифрового двойника в системе поддержки принятия решения.

Задачи:

1. Разработать концептуальную модель принятия решения на основе цифрового двойника биотехнической системы с использованием микроэлементного статуса.

2. Разработать математическую модель биотехнической системы с учетом нагруженности метаболизма и динамики межэлементных связей.

3. Разработать метод и алгоритмы оценки динамики межэлементных связей, основанные на корреляционных плеядах, позволяющие определять неизвестные параметры модели оценки эффективности функционирования биотехнической системы.

4. Разработать прототип системы поддержки принятия решений для управления эффективностью функционирования биотехнической системы.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика»:

– п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

– п. 3. Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

– п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

## 1.7 Выводы по первой главе

1. Одной из важнейших отраслей сельского хозяйства в нашей стране является молочное животноводство. Однако в настоящее время не достигается необходимый уровень молочного производства, установленного Доктриной продовольственной безопасности. Производства молока в секторе АПК зависит от рациона питания животных. Изучение методов формирования рациона позволили выбрать метод коррекции МЭС, который может оказывать управляющее воздействие на продуктивность. Проведенный анализ ПО показал отсутствие программ, которые могли бы учитывать и корректировать МЭС животных.

2. Коррекция МЭС является трудоемким процессом, для обеспечения которого необходимо пользоваться современными информационными технологиями. Наиболее перспективными разработками в секторе АПК является разработка ЦД БТС, который включает в себя данные с реального объекта в ЦК и СППР для анализа и выработки решений в области формирования рациона питания.

3. Проведенный обзор степени разработки проблемы позволил выявить ряд общих задач, стоящих перед сектором АПК. Обзор показал большое разнообразие методов и подходов к повышению продуктивности молочного производства, однако позволил выявить недостаточную насыщенность работами по коррекции МЭС для формирования эффективного функционирования БТС.

4. В результате проведенного системного анализа определено место ЦД на предприятии молочного производства, выявлены взаимосвязи создания ЦД и схемы управления данными, определена внутренняя структурная последовательность действий над данными в рамках реализации ЦД. Также выявлены проблемы динамики связей, которые необходимо решать при помощи построения математических моделей. В результате получена схема взаимодействия животного и информационно-технических систем, к которым относятся система технической поддержки и ЦД собирающий и анализирующий данные, а также передающий необходимые рекомендации ЛППР.

## **Глава 2. Методы анализа связей для реализации системы поддержки принятия решения при формировании рациона питания**

### **2.1 Обоснование выбора метода анализа связей для проведения исследования**

Проведенный в предыдущей главе анализ показал, что при создании ЦД БТС, основанной на коррекции МЭС, важнейшую роль играют связи между конкретными элементами. Кроме того, основной проблемой оценки взаимного влияния элементов друг на друга является динамика связей – изменчивость силы связи, выраженной через коэффициенты корреляции. Природа динамики связей еще недостаточно изучена, однако считается, что динамичность элементов зависит от попадания ультрадисперсных элементов в биологический организм.

Для решения задачи формирования эффективного рациона питания необходимо верно рассчитать концентрацию элементов, что невозможно без точного учета силы взаимных связей и их динамики. В этой связи, подходящим методом решения поставленной задачи является метод анализа связей.

*Метод анализа связей* представляет собой особый метод анализа данных, применяемый для анализа и оценки сетевых взаимодействий между определенными узлами. В качестве узла могут выступать разнообразные акторы, в том числе и состав микроэлементов, основное условие: наличие связи и возможность определения параметров этой связи. Метод анализа связей определяет процесс анализа совокупных взаимоотношений между разными объектами объединенной системы для выявления и оценки основных характеристик изучаемой системы.

Данный метод представляет собой подраздел методов Data Mining, поэтому для него характерны такие же последовательные этапы, как и для методов этой группы, а именно:

- сбор данных;

- обработка данных;
- анализ данных;
- визуализация данных.

Сбор данных для исследования осуществляется в лабораторных условиях, посредством взятия анализ у исследуемых животных. Указанный этап выполняется профессиональными биологами и зоотехниками и не рассматривается в рамках данного исследования.

Обработка данных представляет собой процесс получения информации путем преобразования исходных лабораторных данных и занесение их в соответствующие базы. На этом этапе происходит проверка адекватности данных, их систематизация, фильтрация, сортировка и представление в удобном виде для проведения дальнейших операций. Формально, данный этап представляет собой создание ЦК живого объекта.

Анализ данных включает в себя все процедуры, обеспечивающие понимание процессов, необходимых для формирования эффективного рациона питания. Он включает в себя математические методы, в том числе подбор функции вероятности, учитывающей стохастическое колебание собранных данных, моделирование, которое позволяет учесть как концентрацию микроэлементов, так и силу и динамику их связей; статистические методы, включающие в себя оценку связей путем построения ковариационной матрицы, разделение объектов на группы методом кластерного анализа, оценку динамики данных методом скользящих средних и т.д. Сюда же относятся методы оценки экономической эффективности вносимых изменений в формируемый рацион.

Визуализация данных осуществляется посредством представления взаимосвязей элементов в виде корреляционных плеяд, которые позволяют исследователю лучше понять природу связей между элементами и их динамику.

Таким образом, применение метода анализа связей позволяет решить задачу повышения эффективности функционирования БТС. Все этапы анализа учтены и для каждого из них предложены инструменты, позволяющие достигнуть результата исследования.

## 2.2 Обзор методов математического моделирования

Необходимым элементом исследования является проведение подробного анализа всех составляющих системы, которые оказывают влияние на конечный результат. Подобное исследование является предварительным для построения математического описания поставленной задачи и затем ее последующей реализации, как правило, в виде математической модели [119]. Выполнение данного исследования дает математическую основу решения всех ключевых задач исследования.

Поскольку состояние животных представляет собой совокупность разноформатных данных, запись таких данных не может быть приведена при помощи традиционного математического равенства. Потому наиболее целесообразна запись при помощи кортежа.

*Кортеж* представляет собой определенную упорядоченную последовательность из конечного числа элементов, составляющих описание конкретного объекта, и имеет следующий вид:

$$M = \langle A, \dots, Z \rangle. \quad (2.1)$$

где  $A = \{a_1, \dots, a_n\}, \dots, Z = \{z_1, \dots, z_m\}$  – упорядоченные множества.

Описание процессов путем кортежа дает возможность в дальнейшем выделить те подмножества, которые обладают наибольшим значением для исследования, выявить взаимные связи между этими подмножествами и другими, влияние которых также необходимо учесть. Это позволит сузить задачу, сосредоточившись на определении конкретных зависимостей и построении конкретных моделей, при этом оставляя во внимании имеющиеся связи с другими объектами, который способны оказывать влияния на расчеты внутри исследуемого подмножества.

Помимо кортежей, для описания конкретного подмножества используются *соотношения теории множеств*. Любое множество представляет собой соотношение вида:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2.2)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – конкретные элементы множества  $X$ .

Поскольку предполагается изучение динамических моделей, то состав подмножеств подвержен влиянию времени. Учитывая предполагаемую дискретность операций, для отображения динамики элементов подмножества достаточно использовать формулу *простого баланса* для множества  $X$  на момент времени  $t$ :

$$X_t = X_{t-1} + X_e - X_r, \quad (2.3)$$

где  $X_{t-1}$  – состав множества в предшествующий момент времени,

$X_e$  – элементы множества, поступившие в текущий момент времени,

$X_r$  – элементы множества, выбывшие в этот же момент времени.

Учитывая, что в основе анализа лежит единственное подмножество, то результирующее соотношение можно представить в виде конкретной *функции*:

$$Y = f(X_t) \rightarrow \max. \quad (2.4)$$

Также может существовать некое оптимальное множество  $X_{opt}$ ; при  $Y \rightarrow \max$   $X_t \rightarrow X_{opt}$ .

Для выявления и оценки предполагаемой взаимосвязи предполагается применение методов *корреляционно-регрессионного анализа*, получивших широкое распространение [102].



При применении данного вида анализа функция из соотношения (2.2) может быть сведена к следующему виду:

$$f(X_t) = E(Y|X = X_t), \quad (2.5)$$

где  $E$  – оператор математического ожидания.

Выражение (2.5) есть *регрессия*, выраженная в линейном соотношении, то есть имеет вид:

$$E(Y|X = X_t) = AX = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n, \quad (2.6)$$

где  $A = (a_0, a_1, \dots, a_n)$  – матрица коэффициентов при соответствующих значениях элементов  $X = (1, x_1, \dots, x_n)$ .

Каждый из коэффициентов  $a_i$  при значениях  $x_i$  характеризуют степень влияния этого элемента на общий размер итогового показателя. Значение  $r$  элемента  $a_i$ , скорректированные на частное от деления дисперсий  $\sigma$  соответствующего элемента и результата, то есть:

$$r_i = a_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_Y} \quad (2.7)$$

называется *коэффициентом корреляции*. Именно такое значение корреляции, как правило, используется для анализа взаимных зависимостей в живых системах.

Однако данный коэффициент является линейным, то есть при наличии иного типа связи применение данного коэффициента даст неточный или ошибочный результат [19]. Кроме того, в вопросах взаимного влияния необходимо понимать, какой элемент является главенствующим, чего не дает применение линейного коэффициента корреляции. Поэтому, для определения взаимной зависимости между элементами предложен коэффициент корреляционного отношения  $\eta$ .

Корреляционное отношение  $\eta$  позволяет описать взаимосвязь между показателями с двух сторон: с точки зрения влияния одной переменной на другую и наоборот. Поэтому для каждой пары значений  $x$  и  $y$  рассчитывается два показателя  $\eta_{xy}$  и  $\eta_{yx}$ .

Для расчета корреляционного отношения применяются формулы:

$$\eta_{yx} = \sqrt{\frac{\sum f_x (\bar{y}_x - \bar{y})^2}{\sum f_y (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.8)$$

$$\eta_{xy} = \sqrt{\frac{\sum f_y (\bar{x}_y - \bar{x})^2}{\sum f_x (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (2.9)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – общие средние арифметические показателей;

$\bar{x}_y$  и  $\bar{y}_x$  – групповые средние арифметические показателей;

$f_x$  и  $f_y$  – частоты соответствующих рядов показателей.

Совокупность коэффициентов образуют корреляционную матрицу  $R$ :

$$R = \begin{pmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \dots & \eta_{1n} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \dots & \eta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_{n1} & \eta_{n2} & \dots & \eta_{nn} \end{pmatrix}. \quad (2.10)$$

Поскольку предполагается оперирование не только детерминированными, но и стохастическими величинами, построение строгой функции, точно описывающей все возможные состояния вектора  $X$  невозможно. Возможна лишь приближенная ее оценка  $E$ :

$$E(x_i | X_{opt}) = F_i(X_{opt}), \quad (2.11)$$

где  $F_i(X_0)$  – регрессионное уравнение, максимально приближенное к вектору  $X_{opt}$ .

Подберем такую функцию  $F(X)$ , что ее среднеквадратичная ошибка от значений вектора  $X_{opt}$  минимизируется:

$$E[F(X) - X_{opt}]^2 \rightarrow \min. \quad (2.12)$$

Выражение  $E[F(X) - X_{opt}]^2$  представляет собой регрессионную оценку вектора  $\Delta X$  и формально является ковариационной матрицей  $\text{cov}(x_i, x_j), i, j = 1, \dots, n$  соотношений каждого из параметров вектора  $X$ , иначе говоря:

$$E[F(X) - X_{opt}]^2 = \text{cov}(x_i, x_j), i, j = 1, \dots, n. \quad (2.13)$$

Практика показала, что для оценки функции  $F(X)$  линейные модели не всегда применимы. Анализ возможных вариантов переопределил использование других видов регрессии. Наиболее предпочтительной оказалась регрессия, опирающаяся на *логит-модель*:

$$F(X) = \frac{e^{\sum_{i=1}^n a_i x_i}}{1 + e^{\sum_{i=1}^n a_i x_i}}. \quad (2.14)$$

Для упрощения введем параметр  $l(a)$ :

$$l(a) = \frac{e^{\sum_{i=1}^n a_i x_i}}{1 + e^{\sum_{i=1}^n a_i x_i}}. \quad (2.15)$$

Коэффициенты при обобщенном показателе  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) из условия соотношения (2.12) определяются на множестве  $[a: \sum a_i = 1]$ .

Обзор методов для подбора безусловного экстремума искомой функции, с учетом нелинейности поставленной задачи predetermined выбор *метода Лагранжа*. Данный метод сводит нелинейное программирование к безусловному экстремуму, который определяется аналитическими методами.

Применение данного метода позволило получить следующее соотношение:

$$L(a, \lambda) = E[F(X) - X_0]^2 + \lambda(l(a) - 1). \quad (2.16)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Применив условия экстремума для функции  $L(a, \lambda)$ , получим в результате следующее соотношение относительно неизвестных:

$$l(a)E[F(X) - X_0]^2 + \lambda = 0. \quad (2.17)$$

Уравнение (2.17) имеет единственное решение  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n, \lambda)$ , поскольку линейные показатели независимы.

Однако найденное уравнение подходит только для определения коэффициентов при условии стабильных связей между элементами. В случае наличия динамики корреляционных отношений, которая зависит от наночастиц элементов, уравнение может выдавать неточные результаты.

Динамика корреляционных отношений находит свое отражение в составленной ранее ковариационной матрице  $\text{cov}(x_i, x_j)$ . Для нивелирования влияния динамики корреляционных отношении необходимо подобрать функцию  $F(\text{cov})$ , такую, при которой  $E[\Delta X]^2 \rightarrow \min$ , с учетом выявленных коэффициентов динамики [127].

Таким образом, в данном разделе приведен обзор основных математических методов, призванных формализовать задачу повышения эффективности функционирования БТС с учетом динамики микроэлементного состава.

## 2.3 Обзор методов статистической обработки данных

Для составления адекватных моделей, способных корректировать динамику связей необходимо предварительно провести оценку совокупного взаимного влияния, для чего предлагается использование специальных методов [111].

Для целей оценивания множественности межэлементных взаимосвязей использован коэффициент *конкордации Кендалла*:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)}, \quad (2.18)$$

где  $m$  – количество элементов;

$n$  – совокупное количество наблюдений;

$S$  – отклонение суммы квадратов рассчитанных рангов от среднего значения квадратов рангов, которое рассчитывается следующим образом:

$$S = \sum_{i=1}^n s_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n s_i\right)^2}{n}, \quad (2.19)$$

где  $s_i$  – сумма рангов всех признаков по  $i$ -ой строке.

Для выявления изменений в межэлементных связях использован метод скользящих средних, которые рассчитываются по формуле:

$$\hat{y}_t = \frac{\sum_{j=t-p/2}^{t+p/2} y_j}{p}, \quad (2.20)$$

где  $p$  – размер окна,

$j$  – порядковый номер уровня в окне сглаживания.

Размер окна определен по формуле расчета объема выборки:

$$p = \frac{\sigma_x^2 \alpha^2}{\Delta^2}, \quad (2.21)$$

где  $\sigma_x^2$  – дисперсия коэффициента конкордации;

$\alpha$  – коэффициент доверия, определяющий заданную точность;

$\Delta$  – предельная ошибка выборки.

Обобщенная схема расчета скользящего среднего коэффициента конкордации Кендалла приведена на рисунке 2.1.

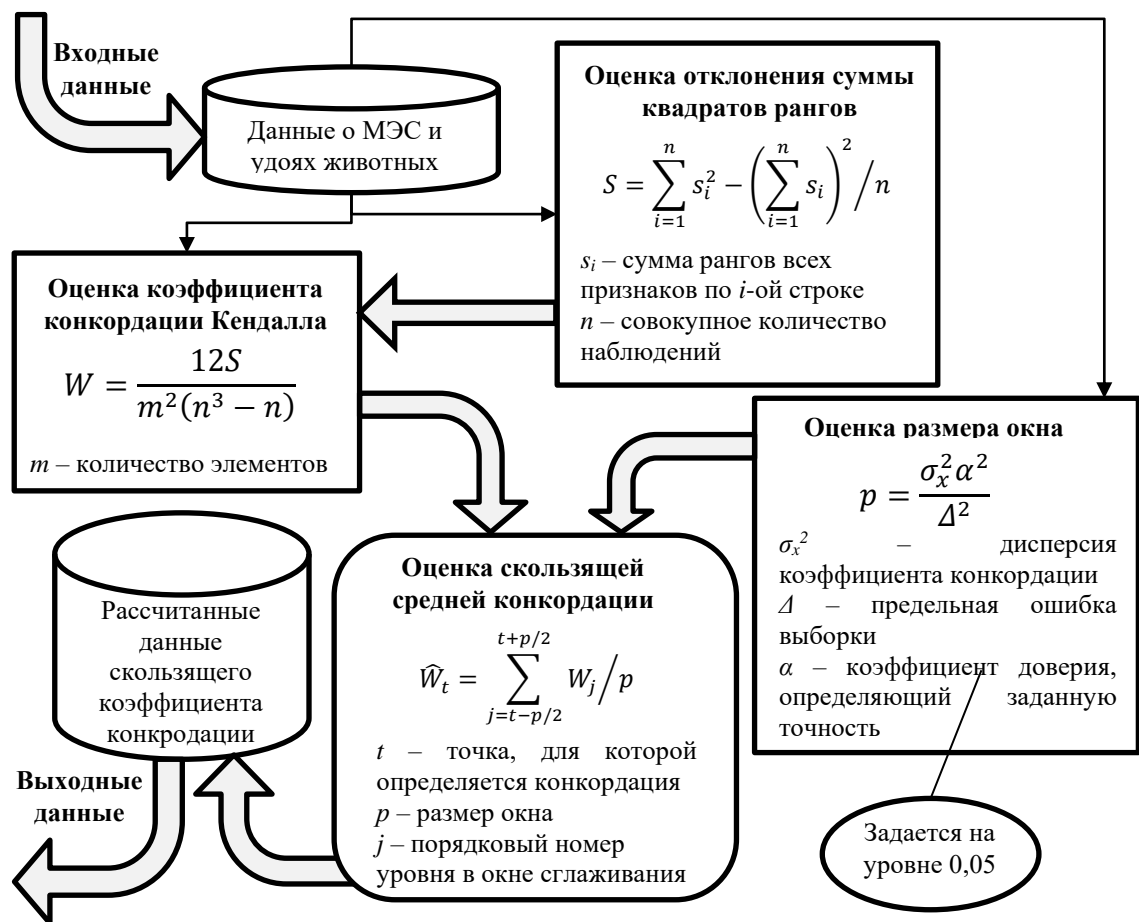


Рисунок 2.1 – Схема расчета скользящего среднего коэффициента конкордации Кендалла

Полученный результат необходимо сопоставить с динамикой результирующего показателя, для определения зависимости количества связей и итогового результата.

*Кластерный анализ* представляет собой многомерную процедуру статистики, которая обеспечивает сбор данных и проводит определенным способом упорядочивание в относительно однородные группы. В случае определения результирующего показателя предлагается проведение *дискриминантного анализа* по совокупной выборке с учетом нормативов по формированию групп.

Для простого и наглядного представления применен метод корреляционных плеяд. *Корреляционные плеяды* – графический метод, показывающий связи для каждого элемента, и представляющей собой отображение объектов и связующих их корреляций наподобие ненаправленного графа. Ввиду большого количества элементов и соответствующей сложности рисунка, изображение плеяд было доработано: в нем выделяются *ядра* – совокупности элементов (не менее трех), каждый из которых связан с другими прямой связью определенного уровня. Уровни связи разделены по диапазонам корреляции начиная от 0,6 и с шагом 0,1. Ядра могут иметь *периферию*, характеризующуюся элементами, связанными не со всеми элементами ядра и имеющими, как правило, менее тесную связь. Пример корреляционной плеяды приведен на рисунке 2.2.

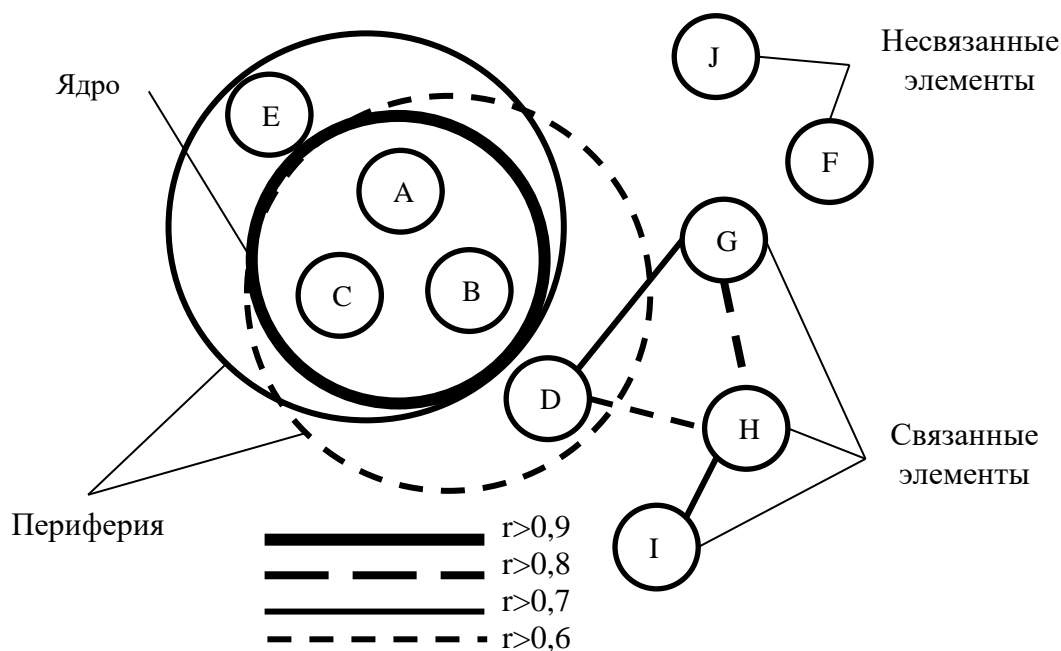


Рисунок 2.2 – Пример гипотетической корреляционной плеяды

На рисунке 2.2 отображена корреляционная плеяда, имеющая ядро, периферию, связанные и несвязанные с ними элементы. Сила связи отображается толщиной и штриховкой соединяющих и объединяющих линий.

Поскольку корреляционная плеяда указывает наличие связи между показателями, то изменение размера одного показателя от размера другого может быть оценено логико-вероятностным методом. Посредством *логико-вероятностного метода* оценивается суммарная вероятность всех возможных влияний на конкретный показатель связанных с ним других показателей.

В указанном случае связь, определенная коэффициентом корреляционного отношения, представляет собой степень влияния одного элемента на другой, что позволяет управлять одними элементами посредством других.

Для этих целей строится функция, состоящая из логических операций дизъюнкции и конъюнкции [99]. Наличие связей определяется корреляционной плеядой, а в качестве вероятности изменения использованы рассчитанные коэффициенты корреляции, отображенные в корреляционных плеядах.

Приведем пример подобного оценивания для показателя  $I$  из плеяды на рисунке 2.2. Для наглядности представим плеяду в виде традиционного графа (рисунок 2.3).

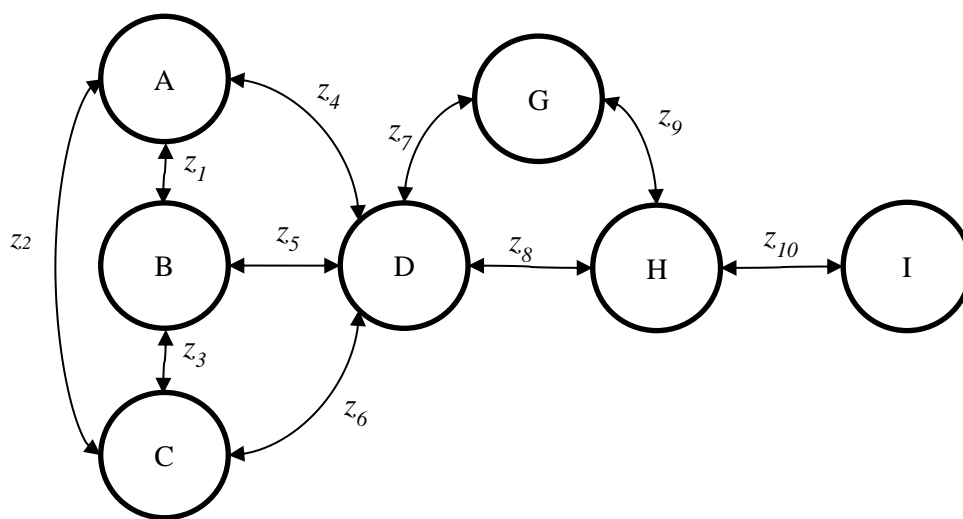


Рисунок 2.3 – Граф достижимости показателя  $I$



Поскольку все элементы, входящие в плеяду, оказывают друг на друга, необходимо построить все возможные маршруты, связующие окончательный показатель и все, связанные с ним. Для этого необходимо выявить и оценить каждый из возможных маршрутов. Совокупность маршрутов дает понимание количества способов влияния на один и тот же показатель посредством изменения других показателей.

Все возможные маршруты достижения условного показателя *I* приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Маршруты достижения условного показателя *I*

№ п/п	Начальный элемент	Маршрут	№ п/п	Начальный элемент	Маршрут	№ п/п	Начальный элемент	Маршрут
1	A	z <sub>4</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	13	B	z <sub>3</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	25	C	z <sub>2</sub> , z <sub>1</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>
2	A	z <sub>1</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	14	B	z <sub>1</sub> , z <sub>2</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	26	C	z <sub>6</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
3	A	z <sub>2</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	15	B	z <sub>3</sub> , z <sub>2</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	27	C	z <sub>3</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
4	A	z <sub>1</sub> , z <sub>3</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	16	B	z <sub>1</sub> , z <sub>4</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	28	C	z <sub>2</sub> , z <sub>4</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
5	A	z <sub>2</sub> , z <sub>3</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	17	B	z <sub>5</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	29	C	z <sub>3</sub> , z <sub>1</sub> , z <sub>4</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
6	A	z <sub>4</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	18	B	z <sub>3</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	30	C	z <sub>2</sub> , z <sub>1</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
7	A	z <sub>1</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	19	B	z <sub>1</sub> , z <sub>2</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	31	D	z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>
8	A	z <sub>2</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	20	B	z <sub>3</sub> , z <sub>2</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	32	D	z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
9	A	z <sub>1</sub> , z <sub>3</sub> , z <sub>6</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	21	C	z <sub>6</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	33	G	z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>
10	A	z <sub>2</sub> , z <sub>3</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>7</sub> , z <sub>9</sub> , z <sub>10</sub>	22	C	z <sub>3</sub> , z <sub>5</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	34	G	z <sub>7</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>
11	B	z <sub>1</sub> , z <sub>4</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	23	C	z <sub>2</sub> , z <sub>4</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	35	H	z <sub>10</sub>
12	B	z <sub>5</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>	24	C	z <sub>3</sub> , z <sub>1</sub> , z <sub>4</sub> , z <sub>8</sub> , z <sub>10</sub>			

Согласно данным таблицы 2.1, два конкретных показателя могут быть связаны разными маршрутами. Влияние одного показателя на другой оказывается сразу всей совокупностью маршрутов, что и является причиной изменения связей в результате различных замеров. Наличие показанных маршрутов характеризует динамику связей между показателями.

Достижение конкретного показателя различными путями обеспечивает многократное косвенное влияния на показатель, что нарушает процесс расчетов стандартным корреляционно-регрессионным методом. Для оценки влияния показателей на анализируемый необходимо учитывать всю совокупность возможных маршрутов.

Поскольку все показатели в корреляционной плеяде соединены последовательно, то для вычисления итоговой вероятности для каждого маршрута при воздействии на любой взаимозависимый элемент выполняется операция конъюнкции. Остальные операции в указанном методе практически неприменимы, ввиду особенностей построения корреляционных плеяд.

Составим систему уравнений в арифметической записи с учетом всех возможных маршрутов:

$$q = \begin{cases} A \rightarrow I | q_A = z_4 z_8 z_{10} \cup z_1 z_5 z_8 z_{10} \cup z_2 z_6 z_8 z_{10} \cup z_1 z_3 z_6 z_8 z_{10} \cup z_2 z_3 z_5 z_8 z_{10} \cup z_4 z_7 z_9 z_{10} \cup z_1 z_5 z_7 z_9 z_{10} \cup z_2 z_6 z_7 z_9 z_{10} \cup z_1 z_3 z_6 z_7 z_9 z_{10} \cup z_2 z_3 z_5 z_7 z_9 z_{10} \\ B \rightarrow I | q_B = z_1 z_4 z_8 z_{10} \cup z_5 z_8 z_{10} \cup z_3 z_6 z_8 z_{10} \cup z_1 z_2 z_6 z_8 z_{10} \cup z_3 z_2 z_5 z_8 z_{10} \cup z_1 z_4 z_7 z_9 z_{10} \cup z_5 z_7 z_9 z_{10} \cup z_3 z_6 z_7 z_9 z_{10} \cup z_1 z_2 z_6 z_7 z_9 z_{10} \cup z_3 z_2 z_5 z_7 z_9 z_{10} \\ C \rightarrow I | q_C = z_6 z_8 z_{10} \cup z_3 z_5 z_8 z_{10} \cup z_2 z_4 z_8 z_{10} \cup z_3 z_1 z_4 z_8 z_{10} \cup z_2 z_1 z_5 z_8 z_{10} \cup z_6 z_7 z_9 z_{10} \cup z_3 z_5 z_7 z_9 z_{10} \cup z_2 z_4 z_7 z_9 z_{10} \cup z_3 z_1 z_4 z_7 z_9 z_{10} \cup z_2 z_1 z_5 z_7 z_9 z_{10} \\ D \rightarrow I | q_D = z_8 z_{10} \cup z_7 z_9 z_{10} \\ G \rightarrow I | q_G = z_9 z_{10} \cup z_7 z_8 z_{10} \\ H \rightarrow I | q_H = z_{10} \end{cases}$$

где  $q_i, i \in \{A, \dots, H\}$  – корректирующий коэффициент корреляции.

Подставляя в полученное уравнение рассчитанные значения коэффициента корреляции можно оценить вероятность полного изменения концентрации конкретного показателя. Данный метод показывает изменение динамики связей между показателями и позволяет оценивать изменение корреляционного отношения посредством простого добавления коэффициента.

Таким образом, для обработки показателей, применяемых в данном исследовании, используются методы статистики, а именно коэффициент конкордации Кендалла, кластерный анализ (с дискриминантной составляющей), метод корреляционных плеяд, доработанный для улучшения визуализации связей и логико-вероятностный метод, позволяющий оценить динамику связей.

## 2.4 Обзор методов оценки эффективности предлагаемых мероприятий

Описанные ранее математические и статистические методы позволяют учитывать динамику межэлементных связей и решить уравнение математической модели, призванной повысить продуктивность результирующего показателя посредством изменения входных данных. Однако для того, чтобы сделать оптимальный выбор – подбор такого набора показателей, которые позволят максимально увеличить результирующий показатель, необходимо использовать метод, обеспечивающий многокритериальный выбор. В качестве подобного метода предложен *метод анализа иерархий* (МАИ).

МАИ представляет собой процесс декомпозиции сложной проблемы на значительно более простые части. Далее эти составные часть последовательно подвергаются анализу и обработке.

Как правило, МАИ применяется в случае различных видов экспертного оценивания. Однако экспертные оценки могут быть заменены параметрами вероятности изменения удоев от тех или иных элементов и их взаимного влияния, которые входят в состав кормовых добавок животных, что позволяет обойтись без экспертного оценивания [116].

С целью оценки эффективности предлагаемых мероприятий, необходимо привести численный эксперимент, обеспечивающий надежное доказательство правильности применяемых методов.

Для реализации предварительной части эксперимента необходимо воспользоваться методами статистики. Объем выборочной совокупности определен по формуле:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2 \cdot N}{t^2 \cdot \sigma^2 + \Delta^2 \cdot N}, \quad (2.22)$$

где  $t$  – коэффициент доверия = 2;

$\sigma^2$  – дисперсия изучаемого признака;

$\Delta$  – предельная ошибка выборки;

$N$  – размер генеральной совокупности.

Все остальные этапы проведения эксперимента выполняются в соответствии с процессом реализации методов, описанных в предыдущих разделах исследования.

На рисунке 2.4 отображен обобщенный алгоритм проведения эксперимента.

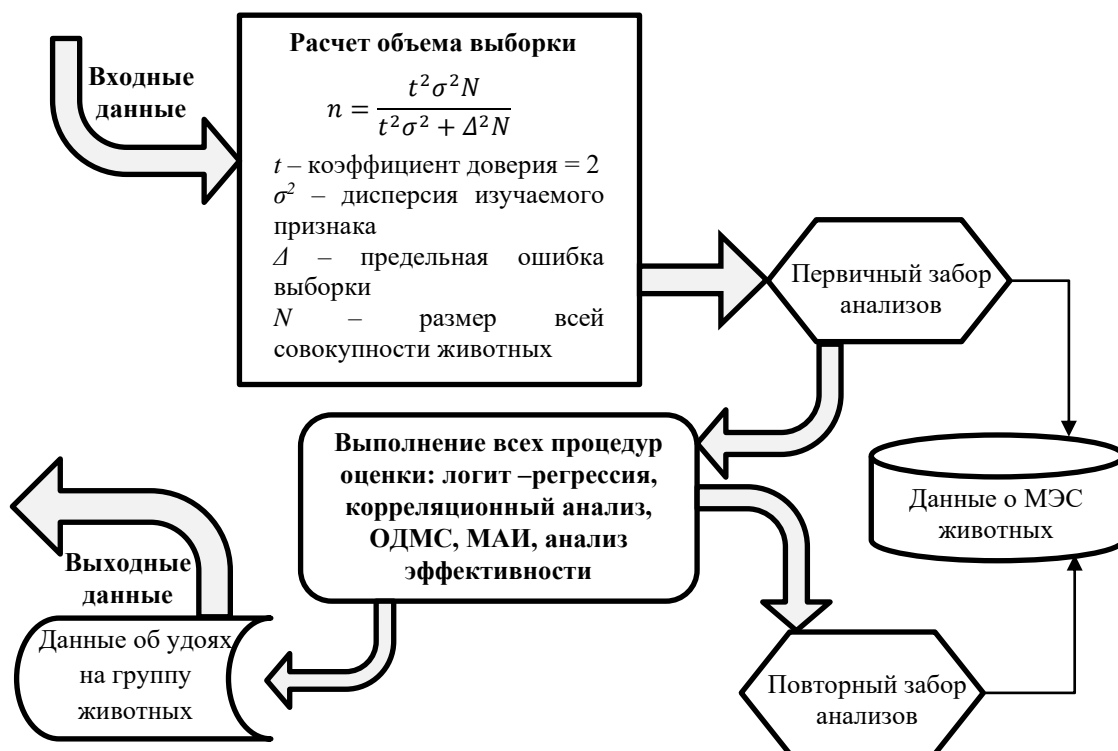


Рисунок 2.4 – Блок-схема алгоритма проведения эксперимента

Согласно рисунку 2.4, после определения объема выборки выполняется первичный забор анализов, далее применяются методы, составляющие основу СППР. После выполнения всех предписанных рекомендаций, согласно результатам, полученным от СППР, проводится повторный забор анализов, который позволяет оценить эффективность работы системы.

Таким образом, разработан алгоритм проведения эксперимента, позволяющий получить ключевые данные для оценки экономической эффективности разработанных методов.

## 2.5 Разработка концептуальной модель принятия решения для цифрового двойника биотехнической системы

В рамках реализации следующего этапа системного исследования – формализации задачи управления рационом питания – необходимо проанализировать схему на рисунке 1.17 с точки зрения возможности управления тем или иным потоком, чтоб в дальнейшем оказывать воздействие на выбранные потоки, с целью увеличения эффективности молочного производства за счет увеличения выхода молока.

Особенность разработанной системы заключается в том, что ЦК создается для параметров состояния, которые отображают МЭС животного и параметров продуктивности, которые отображают удои, выраженные в количестве наедаемого молока с каждой конкретной особи. Рекомендации по воздействию на животных описываются в виде состава рациона питания, который моделируется посредством применения различных кормовых добавок.

Оценка и параметров состояния, и состава добавок производится через комплексную оценку МЭС, то есть результат исчисляется в одних и тех же единицах. Параметры продуктивности достигают наивысшего значения тогда, когда параметры состояния принимают эталонные значения, лучшие для животных.

Иными словами, задача сводится к манипулированию элементарным статусом животных, с возможностью выходного контроля самих элементов, которые находятся в организме молочных животных, что позволяет повышать эффективность производства за счет итогового выхода молока.

Подобная интерпретация процесса производства молока позволяет провести формализацию и постановку задачи повышения производительности молочного животноводства [110].

Дано: данные  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  результатов векторов измерений показателей МЭС, где каждому вектору измерения соответствует назначаемый вариант рациона

$d_i \in D, i = (1, 2, \dots, T_j)$ , где  $T_j$  число шагов коррекции рациона,  $n$  – число признаков МЭС, по которым проводятся измерения.

Требуется:

– сформировать множество элементов  $X^* = X' \cup X''$ ,  $X', X'' \in X$ , где  $X'$  – наиболее значимые элементы, полученные на основе корреляционного анализа МЭС и продуктивности,  $X''$  – набор состояний, характеризующихся СНМ;

– разработать метод оценки влияния МЭС на продуктивность  $Y$ , с учетом концентрации элементов  $X'$ , связей между элементами  $R$ , а также динамики связей, характеризующихся неким оператором коррекции концентрации  $B$ ;

– разработать способ мониторинга МЭС биологического организма  $s \in S$  при помощи отнесения его по СНМ к определенной группе продуктивности  $p_h$ , без необходимости учета полного набора измерений  $x \in X$ ;

– разработать стратегию коррекции рациона  $D(Y/s): Y(X, R, B) \rightarrow \max$ , такую, что для каждого организма  $s$ , удои  $Y$ , зависящие от параметров концентрации  $X$ , связей  $R$  и коррекции динамики  $B$  были бы максимальными.

Итоговая концептуальная модель принятия решения для цифрового двойника приведена на рисунке 2.5.

Таким образом, проведена формализация и постановка задачи повышения производительности молочного животноводства за счет формирования рациона питания животных. Поставленная задача включает в себя такие пункты, как: формирование набора ключевых микроэлементов, оказывающих наиболее существенное влияние на метаболизм животного, метод оценки влияния состава микроэлементов на итоговую продуктивность, мониторинг состава микроэлементов на производственном цикле, а также стратегию коррекции, позволяющую оперативно добавить или вывести определенные микроэлементы из организма животных. Выполнение всех поставленных пунктов позволит повысить производительность молочного животноводства.

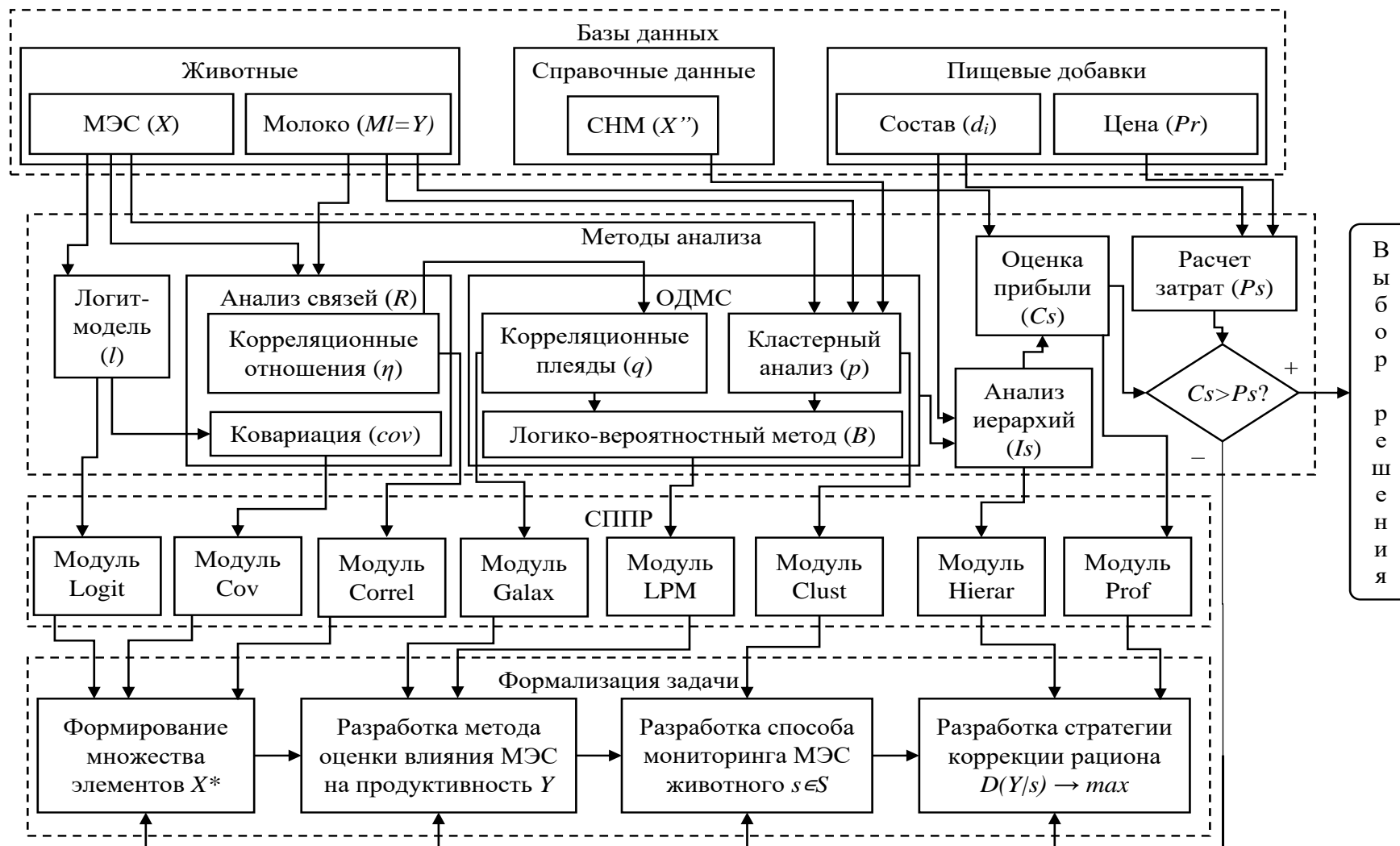


Рисунок 2.5 – Концептуальная модель принятия решения на основе цифрового двойника биотехнической системы с использованием микроэлементного статуса

## 2.6 Выводы по второй главе

1. Математическое обеспечение для решения подобных задач достаточно разнообразно, однако наиболее предпочтение отдается математическому моделированию. Применение кортежей, соотношений теории множеств и формул баланса создает основу для применения математических функции, максимизация которой и дает искомые значения. При этом необходимо учесть, что большинство подобных задач решается посредством корреляционно-регрессионного анализа, которое, однако, является достаточно ограниченным методом и поэтому для поиска зависимостей применен метод корреляционных отношений. При этом линейные модели могут быть применимы не всегда, потому выбор вида регрессии был осуществлен в пользу логистической модели.

2. Помимо математического моделирования значительная часть работы опирается на статистическое исследование. Для оценки совокупности связей между элементами применен коэффициент конкордации Кендалла. Поскольку объектов исследования может быть множество, показатели которых существенно различаются, применялся кластерный анализ для выявления групп и регулирования МЭС в рамках каждой из этих групп. Для визуализации данных и определения наиболее связанных элементов применен метод корреляционных плеяд, который доработан для лучшей наглядности. Численная оценка коэффициентов влияния оценена посредством построения логико-вероятностных моделей.

3. Обеспечение выбора альтернатив осуществлялось посредством МАИ. При этом упор делался на экономическую эффективность, рассчитанную, как увеличение удоев с животного, скорректированных на затраты кормовых добавок.

4. В рамках исследования поставленная задача повышения эффективностью функционирования биотехнической системы формализована и решается посредством управления рационом питания. В результате получена концептуальная модель принятия решений, включающая в себя все основные методы проводимого анализа.



### Глава 3. Метод и алгоритмы оценки динамики межэлементных связей микроэлементов в цифровом двойнике биотехнической системы

#### 3.1 Математическая модель оценки продуктивности с учетом нагруженности метаболизма и динамики межэлементных связей

Для поведения математического описания МЭС организма животных и составления моделей для дальнейшего их применения в оценке и коррекции СНМ (в том числе с применением ультрадисперсных частиц), подробно рассмотрим молочное животноводство как производственный процесс [85]. Возможность подобного исследования predetermined в предыдущих разделах исследования, посредством проведения комплексного системного анализа, а также постановки и формализации задачи повышения эффективностью функционирования биотехнической системы за счет управления формированием рациона питания посредством коррекции данных МЭС в рамках создания отдельной ЦД БТС.

Для математического описания данных ЦД в первом приближении приведена структурированная модель данных, имеющая вид:

$$M = \langle H, S, X, Y \rangle. \quad (3.1)$$

где  $H = \{h_1, \dots, h_k\}$  – множество стад;

$S = \{s_1, \dots, s_d\}$  – множество животных;

$X = \{X_{ij} | i \in [1;n], j \in [1;m]\}$  – множество состояний МЭС ( $m_i$  – количество заборов анализа  $i$ -го животного);

$Y = \{y_1, \dots, y_n\}$  – множество удоев на одно животное.

Ключевым продуктом молочного производства является молоко  $Ml$ . Показатель молока  $Ml$  для любого молочного производства в количественном отношении зависит исключительно от удоев  $Y$ , иначе говоря  $Ml \equiv Y$ . Каждое

молочное хозяйство, производящее молоко, стремится как можно больше нарастить свои удои, поэтому  $Y \rightarrow \max$ .

Определено, что существует состояние, при котором состав ключевых элементов  $X_o$  является оптимальным. Оптимальный состав  $X_o$  обеспечивает наилучшую продуктивность  $Y$  [63]. Тогда для достижения максимальной продуктивности достигается при следующем соотношении:

$$X \rightarrow X_o = (x_1, x_2, \dots, x_{25}) \rightarrow (x_{o1}, x_{o2}, \dots, x_{o25}). \quad (3.2)$$

Поскольку каждый элемент определяется его концентрацией, то справедливо предполагать, что существует некоторое  $\Delta x_i = x_{oi} - x_i$ . Разности всех значений  $\Delta x$  также могут быть выражены в виде вектора значений:

$$\Delta X = (\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_{25}). \quad (3.3)$$

Поскольку состав микроэлементов в организме животных весьма существенно изменчив, то необходимо говорить его величине как о  $X_t$  на конкретный момент времени  $t$ .

Противовесом оптимальному составу элементов служит состояние нагруженного метаболизма, когда МЭС в значительной степени отличается от выявленных оптимальных значений  $X_{opt}$ . Несмотря на то, что нагруженный метаболизм – это достаточно устоявшийся термин, на сегодняшний день не существует его строгого формализованного математического описания, которое необходимо представить с целью дальнейшего использования в диссертационной работе.

Пусть  $G_m$  – степень нагруженности метаболизма (вне зависимости от способа расчета данного показателя). Поскольку нагруженность метаболизма является одной из ключевых причин снижения удоев животного  $Y$ , то справедливым будет соотношение:

$$Y = -kG_m, \quad (3.4)$$

при условии, что и  $Y$ , и  $G_m$  – функции,  $k$  – неизвестный коэффициент.

Для оценки МЭС животного используются анализы биосубстратов, МЭС которых  $X_b \equiv X_t$ . Элементы в организм животного могут поступать разными путями (через воду, воздух, корм и другими путями), однако пути их поступления не являются задачей исследования [78].

Выбытие элементов также может быть связано с различными биологическими процессами, проистекающими в организме различных животных.

Механизмы обмена веществ в живых организмах изучены недостаточно хорошо для того, чтобы определить все прочие факторы оказывающие принципиальное влияние на изменение МЭС, помимо баланса поступления и выбытия [51]. Потому окончательная функция зависимости удоев от микроэлементов примет вид:

$$Y = k \cdot f(X_{t-1} + X_e - X_r | X_t \rightarrow X_o) \rightarrow \max. \quad (3.5)$$

Однако необходимо учитывать, что зависимость удоев от МЭС на момент времени может не иметь строгой оценки, и меняться в зависимости от разнообразных причин, связанных с другими факторами, которые влияют на живую систему, как например случайное поступление в организм наночастиц химических элементов [16].

Проведенный литературный обзор по вопросам исследования микроэлементного статуса позволил выявить следующую проблему: связи между элементами при изменении их концентрации нестабильны, так как корреляционные отношения изменяются совместно с изменением микроэлементного состава. Иначе говоря,  $r \neq \text{const}$ .

Учитывая (2.1-2.10), от корреляции  $r$  зависят коэффициенты  $a_i$ , значение функции  $f(X_t)$  и, соответственно удои  $Y$ , потому указанная проблема нестабильности связей означает невозможность построения стандартных регрессионных уравнений.

Формализуем схему взаимодействия, указанную на рисунке 1.16. Взаимодействие описывается между тремя элементами: наружностью метаболизма  $G_m$ , продуктивностью (удоями)  $Y$  и связями, в качестве которых может быть использована матрица коэффициентов корреляции  $R$ . Соотношение (2.6) описывает взаимодействие удоев и нагруженности метаболизма, добавив к нему связи между элементами, получим:

$$Y = -RG_m. \quad (3.6)$$

Данное преобразование позволяет из формулы (3.4) устранить коэффициент  $k$ .

Проведенные соотношения показывают взаимозависимость между факторами, обеспечивающими продуктивность молочного животноводства, а также определяет возможность управления эффективностью функционирования биотехнической системы посредством направленного и последовательного изменения рациона питания животных. При этом, оценка микроэлементного статуса животных может быть использована при оценке продуктивности, за счет взаимосвязи микроэлементов в организме и итоговой продуктивности животноводства [115].

Для формализации схемы управления продуктивностью адаптируем соотношение (2.8). Обозначим сумму поступающих и выбывающих элементов  $X_e + X_k = \Delta X$ , а элементы, которые добавляются в корм для корректировки МЭС –  $X_c$ . Тогда соотношение примет вид:

$$Y = f(X_{t-1} + \Delta X + X_c | X_t \rightarrow X_o). \quad (3.7)$$

Принимая во внимание, что значение известно  $X_{t-1}$ , а значение  $\Delta X$ , как правило, достаточно постоянно  $\Delta X = \text{const}$ , то задача повышения удоев  $Y$  сводится к нахождению такого  $X_c$ , чтобы  $X_t \rightarrow X_o$ .

Однако принимая во внимание соотношение (3.6), значение  $X_c$  не может быть постоянным, поскольку непостоянны значения матрицы корреляции  $R$ . Принимая во внимание уравнения (2.4) и (2.8-2.10), матрицу  $R$  можно выразить следующим отношением:

$$R = g(X_t). \quad (3.8)$$

Для функции  $g(X_t)$  справедливо отношение (2.3), то есть:

$$g(X_t) = g(X_{t-1} + \Delta X + X_c | X_t \rightarrow G_m). \quad (3.9)$$

Исходя из соотношения (3.6), для достижения функцией  $g(X_t)$  состояния  $X_t \rightarrow X_o$ , необходимо взять ее с обратным знаком:

$$-g(X_t) = -g(X_{t-1} + \Delta X + X_c | X_t \rightarrow X_o). \quad (3.10)$$

Раскрывая значения матрицы  $R$  и функцию МЭС через состояние баланса элементов, получим следующее соотношение:

$$Y = [-g(X_{t-1} + \Delta X + X_c) \cdot f(X_{t-1} + \Delta X + X_c) | X_t \rightarrow X_o]. \quad (3.11)$$

Все элементы уравнения  $X_{t-1}$ ,  $\Delta X$ ,  $X_c$  – векторы, значения которых может быть скорректировано соответствующими матрицами коэффициентов. Исходя из этого из формул (2.6-2.10), очевидно, что при изменении значений управляющего фактор-вектора  $X_c$ , изменятся и коэффициенты матрицы  $R$ , поскольку изменится и функция  $g(X_t)$ .

Таким образом, задача коррекции МЭС в ЦД БТС для повышения продуктивности производства молока сводится к нахождению определенных сочетаний микроэлементов в организме животных, при которых продуктивность становится максимальной.

На этапе анализа поставленной задачи из всего множества вариантов МЭС необходимо определить точный перечень наиболее вероятных состояний организма животного. Коррекция МЭС при этом призвана улучшить состояние метаболизма животного с определенной вероятностью и в определенный период времени.

Как уже говорилось, поскольку состав микроэлементов изменчив, то необходимо говорить о его концентрации как о  $X_t$  на конкретный момент времени  $t$ . Стоит учесть, что измерение МЭС животного проводится с определенной периодичностью, что позволяет проводить оценку времени дискретно, с шагом, равным данной периодичности. Также определено, что существует некоторая оптимальная концентрация элементов  $X_{opt}$ , которая обеспечивает наилучшую продуктивность животных, выраженную в количестве удоев  $Y$  [10].

В этом случае задача управления эффективностью функционирования биотехнической системы сводится к трем составляющим:

- оценка концентрации микроэлементов в организме животного  $X_t$ ;
- определение оптимальной концентрации МЭС животного  $X_{opt}$ ;
- определение способа влияния на те или иные элементы с целью приведения их концентрации к оптимальной  $X_t \rightarrow X_{opt}$ .

Первая подзадача решается через анализ биосубстратов животных лабораторным способом. Вторая подзадача представляет собой оценку СНМ: чем ниже СНМ, тем более приближено значение  $X_t$  к  $X_{opt}$ . В настоящее время существует справочная литература, указывающая нормы значений МЭС для низкого СНМ.

Оставшейся подзадачей в рамках общей задачи управления эффективностью является определение способа влияния на элементы с целью приведения их к оптимуму. Для увеличения концентрации конкретного элемента  $x_i$  в животном применяется добавка, содержащая данный элемент  $x_i$  или же элементы-протагонисты для  $x_i$ , которые способствуют его накоплению в организме.

Для снижения концентрации элемента  $x_i$  из добавок убирается данный элемент, а также применяются элементы-антагонисты  $x_i$ , способствующие

выведению указанного элемента из организма молочных животных. Список протагонистов и антагонистов для каждого элемента также существует в специализированных справочниках по биоэлементологии. Однако вопрос необходимой концентрации элементов для коррекционных целей до конца не решен [117].

Таким образом в результате анализа модели управления определено, что для максимизации продуктивности молочного животноводства необходимо оценить МЭС животного, выявить нормы значений МЭС для низкого СНМ, подобрать элементы-протагонисты и элементы-антагонисты для каждого из элементов, подлежащих коррекции и определить величину необходимой концентрации элементов для коррекционных целей.

Поскольку в рамках анализа было определено, что существует и известен оптимальный размер концентрации элементов  $X_{opt}$ , то в данном случае синтез управления призван решить обратную задачу – поиск множества допустимых управлений, переводящих организационную систему в заданное состояние. Соответственно существует некое  $\Delta X = X_t - X_{opt}$ , и в таком случае необходимо решить обратную задачу – поиск множества допустимых управлений, переводящих систему в заданное состояние [4].

Обобщенная модель имеет вид:

$$\Delta X_t = \arg \max Y(X_t). \quad (3.12)$$

Однако, поскольку точное решение невозможно ввиду стохастичности поставленной задачи, то данное соотношение (3.12) преобразуется в:

$$X_{opt} = \arg \max P_Y(X_t). \quad (3.13)$$

Необходимо найти  $X_{opt} \in X_t^+$  при ограничениях  $D_u(X_{opt}) \leq D_a$ .

При этом  $X_t$  – вектор, характеризующий концентрацию элементов;

$X_t^+$ ,  $X_{opt}$  – допустимое и оптимальное значение вектора  $X_t$ ;

$P_Y$  – вероятность достижения максимальной продуктивности;

$D_u, D_a$  – расчетное и допустимое расходование элементов (протагонистов и антагонистов) для целей корректировки.

Для решения данной задачи необходимо сформировать показатель эффективности подбора оптимального МЭС. Исходя из полученного соотношения, этот показатель характеризует вероятность  $P_Y$ , которая должна обеспечивать необходимый уровень удоев  $Y$ .

Установим вид зависимости  $P_Y$  от  $X_t$ . В данном случае зависимость приближена к нормальному распределению вероятностей, поскольку с возрастанием концентрации элементов покрывается их недостаток в организме, затем идет зона нормы, а следом – снижение вероятности продуктивности за счет перегрузки метаболизма (рисунок 3.1).

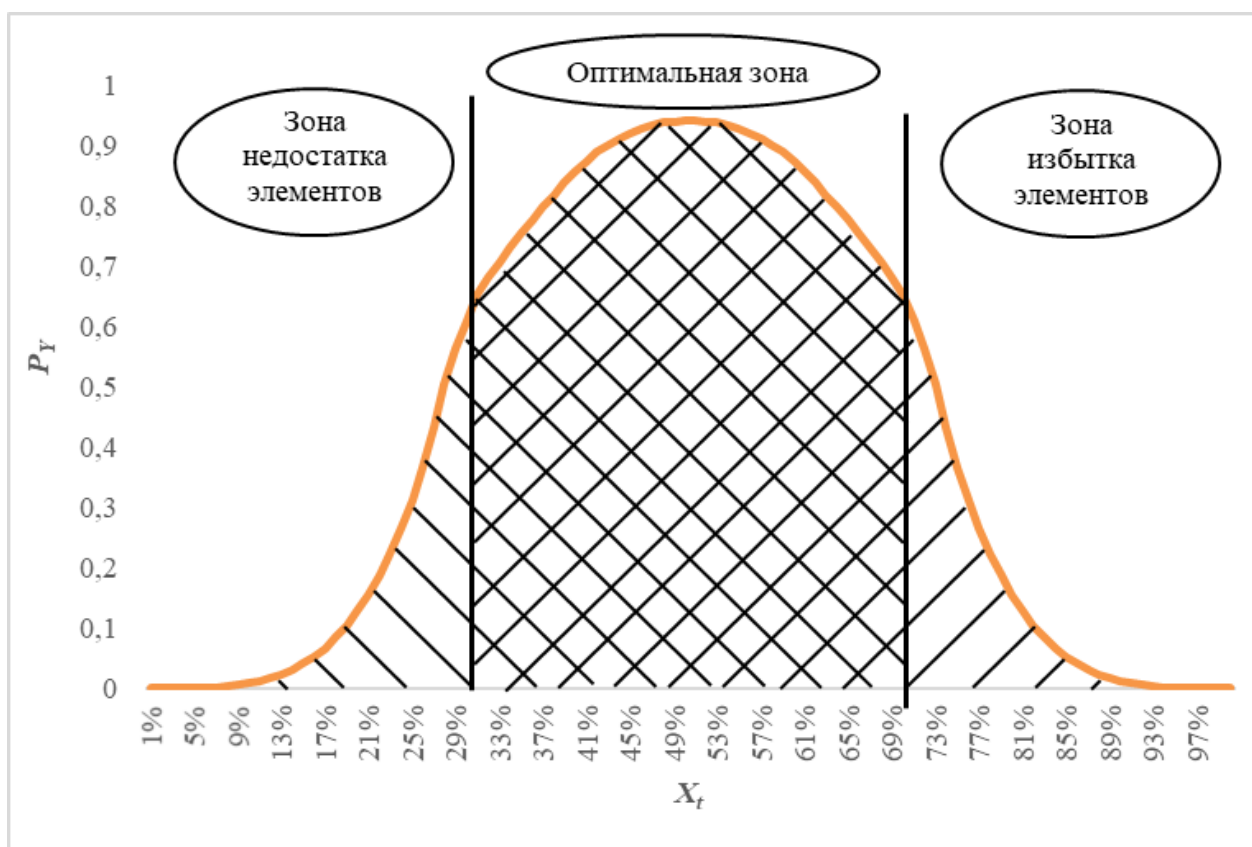


Рисунок 3.1 – График зависимости  $P_Y$  от  $X_t$ .



В данном случае зависимость приближена к нормальному распределению вероятностей, с возрастанием вероятности оптимального значения совместно со значением концентрации и далее, при превышении степени нагруженности метаболизма вероятность достижения максимальной продуктивности существенно снижается.

Исходя из проведенного на предыдущем этапе анализа модели управления продуктивностью, вероятность данной продуктивности декомпозируется на три составляющие:

$$P_Y = P_{X_t} \cdot P_{X_{opt}} \cdot P_{X_t \rightarrow X_{opt}}. \quad (3.14)$$

где  $P_{X_t}$  – вероятность верной оценки концентрации элементов в организме животного;  $P_{X_{opt}}$  – вероятность определения оптимальной концентрации элементов в животном;  $P_{X_t \rightarrow X_{opt}}$  – вероятность определения способа влияния на те или иные элементы.

Наиболее значимым множителем в данном случае является  $P_{X_t \rightarrow X_{opt}}$ , поскольку первые два множителя многократно исследованы и подтверждены в специальной литературе [3].

Влияющим фактором на вероятность определения способа межэлементного влияния также является концентрация элементов  $X_t$ . В этом случае вероятность  $P_{X_t \rightarrow X_{opt}}$  определяется следующей зависимостью:

$$P_{X_t \rightarrow X_{opt}} = F(X_t). \quad (3.15)$$

Таким образом, все значения, обуславливающие вероятность достижения максимальной продуктивности связаны с концентрацией элементов, отображенных в ЦД БТС. Тогда задача повышения эффективности функционирования БТС сводится к нахождению сочетаний МЭС в организме животных, при которых продуктивность становится максимальной.

Следующим этапом данного исследования является изучение устойчивости полученного ранее решения, иначе говоря, осуществление подбора такой концентрации МЭС, которая обеспечивала бы вероятность максимальной продуктивности  $P_y$ . Решение данной задачи позволит выявить все необходимые коэффициенты, входящие в уравнение, максимизирующее удои, в том числе те, которые отвечают за динамику микроэлементов.

Проведя все предварительные этапы определения зависимости, оценки предметной области, выявления влияния микроэлементов на удои и на другие микроэлементы, необходимо привести полученные результаты к строгому математическому описанию. Для этого необходимо разработать конкретизированную математическую модель, которая содержала бы в себе удои, нагруженность метаболизма, а также состав микроэлементов, их связи и динамику данных связей, которые оказывают влияние на конечную продуктивность.

С этой целью необходимо формализовать полученные ранее результаты, и далее сопоставить показатель эффективности функционирования БТС с последствиями корректировки МЭС, при учете изменения динамики связей между всеми ключевыми элементами. Для построения подобных моделей необходимо применять разнообразные методы математического преобразования, позволяющие определять взаимное соотношение различных параметров и показателей между собой [21]. Это позволит определить степень взаимного влияния элементов друг на друга в организме животного, отследить динамику их изменения и, в дальнейшем, сформировать такой управляющий поток элементов, который смог бы повысить продуктивность животных.

Приведем формализованное описание модели эффективности функционирования БТС на основе коррекции МЭС, которая позволила бы оказывать управляющее воздействие на удои. Определено, что количество удоев животного зависит от его МЭС и связями между элементами  $R$ , то есть данное соотношение можно представить в виде функции:

$$Y = f(X_t, R, B) \rightarrow \max, \text{ при } X_t \rightarrow X_{opt}, \quad (3.16)$$

где  $X_t$  – концентрация МЭС на период времени  $t$ ;

$R$  – связи между элементами;

$B$  – оператор корректировки концентрации МЭС.

Указанная формализованная модель эффективности сведена к трем параметрам – концентрации МЭС, связям между элементами и оператору корректировки концентрации. Определение конкретных значений каждого из обозначенных параметров даст единственное верное решение относительно корректировки МЭС, что в свою очередь позволит принять решения относительно различных пищевых добавок при дальнейшем формировании рациона молочных животных.

Поскольку корреляция представляет собой относительный показатель, то функция  $F(\text{cov})$  может быть представлена в виде мультипликативного соотношения:

$$F(\text{cov}) = \text{cov}(x_i, x_j) b_{ij}. \quad (3.17)$$

Окончательная формализованная модель продуктивности животного с учетом связей между элементами примет следующий вид:

$$l(a) \text{cov}(x_i, x_j) b_{ij} + \lambda = 0. \quad (3.18)$$

Таким образом, в результате проведенных математических преобразований, получена формализованная математическая модель оценки эффективности функционирования БТС, которая позволяет оценивать продуктивность с учетом нагруженности метаболизма и динамики межэлементных связей, что в свою очередь позволяет определить элементы и дозы, необходимые к добавлению или изъятию из организма.

### **3.2 Разработка метода и алгоритмов оценки динамики межэлементных связей**

Для повышения эффективности функционирования БТС путем коррекции показателей в ЦД БТС необходимо оценивать изменяемость связей МЭС в организме животных. Разработанная в предыдущих разделах модель (3.17) имеет неизвестный показатель  $B$ , определение которого позволит полностью решить поставленную задачу коррекции МЭС животного. Поскольку точное решение задачи на данном этапе невозможно ввиду неизвестности ключевого коэффициента, необходимо получить оценочное решение, посредством различных оценок.

Сбор данных проводился на базе ФНЦ БСТ РАН в период с 2016 по 2022 годы. Оценке подвергались взрослые животные различных пород в разных хозяйствах, что позволило исключить влияние фактора породы и места обитания животных [113].

Оценка проведена на совокупных данных ( $N=575$ ) по хозяйствам с различной СНМ, для чего выделено пять степеней нагруженности от сверхвысокой до сверхнизкой [120]. Данное разделение соответствует квинтильному разделению показателей, которое, наряду с квартильным, достаточно часто применяется в биологических и сельскохозяйственных исследованиях. Различия между степенями оценивались посредством непараметрического коэффициента Манна-Уитни, все выделенные степени нагруженности имеют статистически значимое различие ( $p \leq 0,05$ ) [106].

Ранее уже неоднократно проводилась оценка зависимости удоев молочных животных от степени нагруженности метаболизма (отчет по НИР АААА-А19-119040290036-3 «Разработка фундаментальных подходов к созданию перспективных пород и кроссов, организации индивидуального мониторинга состояния высокопродуктивных животных на основе новых знаний о генотипе животных с различным метаболизмом и эффективностью поддержания гомеостаза»), 2019 год.

Распределение расчетных средних значений удоев по СММ отражены на рисунке 3.2.

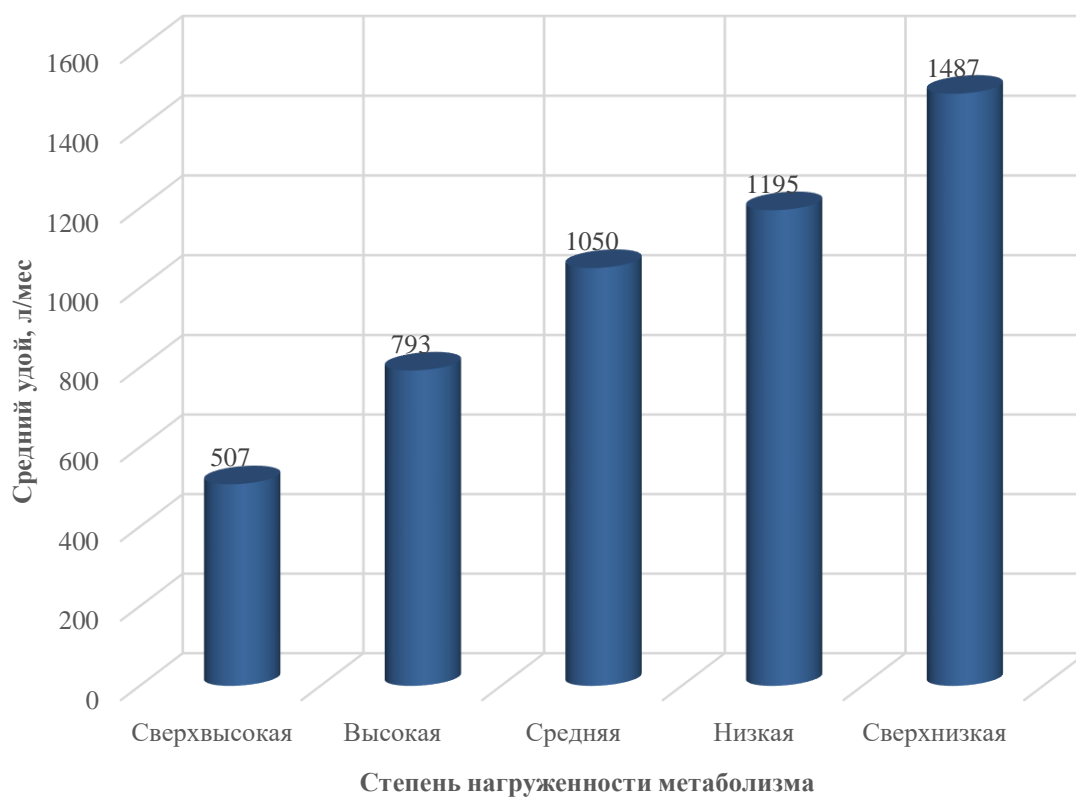


Рисунок 3.2 – Распределение средних значений удоев по степени нагруженности метаболизма

Согласно данным рисунка 3.2, различие в удоях между сверхвысоким и сверхнизким значением нагруженности метаболизма достигает почти трехкратного размера.

Таким образом, прослеживается четкая обратная связь между показателями нагруженности метаболизма и значением удоев. Корректировка метаболизма позволит существенно повысить продуктивность молочного животноводства.

Расчет скользящего среднего для коэффициента конкордации позволил отследить динамику изменения взаимосвязей в животных по СММ. В исследуемой динамике выделено пять областей, составляющая каждая 20% от общей

совокупности, что соответствует квинтильному распределению показателей (рисунок 3.3).

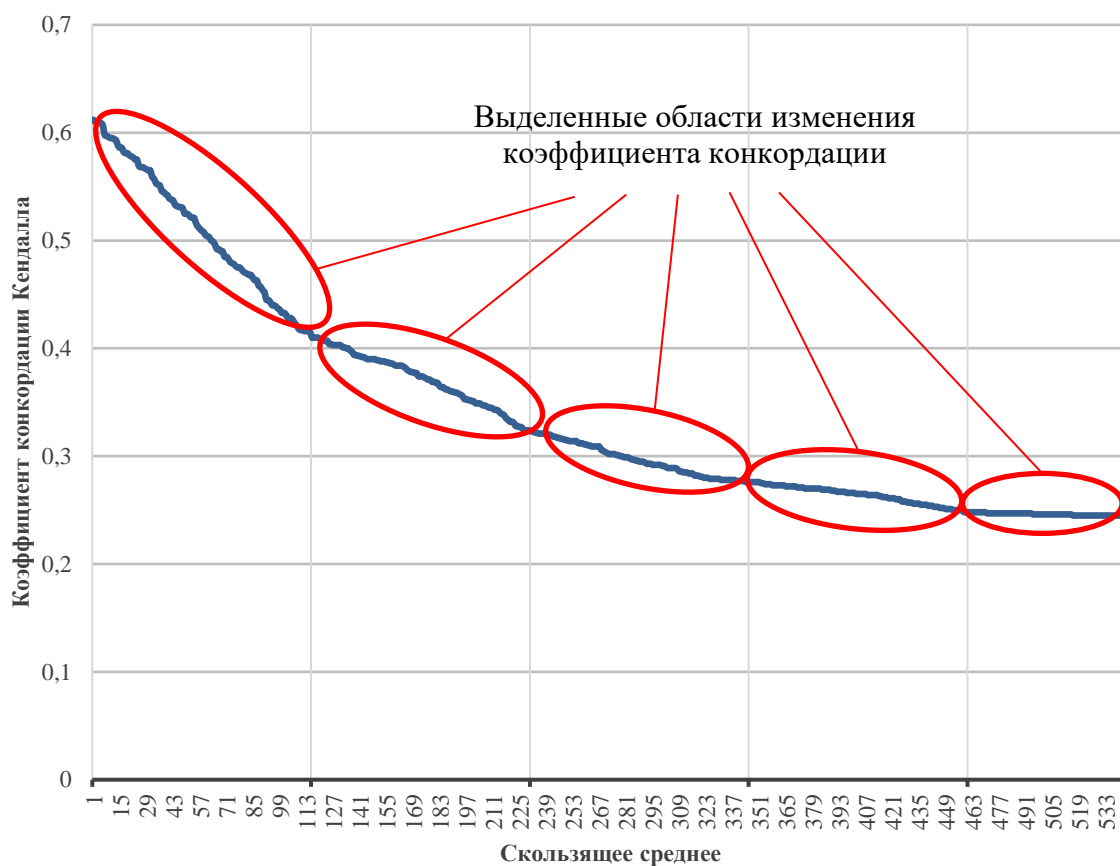


Рисунок 3.3 – Изменение коэффициента конкордации в зависимости от нагруженности метаболизма, с выделенными областями

Согласно рисунку 3.3 распределение областей соответствует ранее составленной градации степеней метаболизма от сверхвысокого до сверхнизкого уровня. Помимо этого, каждая из этих областей может быть приближенно описана линейной функцией, что облегчает дальнейшие расчеты.

Далее необходимо провести сопоставление полученных областей в скользящем среднем значении коэффициента конкордации и выделенных групп животных по СНМ. Это позволило отследить динамику изменения взаимосвязей в животных.

В исследуемой динамике все выделенные области соответствуют СНМ животных (рисунок 3.4).

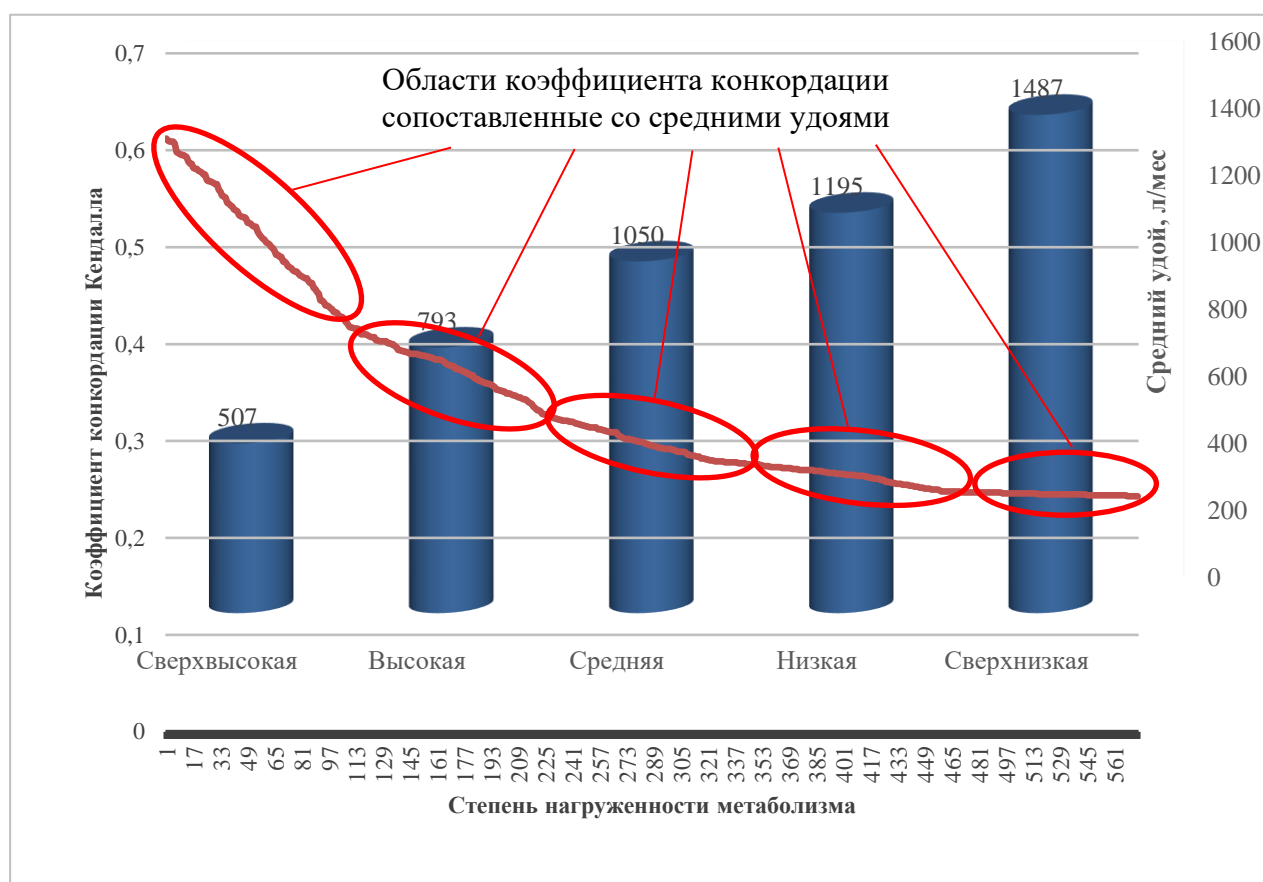


Рисунок 3.4 – Изменение коэффициента конкордации в зависимости от степени нагруженности метаболизма, с выделенными областями, сопоставленная с удоями

Из рисунка 3.4 очевидно, что коэффициент конкордации имеет явно выраженную зависимость от СНМ. Рассчитанные значения скользящих средних отображают снижение конкордации элементов в зависимости от СНМ.

Таким образом, в рамках проведенного исследования очевидна взаимосвязь между СНМ и конкордацией. Выделенные области равны по абсолютному размеру, что дает возможность масштабировать полученные отношения и на более крупные выборки. Каждая из выделенных областей может быть описана линейной функцией, что облегчает дальнейшие расчеты.

С целью поиска неизвестных коэффициентов математической модели (3.17) для повышения эффективности формирования рациона питания животных и с учетом имеющейся информации о поведении взаимных связей в зависимости от СНМ, необходимо разработать метод оценки динамики межэлементных связей (ОДМС).

Обобщенная структура анализа, необходимого для формирования рациона питания, включает в себя три метода:

- кластерный анализ;
- метод корреляционных плеяд;
- логико-вероятностный метод.

Первый этап предполагает проведение кластерного анализа. В предыдущих разделах уже проведено распределение на группы по параметру СНМ. В этом случае кластеризация проводилось путем дискриминации по признаку нагруженности. Это позволило выявить пять групп, каждая из которых значительно отлична от другой по показателю продуктивности и дает возможность выявления ключевых элементов в каждой из выделенных подгрупп.

Однако, помимо СНМ, для исследования представляют интерес микроэлементы, влияние которых особенно прослеживается на каждом из выявленных кластеров по СНМ. Определение данных элементов позволяет определить, какие методы необходимо принять для каждой их групп нагруженности метаболизма и разработать эффективную стратегию коррекции МЭС животных с целью увеличения конечной продуктивности молочного производства [70].

Для этих целей для каждой из пяти выявленных групп были определены микроэлементы, чей вклад в СНМ оказался наибольшим. Сами элементы, как правило, оказывались много выше или ниже нормальных значений МЭС, приведенных в нормативных справочниках.

Результат кластерного анализа по СНМ и конкретным элементам приведен на рисунке 3.5.



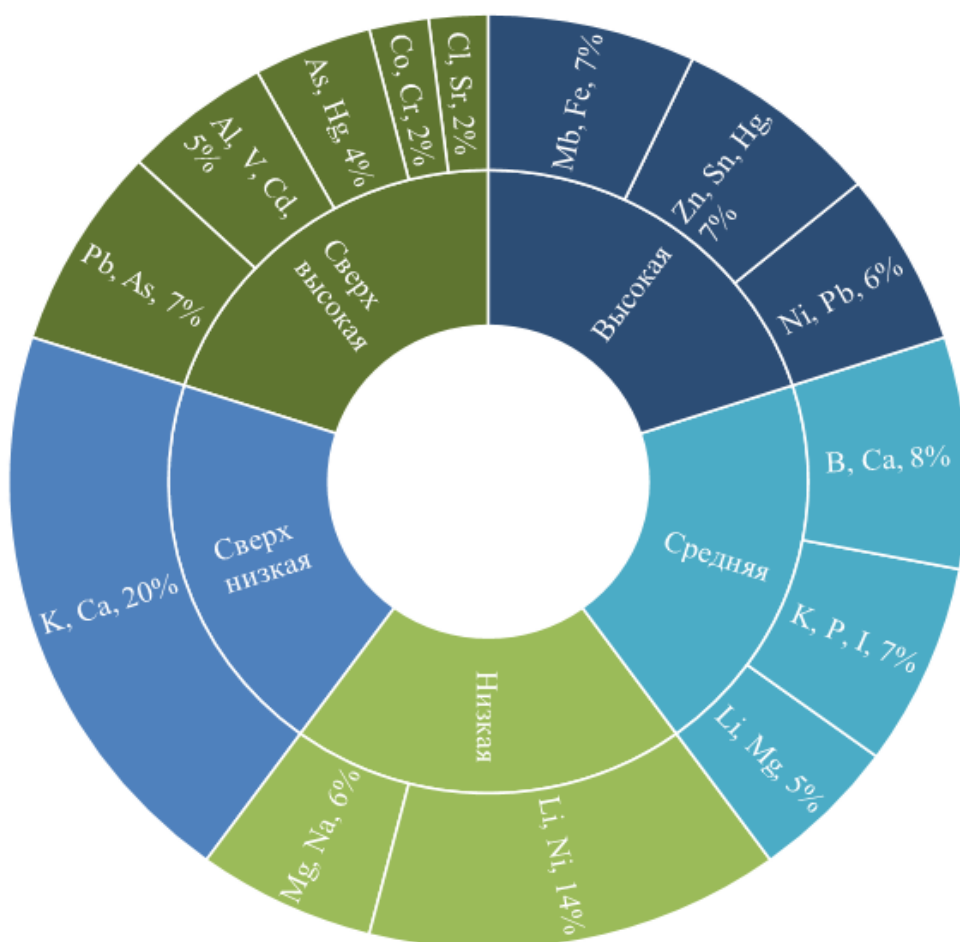


Рисунок 3.5 – Кластерный анализ по параметрам степени нагруженности метаболизма и превышения концентрации отдельных элементов

Для каждой группы по СНМ выявлено разное количество групп (от одной до пяти) из двух-трех элементов, вклад которых в скорость метаболических реакций является определяющим для кластера [125]. Определено, что с ростом СНМ увеличивается и количество микроэлементов, ответственных за нагрузку метаболизма, что подтверждает деланные ранее расчеты, касающиеся роста значимости и количества межэлементных связей совместно с нагрузкой на метаболизм.

Таким образом, проведенный кластерный анализ позволил не только определить различные независимые группы животных в соответствии с их СНМ, но и выявить те группы взаимосвязанных элементов, которые оказывают ключевое влияние внутри каждого кластера.

Полученные результаты оценивания сложны для интерпретации, так как количество элементов достаточно велико. Связи между элементами динамичны и с изменением концентрации элементов отображение пледы также изменяется. Поскольку существует прямая зависимость между СНМ и связями между элементами (см. рисунок 3.4), то при снижении нагрузки связи начинают ослабевать, а ядра и периферия распадаться (рисунок 3.6).

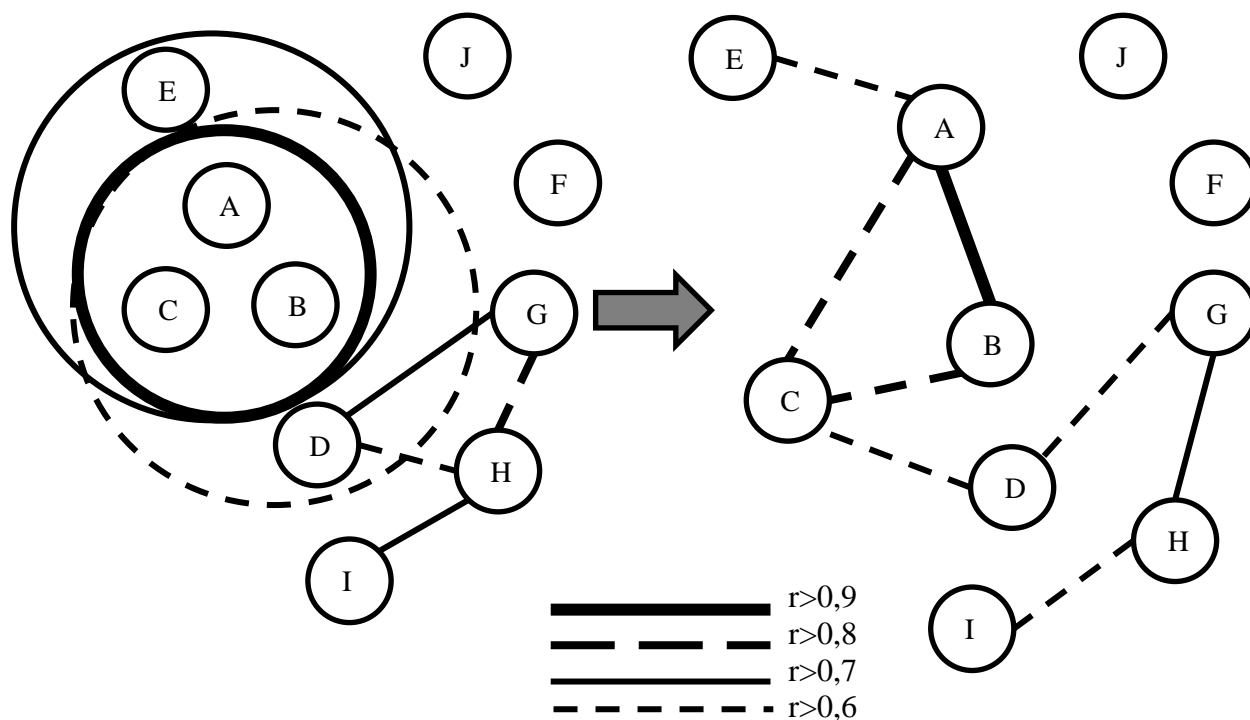


Рисунок 3.6 – Ослабление связей и распада ядра и периферии в корреляционной плееде

На рисунке 3.6 отображено изменение связей в корреляционной плееде: отчетливо видно, как ядро элементов А, В, С распалось на элементы с разными связями, исчезла периферия, существенно ослабли остальные связи.

Изменение отображения корреляционных плеед позволяет оценить дальнейшее изменение каждого элемента относительно другого, что дает возможность визуально отслеживать динамику изменений связей между элементами.

Для построения основных связей в корреляционной плеяде разработан алгоритм, приведенный на рисунке 3.7.

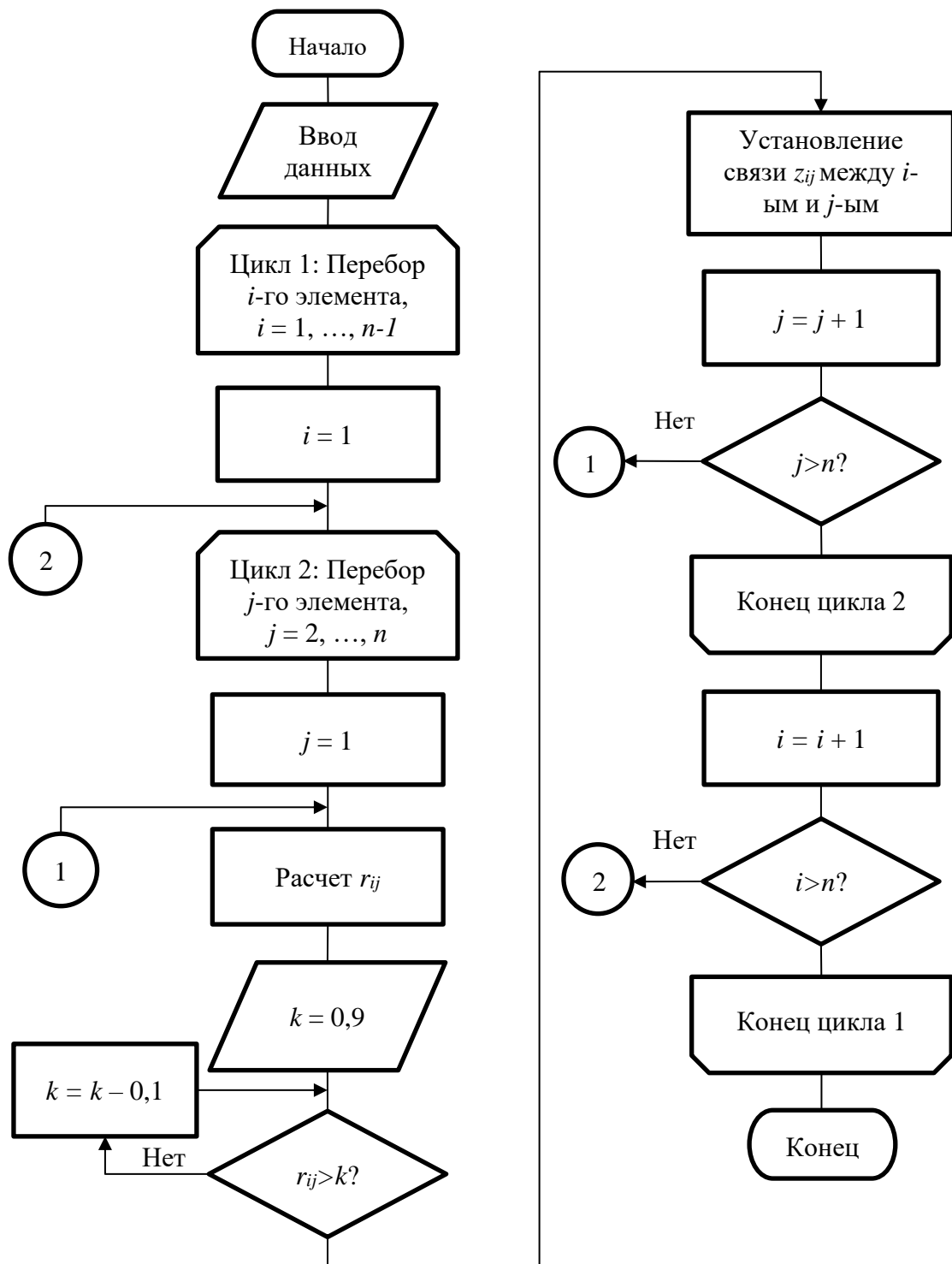


Рисунок 3.7 – Блок-схема алгоритма построения основных связей корреляционной плеяды

Данный алгоритм, приведенный на рисунке 3.7, позволяет отобразить все связи в плеяде.

Для построения ядра и периферии в корреляционной плеяде разработан алгоритм, приведенный на рисунке 3.8.

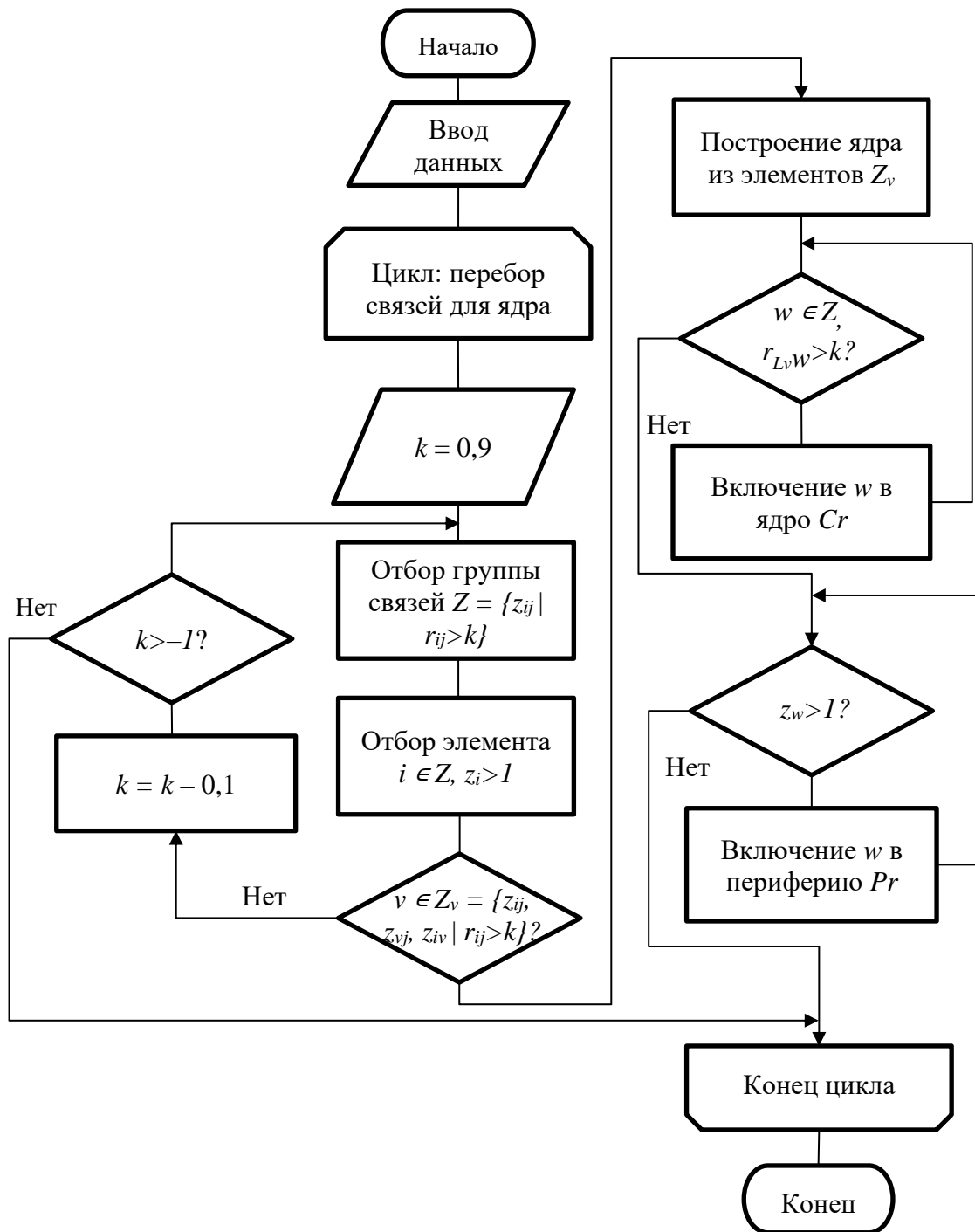


Рисунок 3.8 – Блок-схема алгоритма построения ядра и периферии корреляционной плеяды

Алгоритм на рисунке 3.8 позволяет построить ядро и периферию корреляционной плеяды для облегчения визуального контроля за динамикой связей между микроэлементами.

Основное назначение плеяд – определение степени изменения взаимосвязей. Учитывая множественные внутренние связи построение стандартной регрессионной модели не представляется возможным ввиду мультиколлинеарности.

При оценивании связей в плеядах необходимо руководствоваться следующими положениями:

- внутри каждого ядра связи принимаются одинаково сильными, конкретные значения вычисляются посредством применения формул;
- внутри периферии оценка связей осуществляется аналогично оценки внутри ядра корреляционных отношений;
- связи между ядром и периферией оцениваются как связи внутри периферии;
- элементы, не входящие ни в состав ядра, ни в состав периферии оцениваются по влиянию связующего элемента.

Получение коэффициентов корреляционных отношений необходимо для нивелирования изменчивости регрессионных уравнений, которые строятся далее, после получения необходимых корректирующих значений для каждого коэффициента. Получение коррекционных отношений дает возможность определить точные значения концентраций элементов, вычислить необходимые дозы корректировки микроэлементного статуса и снижение нагрузки метаболизма.

Таким образом, раскрыт и доработан метод корреляционных плеяд, посредством выделения ядра и периферии; данный метод позволяет выполнять визуальную оценку изменения взаимных связей между элементами. Для облегчения применения метода разработаны соответствующие алгоритмы построения основных связей, ядра и периферии.

Далее необходимо использовать логико-вероятностный метод, который позволяет интерпретировать связи в образованных корреляционных плеядах. Для любых логико-вероятностных уравнений, определенных для корреляционных плеяд, справедливо снижение показателя вероятности при увеличении общего количества связанных элементов. Межэлементные связи, как это было показано выше, тем теснее, чем больше связанных элементов, входящих в корреляционную плеяду. Это означает, что количество связей компенсирует их тесноту, что предполагает наличие некоего предела коэффициента полного покрытия  $q_i$ .

Для наглядности описанного свойства приведем конкретизированный пример расчета коэффициента полного покрытия для конкретного элемента (кальция) при трех видах нагруженности метаболизма: сверхвысокой, средней и сверхнизкой  $q_{ca}$ .

Для этого составим корреляционные плеяды для всех трех случаев (рисунок 3.9).

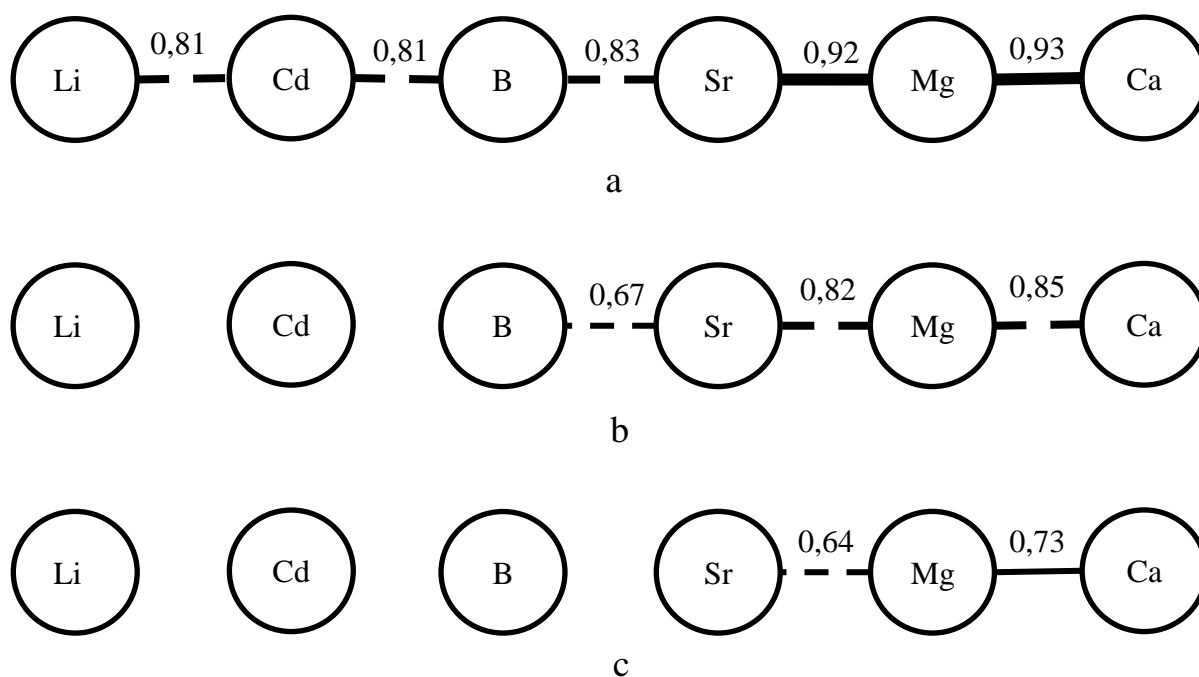


Рисунок 3.9 – Корреляционные плеяды для кальция при а) сверхвысокой, б) средней и в) сверхнизкой степени нагруженности метаболизма

Приведем расчет для каждого из случаев:

$$\begin{cases} q_{Ca\uparrow\uparrow} = 0,81 \cdot 0,81 \cdot 0,83 \cdot 0,92 \cdot 0,93 = 0,466 \\ q_{Ca0} = 0,67 \cdot 0,82 \cdot 0,85 = 0,467 \\ q_{Ca\downarrow\downarrow} = 0,64 \cdot 0,73 = 0,467 \end{cases} .$$

Проведенные расчеты позволили выявить, что несмотря на изменение количества связей между элементами, коэффициент  $q_i = const$ , так как снижение количества связей компенсируется совокупным снижением взаимной корреляции между элементами. Для каждого микроэлемента был получен собственный коэффициент покрытия  $q_i$ . Далее была проведена оценка изменения коэффициента корреляции между удоями и конкретными микроэлементами для каждой из выделенных квинтальных групп СНМ.

На рисунке 3.10 графически представлены коэффициенты корреляции между удоями и некоторыми элементами.

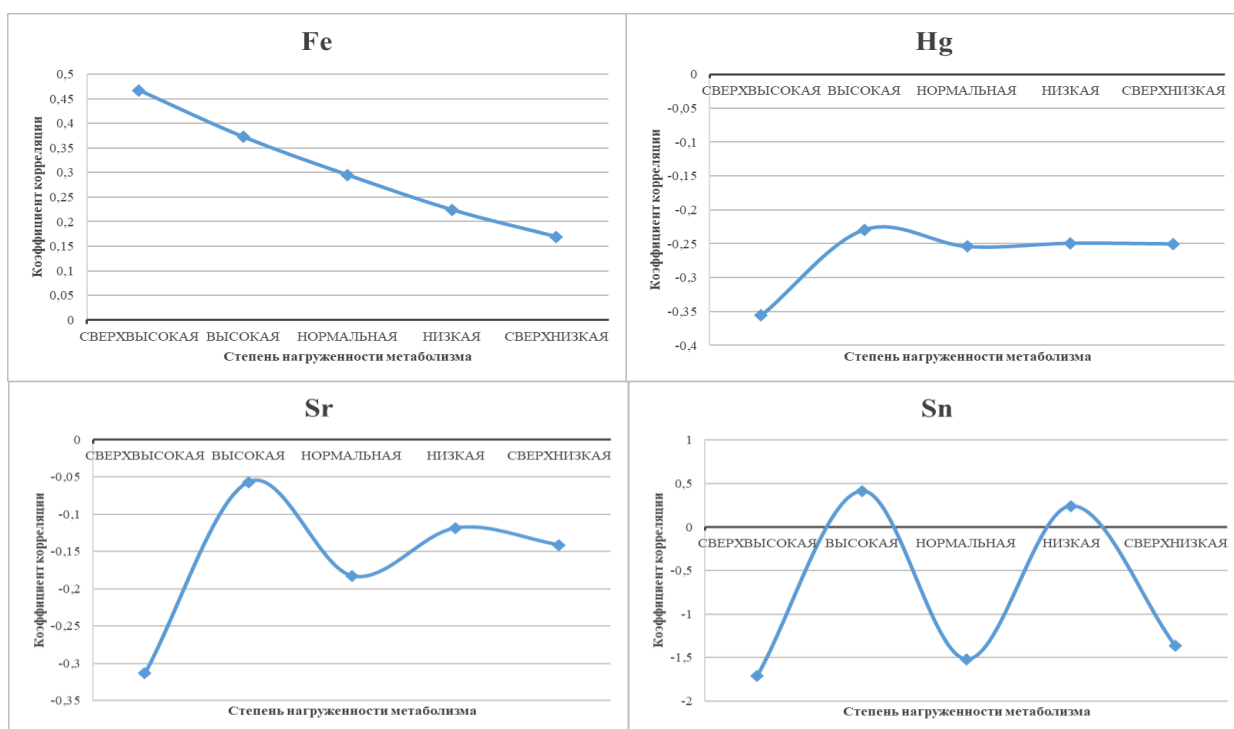


Рисунок 3.10 – Оценка изменения коэффициента корреляции между удоями и элементами для каждой из групп степени нагруженности метаболизма

Анализ динамики коэффициентов на рисунке 3.10 позволил подобрать аппроксимирующее уравнение с высокой степенью достоверности ( $>0,95$ ):

$$B = \eta_i \frac{[p_h q_i - (1 - p_h q_i)] + 1}{2}. \quad (3.19)$$

где  $\eta_i$  – частный коэффициент корреляционного отношения элемента;  
 $p_h$  – уровень нагруженности метаболизма по шкале от 1 до 5;  
 $q_i$  – коэффициент покрытия элемента.

Коэффициенты  $\eta$  и  $q$  определены эмпирическим путем для каждого элемента, СНМ метаболизма  $p$  может быть определен непосредственно по концентрации элементов. Частные коэффициенты  $b_{ij}$ , необходимые для решения уравнения (3.17) определяются из уравнения (3.19), при условии, что  $j$  характеризует удои.

Для реализации разработанного логико-вероятностного метода оценки маршрутов по связям в корреляционных плеядах разработан алгоритм, приведенный на рисунке 3.11.

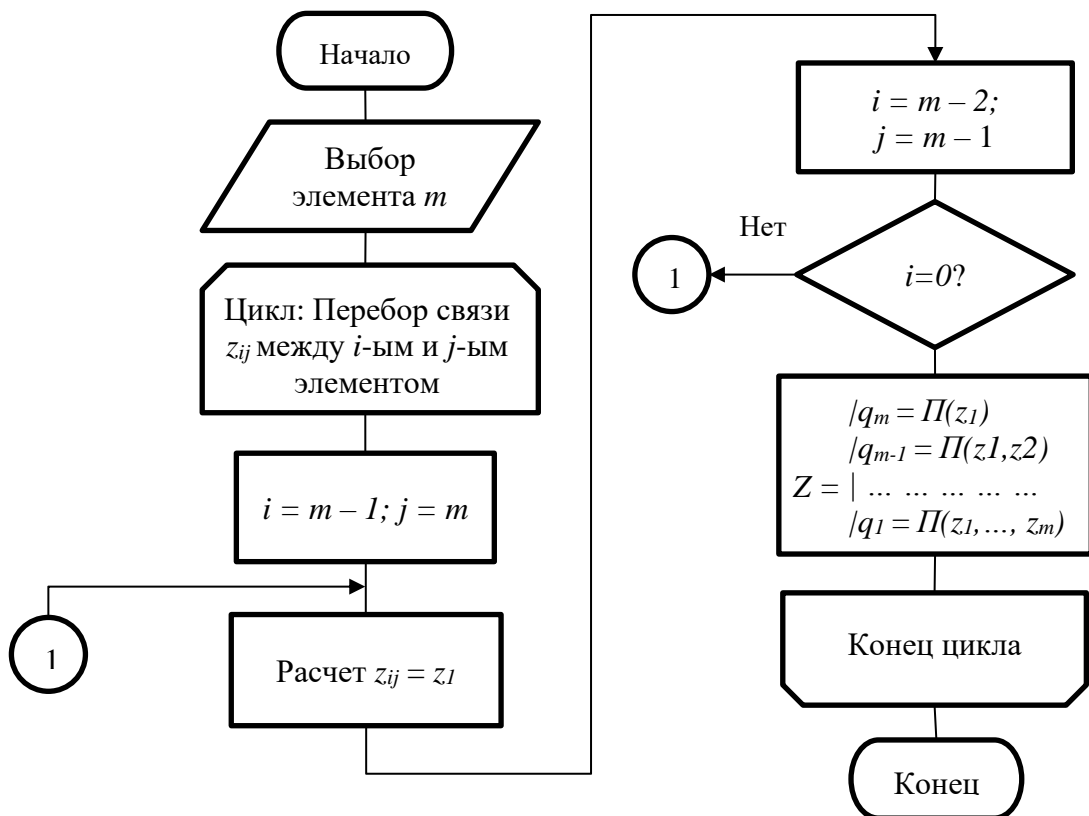


Рисунок 3.11 – Блок-схема алгоритма реализации логико-вероятностного метода



Поученный алгоритм позволяет оценить все взаимные связи, выявленных посредством построения корреляционной плеяды для микроэлементов в организме животных. Основное место в нем отводится определению маршрутов, которые позволяют проводить оценку отдельного влияния одного элемента на другой. Каждый такой маршрут – это определенная доля влияния в общей совокупности и сумма маршрутов определяет полное влияние. Изменение одного элемента отражается на всех его маршрутах, что означает изменение влияния, которые многократно дублировано. В результате на каждый отдельны элемент приходится несколько уровней совокупного влияния.

Обобщенное описание предлагаемого метода ОДМС приведено на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Обобщенное описание предлагаемого метода оценки динамики межэлементных связей

Таким образом, корреляционные плеяды могут быть преобразованы в графовые модели и оценены посредством логико-вероятностного метода. Данное обстоятельство позволяет выявить и учесть все маршруты и способы влияния одного микроэлемента на другой, что и дает динамичное изменение элементов, которое невозможно выявить посредством классического корреляционно-регрессионного анализа. На основе логико-вероятностного метода получено уравнение для неизвестного коэффициента математической модели, отвечающего за динамику связей между элементами, и позволяющего в дальнейшем подобрать такое сочетание элементов, что эффективность рациона питания будет максимальной.

Далее необходимо провести оценку выбора элементов рациона питания и обосновать их предпочтение перед другими. Данная задача относится к задачам принятия решений, и может быть реализована за счет разнообразных методов, реализуемых в настоящее время.

Для выбора одной из альтернатив применен МАИ, как наиболее надежный и испытанный метод многовариантного выбора, позволяющего учесть характеристику каждого из вариантов и выбрать лучше на основе сформированного критерия.

В рассматриваемом случае обобщенная целевая функция эффективности решения  $Rv$  для поставленной задачи будет иметь следующий вид:

$$Rv = Y_i' \cdot Pf - d_i \cdot Pr \rightarrow \max, \quad (3.20)$$

где  $Y_i'$  – изменение удоев от введения добавки;

$Pf$  – стоимость молока;

$d_i$  – состав добавки;

$Pr$  – цена добавки определенного состава.

Манипулируя кормовыми добавками с различающимся составом микроэлементов в них, можно подобрать такое соотношение, чтоб целевая функция становилась максимальной.

На рисунке 3.13 приведены оценка и выбор альтернатив среди пищевых добавок при помощи МАИ.

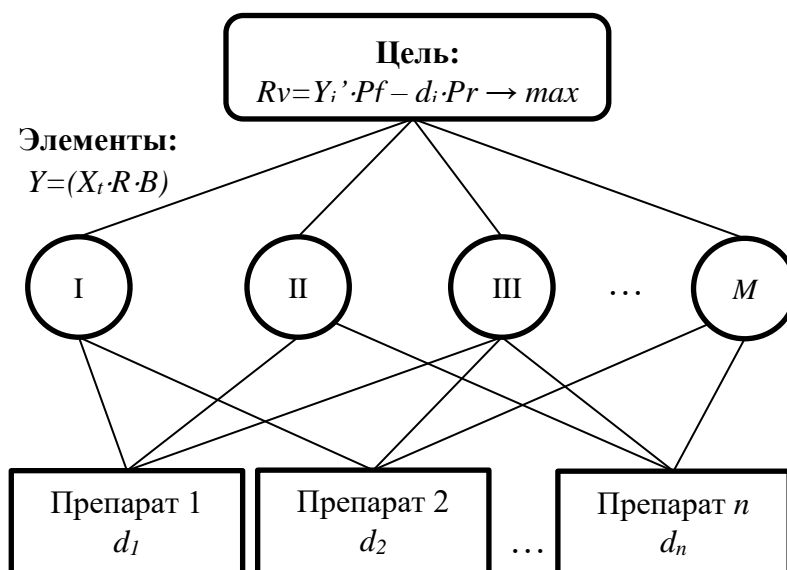


Рисунок 3.13 – Схема выбора альтернатив для максимизации прибыльности посредством метода анализа иерархий

На рисунке 3.13 приведена схема выбора различных альтернатив среди кормовых добавок животных. Путем применения предлагаемого метода ОДМС вычисляются собственные критерии влияния элементов в составе препарата на удои, затем по приведенной формуле (3.18) оценивается экономическая эффективность каждой альтернативы и выбирается лучшая из них. Применяемый метод анализа позволяет обеспечить систему поддержки выбора для лица, принимающего решения.

Таким образом, разработана система выбора альтернатив, основанная на МАИ, где вместо экспертных оценок использованы параметры вероятности взаимного влияния элементов. Применение данного метода позволяет получить альтернативы выбора конкретных кормовых добавок и остановиться на той, у которой состав элементов максимально сбалансирован для определенной группы животных.

### 3.3 Разработка прототипа системы поддержки принятия решений для управления эффективностью функционирования биотехнической системы

Завершающим этапом разработки метода является реализация СППР, позволяющая повышать продуктивность молочного животноводства путем коррекции МЭС животного в ЦД. Разрабатываемая СППР должна выдавать рекомендации по выбору кормовых добавок из набора, занесенного в базу данных. Выбор добавок должен быть оптимальным, основываясь на выборе из множества альтернатив при помощи МАИ [123]. Оценка данных для МАИ проводится посредством полученной математической модели, неизвестные коэффициенты которой определяются посредством метода ОДМС.

Разрабатываемая СППР содержит в себе ряд модулей, реализующих основные алгоритмы поддержки принятия решений [6].

#### 1. Модуль *Logit*.

Данный модуль разработан для реализации части математической модели в рамках вычисления ее вероятностных характеристик посредством предложенной логит-модели. Обобщенная схема алгоритма работы модуля *Logit* приведен на рисунке 3.14.

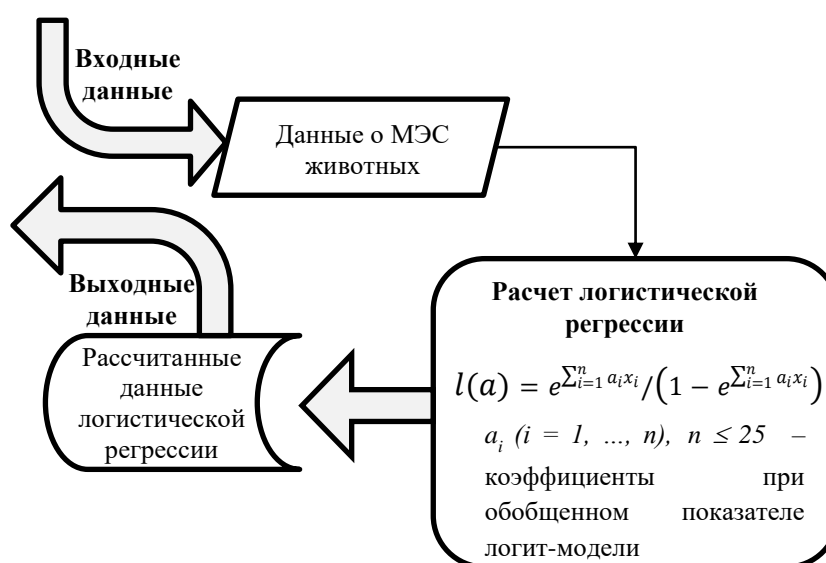


Рисунок 3.14 – Схема алгоритма работы модуля *Logit*

## 2. Модуль *Cov*.

Данный модуль также разработан для реализации части математической модели в рамках вычисления ковариационной матрицы. Вычисление ковариационной матрицы осуществляется путем стандартной процедуры поиска ковариационной пары для каждого из сравниваемых микроэлементов, внесенных в ЦД БТС.

Обобщенная схема алгоритма работы разработанного модуля *Cov* приведен на рисунке 3.15.

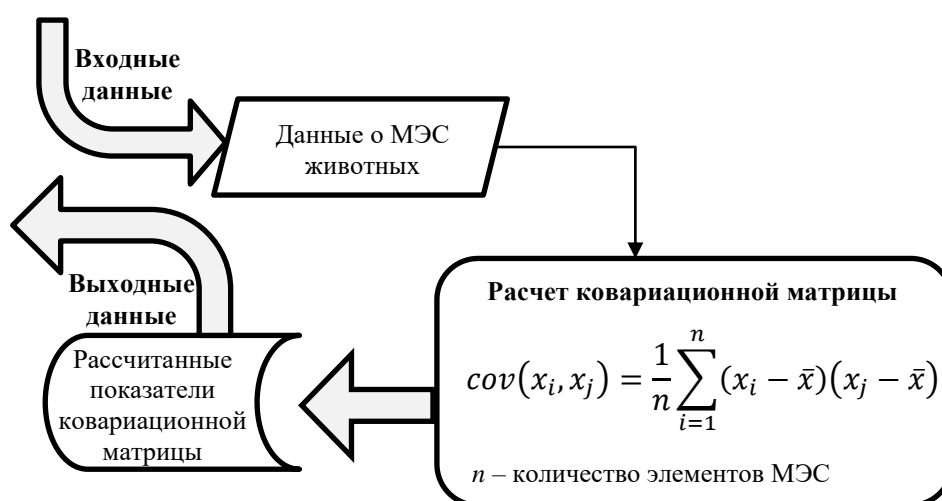


Рисунок 3.15 – Схема алгоритма работы модуля *Cov*

## 3. Модуль *Correl*.

Модуль *Correl* реализован для определения корреляционных отношений между элементами в ЦД БТС. Реализация указанного модуля позволяет получить обобщенное влияние изменения одного элемента на другой.

Для оценки групповых отношений в рамках алгоритма модуля проводится разбиение на группы по правилу Стерджесса. Все остальные процедуры внутри модуля проводятся согласно стандартному нахождению корреляционного отношения Пирсона.

Обобщенная схема алгоритма работы модуля *Correl* приведен на рисунке 3.16.

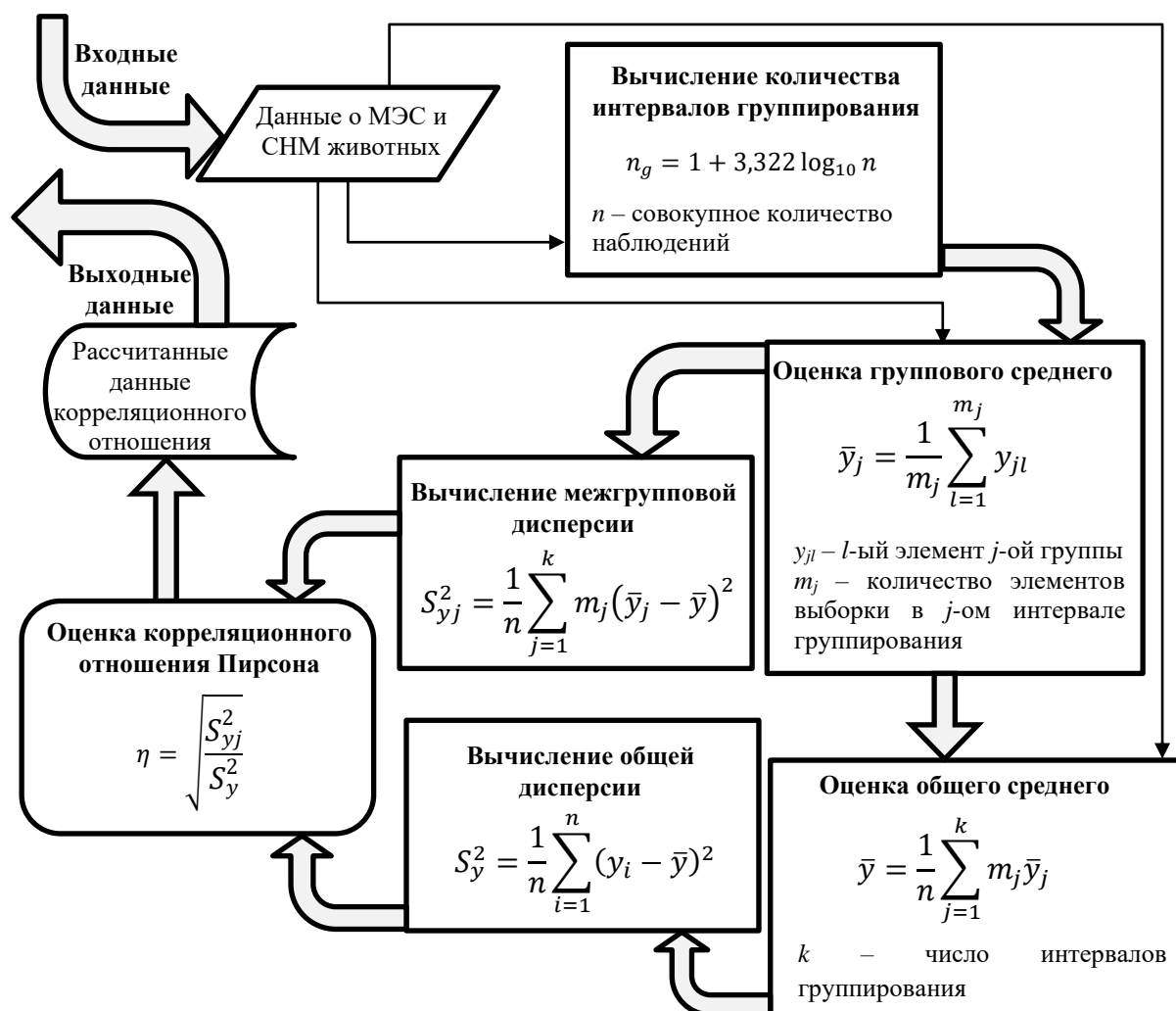


Рисунок 3.16 – Схема алгоритма работы модуля *Correl*

Модули *Cov* и *Correl* разрабатывались ранее в рамках задачи многомерного анализа взаимосвязей при комплексной оценке элементного статуса организма в рамках выполнения гранта Правительства Оренбургской области «Система компьютерной поддержки процесса оценки элементного статуса организма» №32 от 31.07.2017.

Данные модули были реализованы в СППР многомерной оценки элементного статуса организма «*SMES*» [107].

На рисунке 3.17 показано стартовое окно данной программы.

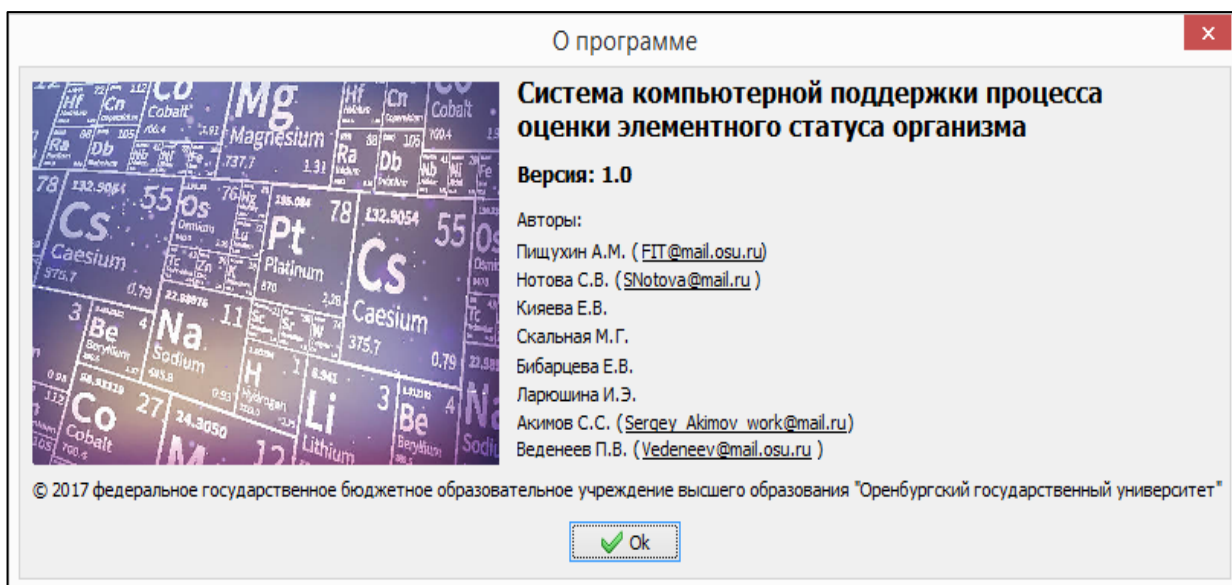


Рисунок 3.17 – Стартовое окно программы оценки элементного статуса организма «SMES»

#### 4. Модуль *Galax*.

Модуль *Galax* представляет собой реализацию метода корреляционных плеяд. Реализация данного модуля позволяет визуально отобразить плеяды элементов по каждой группе животных и основе отображения связей в плеяде сделать вывод о СНМ.

Все алгоритмы для отображения плеяд были приведены в прошлых разделах работы.

#### 5. Модуль *Clust*.

Модуль *Clust* разработан для проведения двухуровневого кластерного анализа – по СНМ и по микроэлементам, оказывающим ключевое влияние на продуктивность молочного животноводства в каждом из выявленных первичных кластеров.

Обобщенная схема алгоритма работы модуля *Correl* приведен на рисунке 3.18.

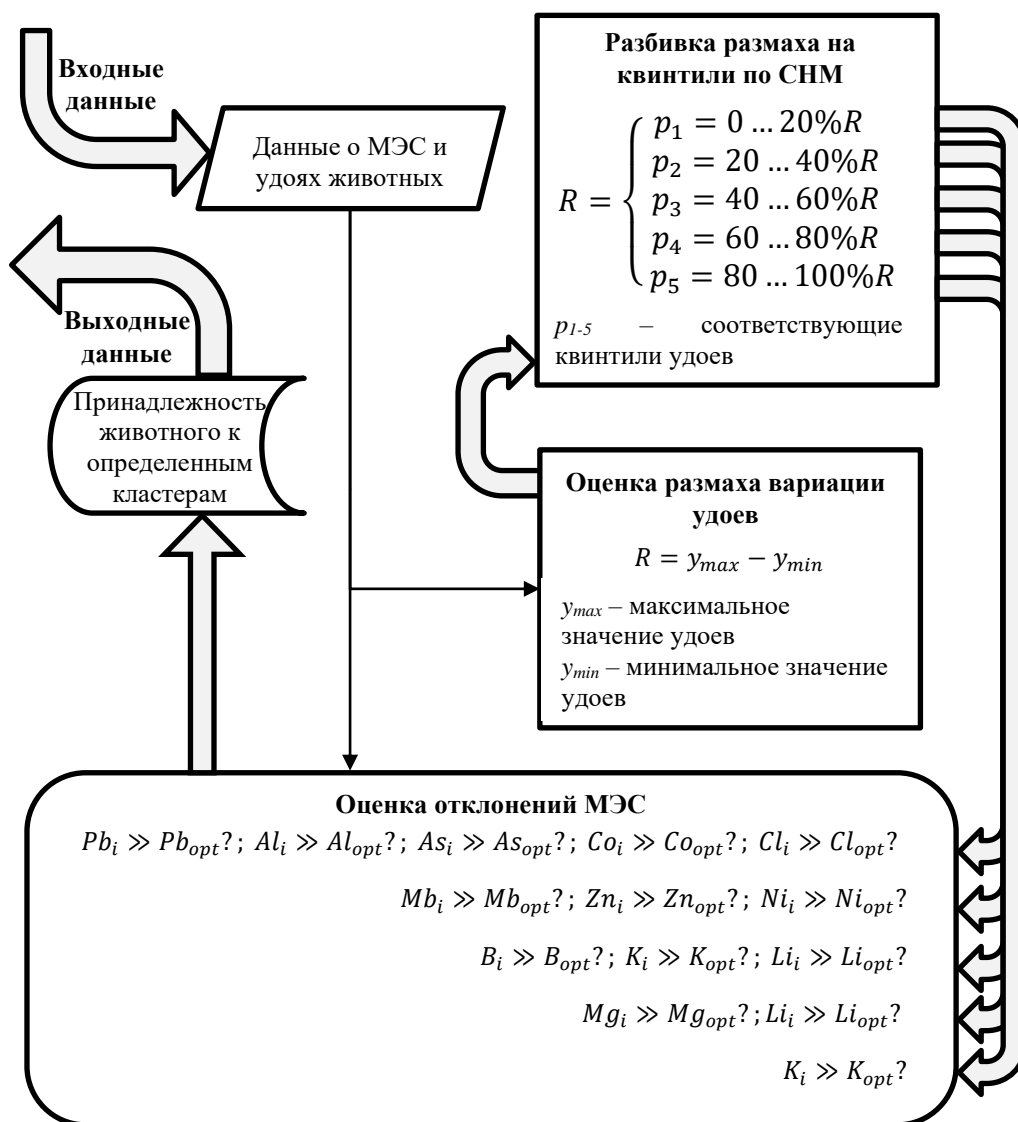


Рисунок 3.18 – Схема алгоритма работы модуля *Clust*

## 6. Модуль *LPM*.

Модуль *LPM* представляет собой последовательную реализацию логико-вероятностного метода. Реализация данного модуля позволяет выполнить расчет и оценку коэффициентов, отображающих динамику межэлементных связей в ЦД БТС.

Все алгоритмы для расчета логико-вероятностного метода были приведены в прошлых разделах работы.

## 7. Модуль *Hierar*.



Модуль *Hierar* разработан для проведения МАИ с целью оценки различных альтернатив применения кормовых добавок для молочных животных. Схема алгоритма работы модуля *Hierar* приведен на рисунке 3.19.

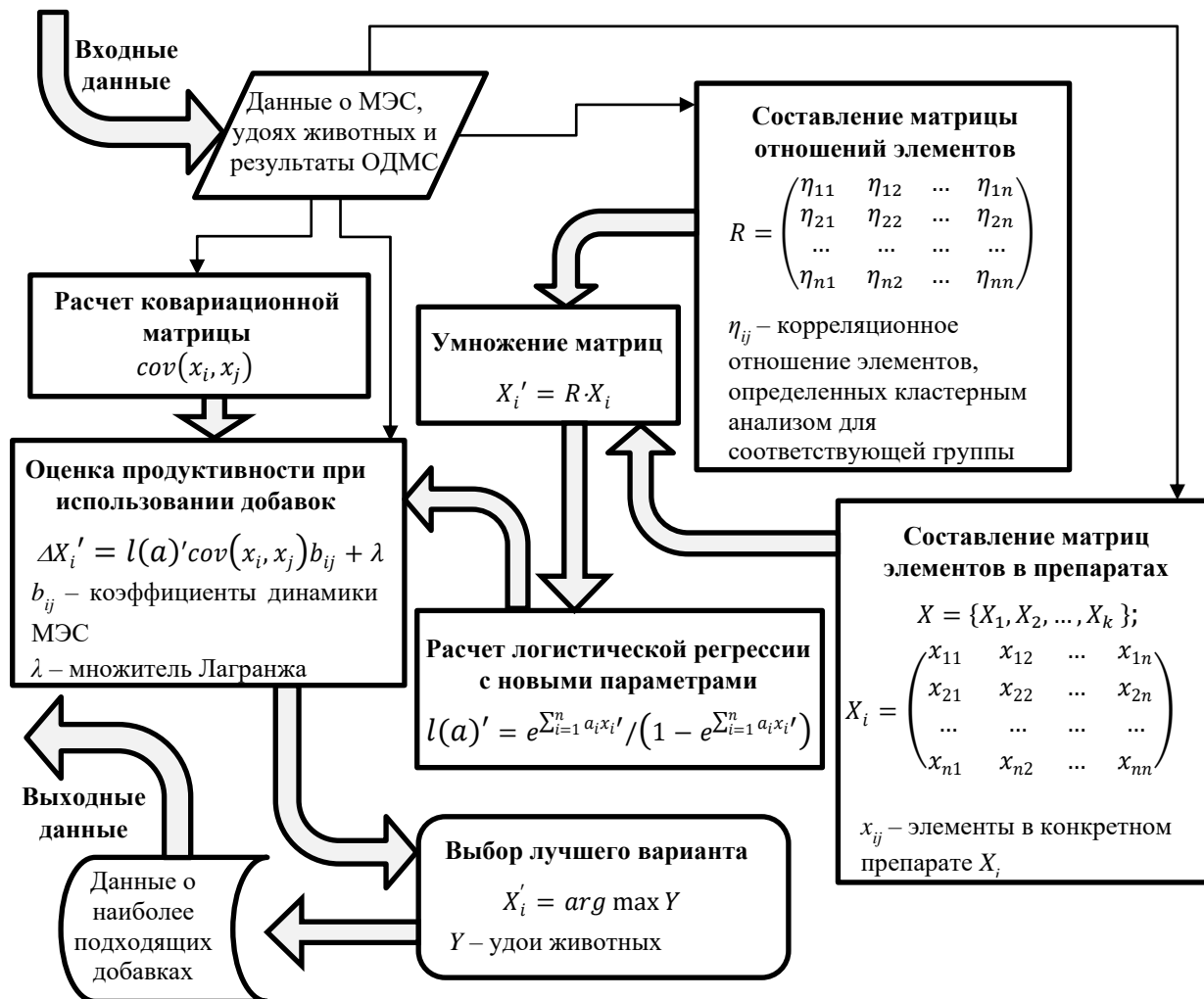


Рисунок 3.19 – Схема алгоритма работы модуля *Hierar*

## 8. Модуль *Proof*.

Модуль *Proof* разработан для итоговой экономической оценки эффективности выбранных кормовых добавок, исходя из планируемого изменения удоев, прибыли с каждого литра удоев и затрат на кормовые добавки.

Схема алгоритма работы модуля *Proof* приведен на рисунке 3.20.

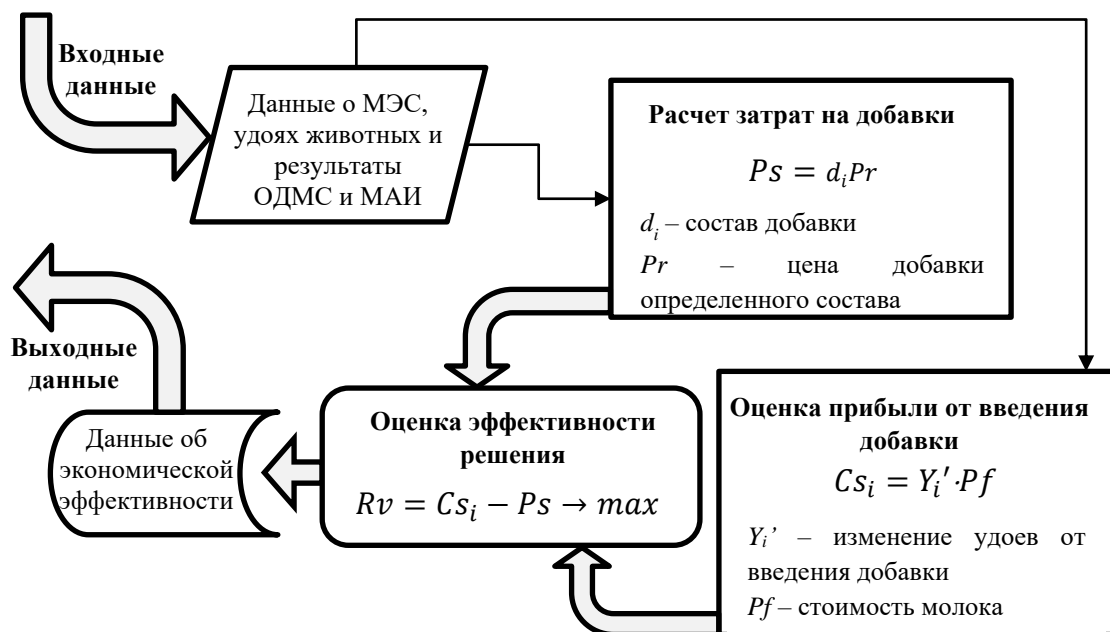


Рисунок 3.20 – Схема алгоритма работы модуля *Proof*

Визуальное отображение СППР выполнено посредством нескольких экранных форм. Примерная экранная форма разработанного прототипа СППР приведена на рисунке 3.21.

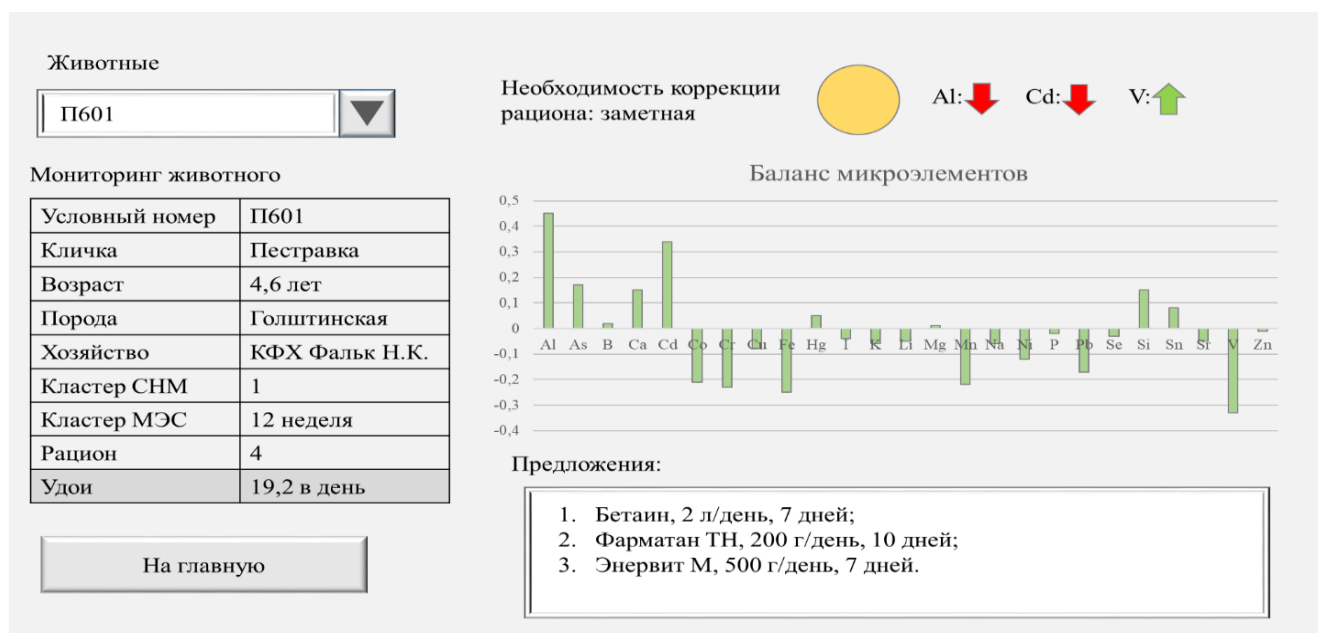


Рисунок 3.21 – Примерная экранная форма разработанного прототипа системы поддержки принятия решений

Обобщенная схема разработанной СППР приведена на рисунке 3.22.

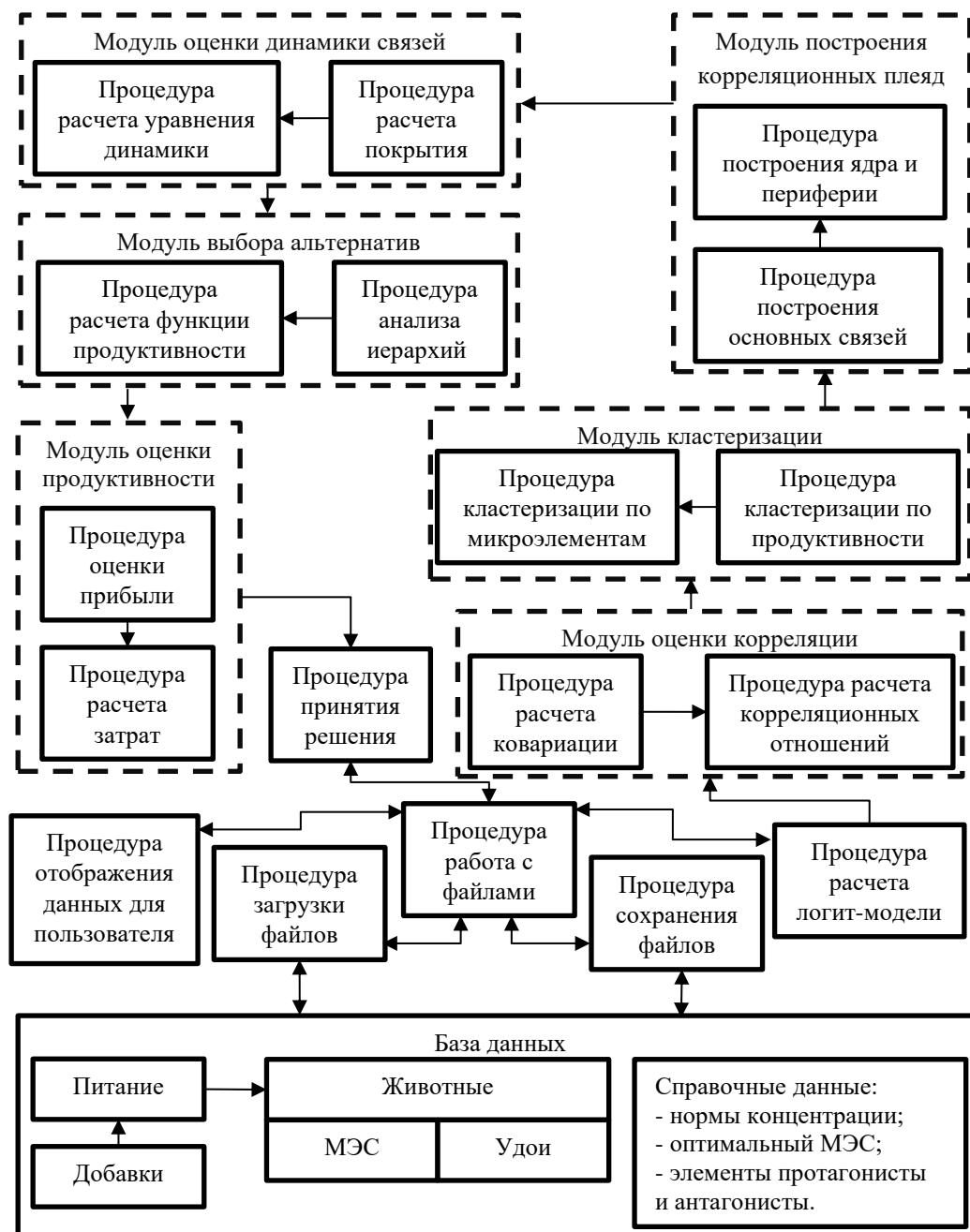


Рисунок 3.22 – Схема прототипа СППР для ЦД БТС

Таким образом, разработана СППР в рамках разрабатываемого ЦД БТС для повышения продуктивности молочного животноводства, основанная на методе ОДМС.

### 3.4 Выводы по третьей главе

1. С целью проведения математического описания состава микроэлементов молочное животноводство рассмотрено как производственный процесс. В результате определены основные параметры математической модели, которые представляют собой сочетание концентрации элементов, их взаимосвязи, а также некоторого неопределенного коэффициента, который позволяет скорректировать динамику связей между элементами. При этом определено, что ряд вычислений представляет собой вероятностные характеристики, которые, однако, также сводятся к нахождению функции, зависящей от трех перечисленных выше элементов. Сама же функция представляет собой максимизацию удоев, достигаемую за счет изменения концентрации элементов посредством управления рационом питания.

2. Разработанный метод оценки динамики межэлементных связей основан на предварительном статистическом исследовании и включает в себя проведение кластерного анализа для разделения животных на группы, метода корреляционных плеяд, которые позволяют визуализировать связи между элементами и логико-вероятностный метод, осуществляющий численную оценку динамики связей, и определяющий неизвестный ранее коэффициент динамики связей. Приведенные алгоритмы для каждого метода позволяют осуществить весь процесс на практике и реализовать на их основе программный продукт.

3. В результате полученного метода и алгоритмов создан прототип СППР, включающий в себя 8 отдельных блоков, которые, помимо собственно метода, осуществляют, также, подбор коэффициентов согласно распределению вероятностей, оценку и выбор альтернатив, а также расчет экономической эффективности. Разработанная схема СППР полностью соответствует концептуальной схеме, сформированной для достижения цели. Также представлена экранная форма прототипа СППР, позволяющая оценить интерфейс и функционал разрабатываемого программного продукта.

## **Глава 4. Экспериментальная проверка предлагаемого метода, алгоритмов и системы поддержки принятия решения**

### **4.1 Разработка схемы эксперимента**

Итоговым этапом проводимого исследования является оценка экономической эффективности разработанных методов, алгоритмов и разработанной СППР с точки зрения увеличения продуктивности молочных животных. Данный этап призван подтвердить достоверность используемых данных, работоспособность всех предложенных методов, алгоритмов, а также правильность их применения.

Для проверки эффективности проведенного исследования необходимо выбрать несколько объектов исследования – молочных хозяйств, каждое из которых может представить животных для проведения эксперимента [124]. При выборе конкретных молочных хозяйств необходимо руководствоваться следующими правилами:

- хозяйство должно быть достаточно большим для обеспечения разнообразия выбора;
- в хозяйстве должны быть представленные животные разных возрастов и разных пород;
- для исключения регионального влияния, хозяйства должны различаться территориально;
- для исключения фактора особенностей питания, рацион и периодичность кормления животных должна быть одинаковыми во всех выбранных молочных хозяйствах;
- для снижения влияния человеческого фактора на эксперимент каждое из рассматриваемых хозяйств должно обладать автоматизированными линиями кормления и доения.

Сбор данных должен осуществляться с применением современных информационно-технических средств. Все данные о МЭС и продуктивности животных заносятся на ЦК животного в рамках разрабатываемого ЦД. Далее применяется разработанная СППР для формирования рекомендаций к коррекции рациона питания.

При этом необходимо четко следить за исполнением выдаваемых рекомендаций, которые позволяют сформировать итоговые выводы об эффективности работы системы. Наиболее важная часть – исполнение рекомендаций, выдаваемых СППР, контроль за выдачей кормов, расходование добавок. Данные действия требуют строгого и четкого контроля исполнения на всех уровнях управления.

Перенос данных осуществляется посредством выгрузки данных из соответствующего оборудования в базы данных или в результате ручного ввода. Формирование ЦК осуществлено в период 2018-2020 годы и постоянно пополняется.

Помимо собранных данных, в эксперименте используются следующие данные, взятые из открытых научных и коммерческих источников:

- данные о нормах питания молочных животных в зависимости от возраста и лактационного периода извлеченные из справочной литературы;
- данные о составе конкретных кормовых добавок, представляемые предприятиями-производителями;
- данные об оптимальном МЭС, взятые из научных работ отечественных и зарубежных исследователей;
- результаты собственных исследований, касающиеся определенных элементов, являющихся антагонистами и протагонистами.

Все данные вносятся в базу СППР и используются как справочные. Данные о кормовых добавках и их составе постоянно обновляются, что позволяет учитывать новые добавки в разработанной системе. Обновление справочных данных осуществляется вручную.

С целью проведения экспериментального исследования необходимо выбрать предприятия молочного животноводства (молочные хозяйства), которые соответствовали бы всем требованиям, сформулированным в предыдущих разделах.

Для анализа проведено исследование на четырех молочных хозяйствах в различных регионах страны.

#### 1. Гатчинский животноводческий комплекс.

Акционерное общество «Гатчинское» основано в 1944 году и расположено в поселке Большие Колпаны Гатчинского района Ленинградской области. На данный момент общее поголовье предприятия составляет 2300 голов, из которых 850 являются дойным стадом. Основные направления деятельности АО «Гатчинское»: молочное животноводство, выращивание племенных нетелей, бычков, зерна, картофеля и овощей открытого грунта.

#### 2. Агрофирма «Промышленная».

Агрофирма «Промышленная» расположено в Оренбургской области по адресу: Оренбург городской округ, пос. Самородово, ул. Школьная 34а. В области молочного животноводства предприятие обладает стадом, численностью 540 голов. Предприятие занимает лидирующие позиции по производству молока.

#### 3. КФХ Фальк Н.К.

Крестьянско-фермерское хозяйство Фальк Н.К. располагается по адресу: Оренбургская область, Первомайский район, поселок Первомайский. Численность голов молочного скота превышает 900.

#### 4. Племенной завод «Красногорский».

Племенной завод «Красногорский» специализируется он на производстве продукции растениеводства и животноводства, а кроме того, является племенным заводом по разведению красной степной породы коров и племенным репродуктором по разведению калмыцкой породы крупного рогатого скота. На сегодня в нем насчитывается более 5900 голов крупного рогатого скота, в том числе 2000 коров.

Все четыре предприятия молочного производства являются достаточно крупными современными комплексами, с автоматизированными линиями кормления и доения. Подбор кормов на каждом предприятии осуществляется в автоматизированном режиме согласно рекомендациям исследователей по кормовому производству. Все рассмотренные предприятия соответствуют сформулированным требованиям и дали согласие на сотрудничество.

Лабораторные анализы берутся с применением робота-манипулятора, среди функций которого забор проб крови и шерсти. Материал (биосубстрат) анализировался на МЭС при помощи метода масс-спектрометрии. Все исследования проводились на базе Федерального научного центра биологических систем и агротехнологий Российской академии наук (до 2018 года Всероссийский научно-исследовательский институт мясного скотоводства) в период с 2014-2023 годы. Обобщенная схема последовательности этапов проведения экспериментального исследования приведена на рисунке 4.1.

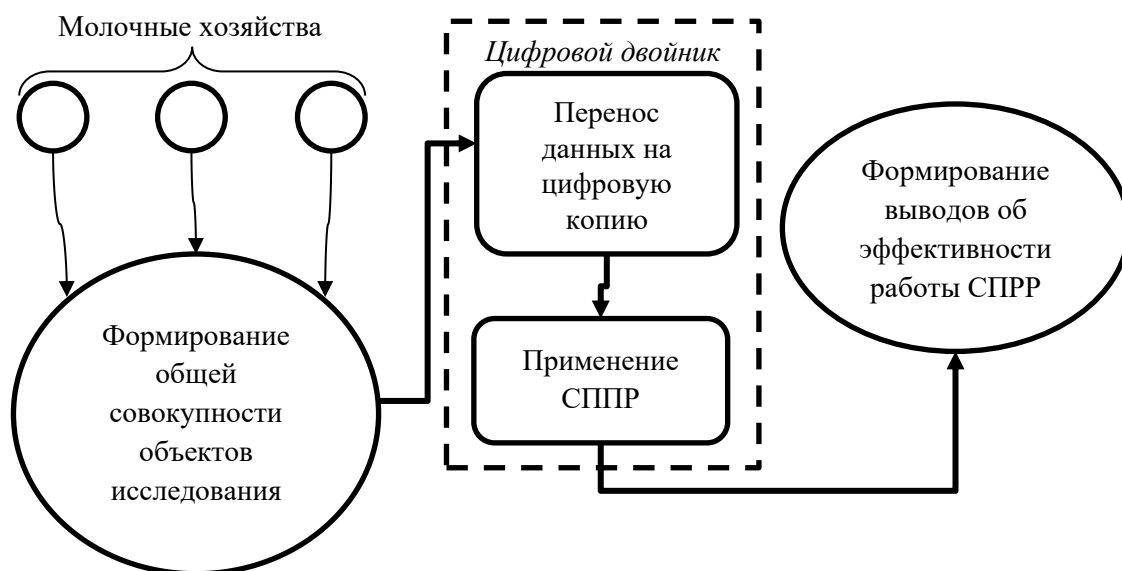


Рисунок 4.1 – Обобщенная схема проведения последовательности этапов проведения экспериментального исследования

Таким образом, представлен перечень требований к хозяйствам, даны их характеристики и разработана обобщенная схема проводимого эксперимента.



## **4.2 Результат применения системы поддержки принятия решений в области эффективности функционирования биотехнической системы**

В рамках проведения экспериментального исследования, согласно приведенным методам определения численности выборки, получено общее значение выборки животных  $n=173$ . Выборка осуществлялась путем простого отбора на каждом из представленных молочных хозяйств. Для каждого предприятия была определена численность животных, на которых впоследствии проводился эксперимент:

- Гатчинский животноводческий комплекс – 64;
- агрофирма «Промышленная» – 29;
- КФХ Фальк Н.К. – 37;
- племенной завод «Красногорский» – 43.

Разность данных определялась как территориальными различиями (Гатчинский комплекс самый удаленный. Потому на его долю пришлось более всего животных), так и общим количеством животных в каждом хозяйстве, исходя из которого определены конкретные значения числа животных.

Животных сразу же отделили от остальных, сформировав им определенную диету из основного рациона питания. По количеству удоев животных разделили на группы от сверхнизкой до сверхвысокой, которые соответствовали ранее выявленному дискриминирующему показателю продуктивности молочных животных.

Затем для достижения целей эксперимента проводились лабораторные испытания. У каждого животного были взяты биосубстраты (в основном шерсть и кровь животных) на анализ, который позволил определить не только СНМ (подтвердив при этом правильность деления на группы по продуктивности), но и те сочетания элементов, которые оказывают наибольшее влияние на животных и которые были определены в рамках проведения описанного ранее кластерного анализа. Все результаты занесены в ЦК животных, и проанализированы с точки

зрения соответствия нормам МЭС, удовлетворяющих нормальной продуктивности.

На рисунке 4.2 отображены относительные величин содержания микроэлементов в крови животных различных молочных хозяйств и границы нормы.

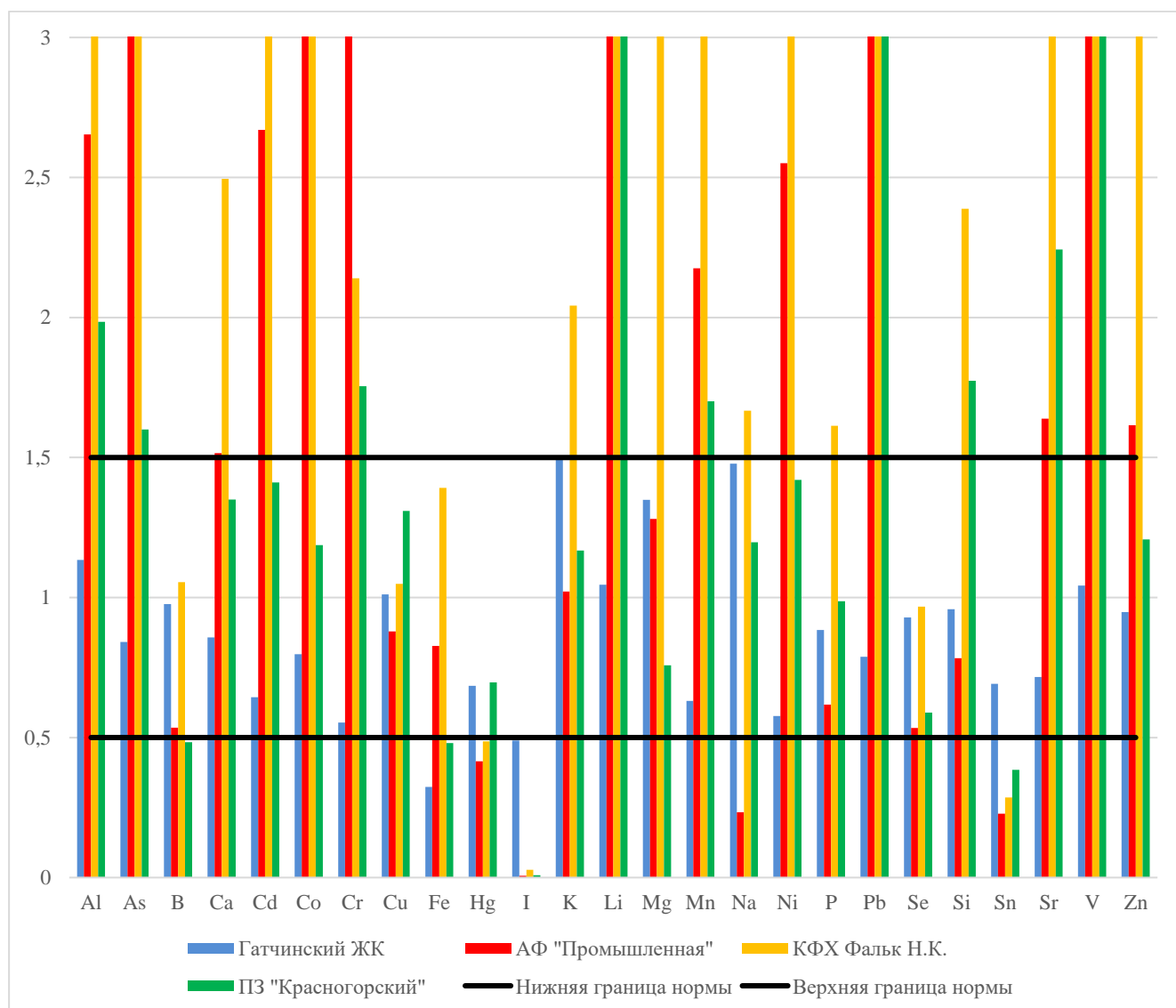


Рисунок 4.2 – Относительные величин содержания микроэлементов в крови животных различных молочных хозяйств и границы нормы

Рисунок 4.2 показывает существенные различия в содержании микроэлементов среди различных молочных хозяйств. Во многих случаях нормы

содержания МЭС превышены многократно, что говорит о высокой СНМ в ряде молочных хозяйств (в первую очередь в молочных хозяйствах Оренбургской области).

Все животные были разделены на кластеры, которые соответствовали их СНМ и выявленным элементам. Каждое исследуемое животное отнесено к соответствующему кластеру. Результаты кластерного разделения приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты разделения животных разных хозяйств на соответствующие кластеры

СНМ	Элементы	Гатчинский комплекс	Агрофирма «Промышленная»	КФХ Фальк Н.К.	ПЗ «Красногорский»
Сверхнизкая	К, Са	11			3
Низкая	Li, Ni	12	2		1
	Mg, Na	14		1	2
Средняя	В, Са	5	8	2	
	К, Р, I	7	6	1	
	Li, Mg	10		2	3
Высокая	Zn, Sn, Hg	2	6	3	
	Mb, Fe		2	7	4
	Ni, Pb	2			6
Сверхвысокая	Pb, As	1		3	7
	Al, V, Cd		3	4	10
	As, Hg			2	3
	Cl, Sr		2	4	
	Co, Cr			8	4
Итого		64	29	37	43

В таблице 4.1 отображено количество животных, попавших в тот или иной кластер. Согласно данным таблицы, в Гатчинском животноводческом комплексе только одно животное имеет сверхвысокую нагрузку на метаболизм, большинство же животных имеет низкую нагрузку. Иначе обстоит дело в КФХ Фальк Н.К. и племенном заводе «Красногорском» в этих хозяйствах большинство животных имеет сверхвысокую нагрузку на метаболизм. Различие в данных обуславливается

разностью хозяйств и необходимо для доказательства достоверности проводимого эксперимента.

Далее были рассчитаны коэффициенты коррекции МЭС для каждого животного индивидуально. Разработанная СППР в автоматизированном режиме предлагала определенный набор добавок для каждого кластера вне зависимости от их территориального нахождения. Обработка данных, формирование рекомендаций осуществлялось в ФНЦ БСТ РАН, формируемые рекомендации передавались на предприятия в электронном виде, и сотрудники на местах контролировали их выполнение.

Предлагаемые специализированные добавки, позволяющие нормализовать СНМ, закупались отдельно для каждого предприятия. Дозировка и сроки выдачи строго учитывались. Добавки позволили скорректировать МЭС животных.

Для выборочной совокупности животных построена корреляционная плеяда до проведения коррекции МЭС и после нее (рисунок 4.3).

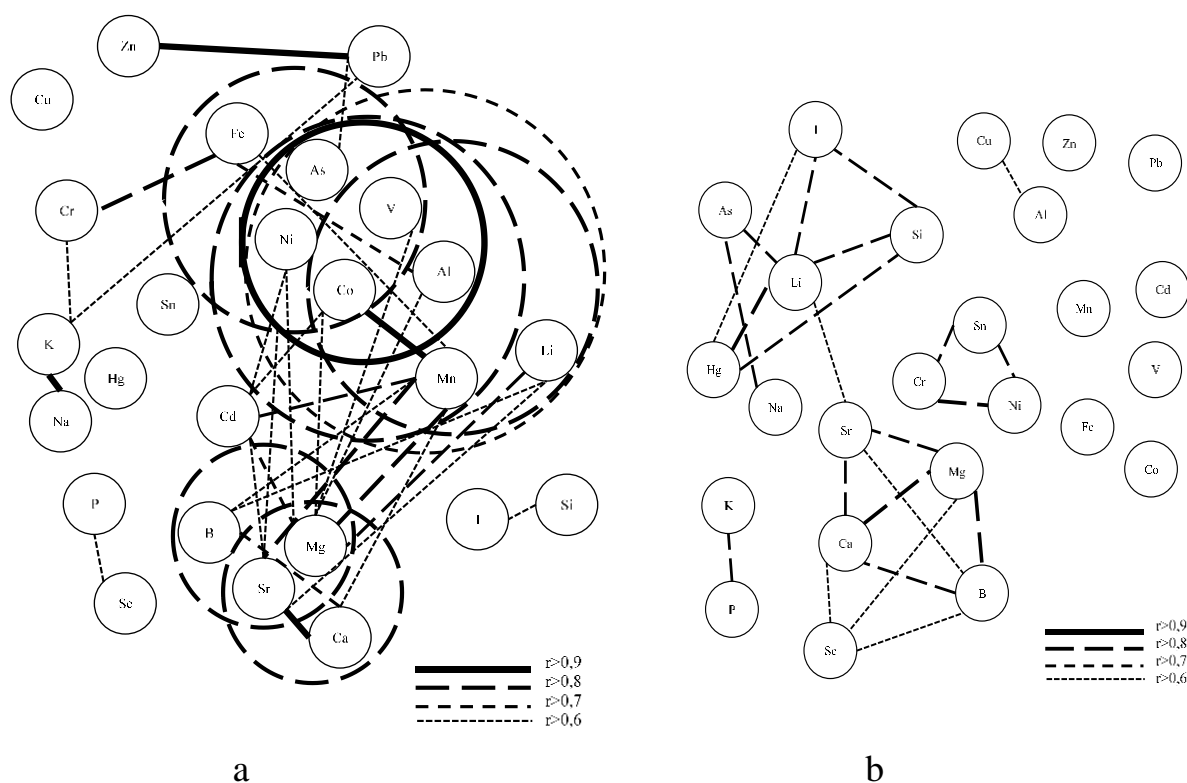


Рисунок 4.3 – Корреляционная плеяда выборочной совокупности животных: а) до корректировки МЭС; б) после корректировки МЭС

Согласно рисунку 4.3 количество и сила связей до и после эксперимента заметно снизились, что говорит о нормализации СНМ и, как следствие, ускорении метаболических реакций, что напрямую влияет на продуктивность животных.

Помимо МЭС, замер производился также на показателе среднесуточных удоев, для получения результатов изменения продуктивности. Результаты отображены на рисунке 4.4.

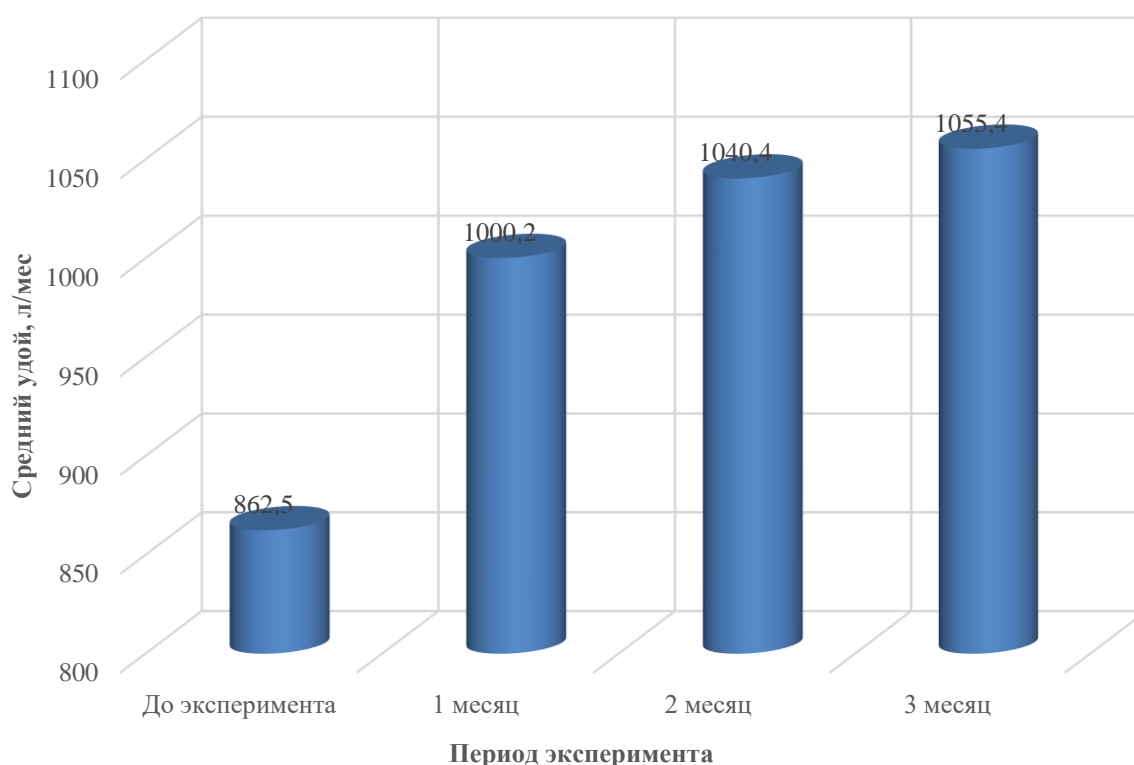


Рисунок 4.4 – Изменение размера удоев в различные периоды эксперимента

Таким образом, прирост удоев в экспериментальной группе животных уже через три месяца составил 22,4% по сравнению с количеством удоев до эксперимента. Проведенный анализ позволяет заключить, что применяемый метод ОДМС, реализованный в виде СППР в ЦД БТС позволяет в значительной степени повысить продуктивность молочного производства для конкретных молочных хозяйств.

### 4.3 Выводы по четвертой главе

1. Оценка экономической эффективности разработанных методов, алгоритмов и разработанной в итоге СППР является итоговым этапом проводимого исследования. Достижение положительных показателей на этом этапе отображает достоверность и работоспособность всех применяемых методов и алгоритмов, в том числе разработанных в рамках данного исследования. В качестве объекта проверки отобраны 4 молочных хозяйства, расположенных на различных территориях, имеющих различные способы управления и формирования рациона. Лабораторные анализы берутся с применением робота-манипулятора, среди функций которого забор проб крови и шерсти. Все выбранные хозяйства соответствовали всем поставленным условиям, необходимых для проведения эксперимента. Сам эксперимент проведен согласно разработанной схеме

2. В результате эксперимента определено общее количество животных, проведение эксперимента на которых соответствует принципам состоятельности, несмещенности и эффективности, которое разделено между хозяйствами неравномерно по причине территориальных и количественных различий в каждом конкретном хозяйстве. В рамках проведения эксперимента животных изолировали и провели первичный сбор анализов, который позволил выявить у многих из них существенные отклонения по концентрации МЭС. Полученные данные применены в кластерном анализе, который позволил распределить всех животных по соответствующим кластерам и далее воздействовать на каждый кластер отдельно. Далее проведены корректирующие процедуры на основе рекомендаций разработанной СППР и проведена оценка взаимосвязи посредством построения корреляционных плеяд. Корреляционная плеяда показала значительное снижение количества и силы связи между различными элементами, что свидетельствует о нормализации СНМ. В результате проведения эксперимента прирост удоев в экспериментальной группе животных уже через три месяца составил 22,4% по сравнению с количеством удоев до эксперимента.

## Заключение

В настоящее время имеются трудности в обеспечении продовольственной безопасности при производстве молока, которое зависит от эффективности рациона питания. Определено, что управляющее воздействие формируется за счет управления кормовыми добавками. Рассмотренные методы формирования рациона позволили выбрать коррекцию МЭС как основной метод для управления рационом питания.

Однако молочное производство не достигает необходимых уровней, чему причиной, в том числе, слабая насыщенность отрасли ЦД. В рамках создания ЦД необходимо сначала создать ЦК на основе данных МЭС, а также разработать СППР, позволяющей формировать рацион питания животного.

Обзор исследований выявил как разнообразие подходов к повышению продуктивности молочного животноводства, так и некие обобщенные принципы. Одним из таких принципов является упор на информационные технологии самого различного толка. При этом авторы единодушно сходятся во мнении, что для прорыва в секторе АПК необходимо осуществить цифровой переход, обеспечить который может применение технологии ЦД.

В рамках исследования проведен системный анализ ЦД БТС, который позволил выявить объект и субъект управления, потоки, механизмы и внешние воздействия на ЦД, а также, в результате проведенной декомпозиции, определена внутренняя структурная последовательность действий над данными в рамках реализации ЦД. Также определено, что связи между микроэлементами внутри организма животного подвержены значительной динамики в зависимости от их концентрации, что требует разработку новых математических моделей. Проведенный анализ позволил получить схему взаимодействия животного и информационно-технических систем, к которым относятся система технической поддержки и ЦД, состоящий из ЦК и СППР, собирающий, анализирующий данные и передающий необходимые рекомендации ЛПР.

Приведенный обзор основных математических методов позволяет применить некоторые из них в рамках формализации задачи оценки эффективности функционирования БТС с учетом динамики микроэлементного состава. Для обработки показателей, применяемых в данном исследовании, используются методы статистики, а именно коэффициент конкордации Кендалла, кластерный анализ (с дискриминантной составляющей), метод корреляционных плеяд, доработанный для улучшения визуализации связей и логико-вероятностный метод, позволяющий оценить динамику связей.

Также разработан алгоритм проведения эксперимента, позволяющий получить ключевые данные для оценки экономической эффективности разработанных методов. Проведена формализация и постановка задачи повышения производительности молочного животноводства за счет формирования рациона питания животных.

Поставленная задача включает в себя такие пункты, как: формирование набора ключевых микроэлементов, оказывающих наиболее существенное влияние на метаболизм животного, метод оценки влияния состава микроэлементов на итоговую продуктивность, мониторинг состава микроэлементов на производственном цикле, а также стратегию коррекции, позволяющую оперативно добавить или вывести определенные микроэлементы из организма животных. Выполнение всех поставленных пунктов позволит повысить производительность молочного животноводства.

Задача коррекции МЭС в ЦД БТС для повышения продуктивности производства молока сводится к нахождению определенных сочетаний микроэлементов в организме животных, при которых продуктивность становится максимальной. Все значения, обуславливающие вероятность достижения максимальной продуктивности связаны с концентрацией элементов, отображенных в ЦД БТС. В результате проведенных математических преобразований, получена формализованная математическая модель оценки продуктивности животного, которая позволяет оценивать эффективность функционирования БТС с учетом нагруженности метаболизма и динамики



межэлементных связей, что в свою очередь позволяет определить элементы и дозы, необходимые к добавлению или изъятию из организма.

Проведенный кластерный анализ позволил не только определить различные независимые группы животных в соответствии с их СНМ, но и выявить те группы взаимосвязанных элементов, которые оказывают ключевое влияние внутри каждого кластера. Доработанный метод корреляционных плеяд, посредством выделения ядра и периферии позволяет выполнять визуальную оценку изменения взаимных связей между элементами. Для облегчения применения метода разработаны соответствующие алгоритмы.

Разработана система выбора альтернатив, основанная на МАИ, где вместо экспертных оценок использованы параметры вероятности взаимного влияния элементов. Применение данного метода позволяет получить альтернативы выбора конкретных кормовых добавок и остановиться на той из них, у которой состав элементов максимально сбалансирован для определенной группы молочных животных.

Разработана СППР в рамках разрабатываемого ЦД БТС для повышения продуктивности молочного животноводства, основанная на методе ОДМС. Для ее проверки разработан алгоритм проведения эксперимента, позволяющий получить ключевые данные для оценки экономической эффективности разработанных методов повышения продуктивности молочного животноводства. Рассмотренные предприятия молочного производства, предоставляющие животных для проведения экспериментального исследования, соответствуют сформулированным требованиям и дали согласие на сотрудничество.

В результате проведенного эксперимента прирост удоев в экспериментальной группе животных уже через три месяца составил 22,4% по сравнению с количеством удоев до эксперимента. Проведенный анализ позволяет заключить, что применяемый метод ОДМС, реализованный в виде СППР в ЦД, позволяет в значительной степени повысить продуктивность молочного производства для конкретных молочных хозяйств.

**В процессе выполнения диссертационного исследования получены следующие основные результаты.**

1. Разработана концептуальную модель принятия решения на основе цифрового двойника биотехнической системы, представляющая собой поэтапные действия, подкрепленные соответствующими данными и математическим аппаратом, выполняемые путем изменения концентрации элементов, приводящего к оптимальному состоянию микроэлементного статуса.

2. Разработана математическая модель эффективности функционирования биотехнической системы, основанная на нагруженности метаболизма, а также взаимном влиянии микроэлементов и межэлементных связей, которая позволяет учесть динамику изменения корреляционных связей и за счет этого оценивать эффективность функционирования биотехнической системы.

3. Разработан метод и алгоритмы оценки динамики межэлементных связей, основанные на оценке изменения микроэлементного состава, дающие возможность спрогнозировать динамику микроэлементов и на основе этого рассчитать необходимую концентрацию добавок.

4. Реализован прототип системы поддержки принятия решений для управления эффективностью функционирования биотехнической системы, основанный на построенных ранее модели биотехнической системы и методе оценки динамики межэлементных связей, и позволяющая увеличивать продуктивность производства молока в молочных хозяйствах.

Совокупность указанных результатов работы позволяет утверждать, что достигнута цель исследования, которая состоит в повышении эффективности формирования рациона питания на основе разработки цифрового двойника управления биотехнической системой, содержащего данные о микроэлементном статусе с использованием метода анализа связей. Все задачи, поставленные в исследовании, решены полностью, применяемые методы позволяют обосновать надежность и точность достигнутых решений. Общий экономический эффект, выраженный в приросте выхода молока, составил 22,4% по сравнению с количеством удоев до эксперимента.

## **Перспективы дальнейшего исследования.**

Существует несколько направлений дальнейших исследований.

1. Более глубокая математическая обработка данных, позволяющая строить модели не только с применением логистической регрессии, но и иметь возможность выбора регрессионной модели со сравнением результатов такого выбора.

2. Более широкое применение статистических моделей и методов, в частности, кластеризации животных по большому количеству признаков; построение временных рядов большой протяженности с целью анализа долгосрочной динамики связей; сопоставление посредством ковариационных матриц или корреляционных отношений других показателей животных (генетические данные, тканевой состав, внешние признаки, биохимия); развитие метода корреляционных плеяд посредством анализа соприкосновения ядер и периферии; проведение оптимизации процесса обнаружения маршрутов при применении логико-вероятностного метода.

3. Рассмотрение возможности использования других методов выбора альтернатив, помимо использованного метода анализа иерархий.

4. Изучение возможностей применения методов интеллектуального анализа данных: нейросетевой подборки параметров, генетических алгоритмов, методов машинного обучения в вопросах поддержки принятия решений.

5. Консолидация разрозненных систем анализа и поддержки решения в единую систему, включающую в себя управление организационной, технической, финансовой и живой системой, позволяющей принимать решения с учетом многомерных параметров указанных систем.

6. Оценка влияния наночастиц ключевых элементов на продуктивность животных и включение этого влияния в систему поддержки.

В качестве первоочередной перспективы дальнейшего развития исследования планируется изучение возможности профилактики нагруженности метаболизма животных, за счет прогнозирования изменения в динамике микроэлементного состава организма животных.

## Список литературы

1. Абрамов, В. И. Цифровые двойники в сельском хозяйстве: возможности и перспективы / В. И. Абрамов, А. Д. Столяров // АПК России: образование, наука, производство. – 2021. – С. 3-9.
2. Акимов, С. С. Взаимосвязь развития цифровой экономики и инвестиционной деятельности / С. С. Акимов // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2018. – № 12(118). – С. 17.
3. Акимов, С. С. Оценка воздействия микроэлементов на продуктивность молочного животноводства / С. С. Акимов, В. А. Трипкош, М. В. Архапчева // Современные стратегии и цифровые трансформации устойчивого развития общества, образования и науки : СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ XII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ (шифр - МКСС), Москва, 06 октября 2023 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство АЛЕФ", 2023. – С. 77-81.
4. Акимов, С. С. Оценка Хилла как ключевая оценка для распознавания тяжело- и легкохвостовых законов распределения вероятности / С. С. Акимов // Научное обозрение. – 2014. – № 10-2. – С. 349-352.
5. Акимов, С. С. Разработка модели системы «корма-животные-продуктивность» с учетом кинетики микроэлементов / С. С. Акимов, А. С. Боровский // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2023. – Т. 12, № 1(61). – С. 53-58.
6. Акимов, С. С. Система поддержки принятия решений для производства молочной продукции / С. С. Акимов // Компьютерная интеграция производства и ИПИ-технологии : Сборник материалов X Всероссийской конференции, Оренбург, 18–19 ноября 2021 года. – Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2021. – С. 85-88.
7. Акимов, С.С. Моделирование продуктивности хозяйства молочного животноводства / С.С. Акимов // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2022. – № 1. – С. 25-32.

8. Акимов, С.С. Оценка эффективности кормового производства на основе факторов посева и предпосевной подготовки / С.С. Акимов, И.П. Болодурина // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 7. – С. 9-13.
9. Акимов, С.С. Построение СППР на основе онтологии молочного производства / С.С. Акимов, И.П. Болодурина // Онтология проектирования. – 2021. – Т. 11. – № 1(39). – С. 64-75.
10. Алиментарная патология животных / Г. К. Дускаев, С. В. Нотова, Г. И. Левахин, Н. Н. Докина. – Оренбург : Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук", 2021. – 54 с.
11. Анализ препаратов на основе наночастиц микроэлементов, применяемых в животноводстве и ветеринарии / П.А. Красочко, Т.И. Лебедева, И.А. Красочко [и др.] // Сборник научных трудов Краснодарского научного центра по зоотехнии и ветеринарии. – 2021. – Т. 10. – № 1. – С. 92-99
12. Анализ развития цифровых технологий в «умных» фермах / Н. М. Сурай, М. Г. Кудинова, Е. В. Уварова, Е. И. Жидких // Инновации и инвестиции. – 2021. – № 10. – С. 184-188.
13. Ананьев, М. А. Методологические основы стратегического управления национальной системой продовольственного обеспечения / М. А. Ананьев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Общественные науки. – 2017. – № 2(42). – С. 207-213.
14. Ананьев, М. А. Применение информационных технологий в АПК / М. А. Ананьев, Ю. В. Ухтинская // Системное управление. – 2012. – № 4(17). – С. 6.
15. Анищенко, А.Н. О направлениях активизации инновационных процессов в молочном скотоводстве региона / А.Н. Анищенко // Проблемы развития территории. – 2017. – №2 (88). – С. 192-206.
16. Антонов, Л. В. Методы и алгоритмы диагностики и прогнозирования функционального состояния животных в дойном стаде на основе анализа временных рядов показателей их жизнедеятельности : специальность 05.13.01 "Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям)" :

диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Антонов Лев Васильевич, 2018. – 181 с.

17. Арсаханова, З. А. Анализ тенденций развития сельскохозяйственного сектора в России / З. А. Арсаханова // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. – 2023. – № 6.

18. Бабкина, А. В. Применение методов экономико-математического моделирования для инвестиционного проектирования в молочном скотоводстве / А. В. Бабкина, Е. А. Ермакова // Известия Международной академии аграрного образования. – 2018. – № 43. – С. 98-101.

19. Белоус, А. А. Система оценки мясного скота по показателям эффективности использования корма и энергии роста на основе применения цифровых и геномных технологий (обзор) / А. А. Белоус, А. А. Сермягин, Н. А. Зиновьева // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57, № 6. – С. 1055-1070.

20. Биологические особенности животных с феноменом «нагруженного метаболизма» / С. В. Нотова, С. А. Мирошников, О. А. Завьялов [и др.]. – Оренбург : Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук", 2020. – 238 с.

21. Болодурина, И. П. Информационная система поддержки принятия решений при мониторинге состояния здоровья в условиях вредных факторов производств / И. П. Болодурина, О. С. Косткина // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2007. – Т. 14, № 2. – С. 265-266.

22. Болодурина, И. П. Разработка системы поддержки принятия решений для повышения продуктивности молочного животноводства / И. П. Болодурина, С. А. Соловьев, С. С. Акимов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2020. – Т. 20. – № 2. – С. 36-44.

23. Векленко, В.И. Эффективность государственного регулирования сельского хозяйства / В.И. Векленко, Э.М. Алхастова // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – №2. – С. 51-56.

24. Вертий, М. В. Цифровые технологии в развитии АПК региона / М. В. Вертий, Л. А. Белова // Естественно-гуманитарные исследования. – 2023. – № 2(46). – С. 54-61.

25. Волкова, Г.А. Использование методов математического моделирования при планировании развития молочного скотоводства / Г.А. Волкова // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – №3 (11). – С. 35-39.

26. Гаганов, А. П. К оценке качества объемистых кормов / А. П. Гаганов // Адаптивное кормопроизводство. – 2020. – № 2. – С. 68-101.

27. Годжиев, Р. С. Анализ молочной продуктивности коров на примере сельскохозяйственно-производственного кооператива "Ардон" Ардонского района Республики Северная Осетия-Алания / Р. С. Годжиев, О. К. Гогаев, Г. С. Тукфатулин // Известия Горского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 57. – № 1. – С. 79-82.

28. Гололобова, С. Н. Цифровые двойники в АПК / С. Н. Гололобова // Пищевые инновации и биотехнологии : Сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 17 мая 2022 года / Под общей редакцией А.Ю. Просекова. Том 2. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 16-17.

29. Гололобова, С. Н. Цифровые двойники в АПК / С. Н. Гололобова // Пищевые инновации и биотехнологии : Сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Кемерово, 17 мая 2022 года / Под общей редакцией А.Ю. Просекова. Том 2. – Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2022. – С. 16-17.

30. Голубев, И. Г. Перспективные направления цифровизации инженерной сферы АПК / И. Г. Голубев, А. С. Апатенко, Н. С. Севрюгина // Перспективные направления рационального землепользования и цифровизация земледелия : Сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук, Курск, 02–04 октября 2023

года. – Курск: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Курский федеральный аграрный научный центр", 2023. – С. 54-57

31. ГОСТ Р 55272-2012. Системы менеджмента организаций. Рекомендации по структуре и составу элементов : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2013-06-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 8 с.

32. ГОСТ Р 57700.37-2021. Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2021-09-16 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. – Изд. официальное. – Москва : Российский институт стандартизации, 2021. – 15 с.

33. Демидов, П. В. Цифровые технологии и автоматизированные системы управления в молочном животноводстве / П. В. Демидов // Теория и практика инновационных технологий в АПК : материалы национальной научно-практической конференции, Воронеж, 15–23 марта 2022 года. Том Часть IV. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. – С. 420-426.

34. Дибиров, А. А. Концептуальные основы цифровой трансформации сельскохозяйственной организации / А. А. Дибиров // Экономика сельского хозяйства России. – 2023. – № 6. – С. 32-40.

35. Дорохов, А. С. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения / А. С. Дорохов, Д. Ю. Павкин, С. С. Юрочка // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25. – № 4. – С. 14-25.

36. Епимахова, М. С. Отечественный и зарубежный опыт развития цифровых двойников / М. С. Епимахова // Знания молодых - будущее России : Сборник статей XX Международной студенческой научной конференции, Киров, 06–08 апреля 2022 года. Том Часть 5. – Киров: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Вятский государственный агротехнологический университет, 2022. – С. 248-250.



37. Ерешко, Ф. И. Сквозные технологии в АПК на основе цифровых стандартов / Ф. И. Ерешко, В. И. Меденников, В. В. Кульба // Информационное общество. – 2020. – № 3. – С. 25-33.

38. Иванов, Ю.А. Цифровая молочная ферма на 400 коров / Ю.А. Иванов, В.К. Скоркин, Д.К. Ларкин // Международный технико-экономический журнал. – 2019. – № 1. – С. 7-13.

39. Идинов, К. И. Обзор некоторых управленческих решений для повышения продуктивности молочного производства / К. И. Идинов, М. А. Адижапарова, У. Усупбеков // Ежеквартальный научно-информационный журнал "Экономический вестник". – 2021. – № 1,2. – С. 77-79.

40. Израэль, Ю.А. Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России / Ю.А. Израэль, О.Д. Сиротенко // Метеорология и гидрология. - 2003. - № 6. - С.5-17.

41. Интеллектуальная система управления и обеспечения эффективного производства продукции молочного скотоводства умной фермы / Ю. А. Иванов, В. К. Скоркин, П. И. Гриднев, Д. К. Ларкин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – Т. 20, № 1. – С. 57-67.

42. Исаев, С. В. Концепция природно-технических систем и ее использование при изучении антропогенной трансформации природной среды / С. В. Исаев // Географический вестник. – 2016. – № 3(38). – С. 105-113.

43. Использование цифровых технологий в АПК. Компьютерные сети. Информационная безопасность / И. А. Черенкова, И. В. Кутликова, М. В. Новиков, В. В. Степанишин. – Москва : Научные технологии, 2022. – 128 с.

44. Кабулова, М. Ю. Применение статистических методов управления качеством при производстве молочной продукции / М. Ю. Кабулова, Э. И. Рехвиашвили // Перспективы развития АПК в современных условиях : материалы 6-й международной научно-практической конференции, Владикавказ, 07–08 апреля 2016 года. – Владикавказ: Горский государственный аграрный университет, 2016. – С. 143-144.

45. Кислицкий, М. М. Цифровые двойники сельскохозяйственных машин и оборудования в системе обеспечения продовольственной безопасности: значение и перспективы / М. М. Кислицкий, Д. А. Миронов, А. С. Лылов // Теория и практика мировой науки. – 2022. – № 12. – С. 27-29.

46. Клеточный протеом, литий, системные эффекты: биоинформационный анализ взаимосвязей / К. С. Остренко, О. А. Громова, И. Ю. Торшин, И. С. Сардарян // Проблемы биологии продуктивных животных. – 2019. – № 3. – С. 5-19.

47. Козина, А. М. Повышение эффективности управления в молочном производстве на основе инновационных подходов / А. М. Козина, Л. П. Семкив // Вестник Новгородского филиала РАНХиГС. – 2017. – Т. 6, № 2(8). – С. 24-29.

48. Козина, А.М. Оценка эффективности управления отраслью молочного скотоводства с использованием многомерного анализа / А.М. Козина, О.Д. Притула, Л.П. Семкив // Научные известия. – 2016. – №5. – С.21-28.

49. Кокорев, Д. С. Цифровые двойники: понятие, типы и преимущества для бизнеса / Д. С. Кокорев, А. А. Юрин // Colloquium-Journal. – 2019. – № 10-2(34). – С. 101-104.

50. Корольков, А. А. цифровые двойники / А. А. Корольков // Россия молодая : Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 19–21 апреля 2022 года / Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.]. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 213091-213094.

51. Косткина, О. С. Информационная система поддержки принятия решений при мониторинге состояния здоровья людей в условиях вредных производств : специальность 05.13.10 "Управление в социальных и экономических системах" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Косткина Ольга Сергеевна. – Оренбург, 2007. – 124 с.

52. Красильникова, Л. Е. Цифровые технологии как фактор инновационного развития информационного обеспечения управления сельскохозяйственным

предприятием по производству молочной продукции / Л. Е. Красильникова // Аграрный вестник Урала. – 2020. – № S13. – С. 38-45.

53. Ламм, А. К. Обобщённая концепция технико-экономического обоснования разработки цифровых двойников в сельском хозяйстве / А. К. Ламм, Р. К. Расулов // Экономика сельского хозяйства России. – 2023. – № 11. – С. 74-79.

54. Левахин, Г.И. Химический состав и переваримость высокоэнергетических кормовых добавок / Г.И. Левахин, Г.К. Дускаев, Б.С. Нуржанов, В.А. Рязанов, И.С. Мирошников, А.Ф. Рысаев // Животноводство и кормопроизводство. – 2015. – №4 (92). – С. 115-119.

55. Литвинов, В. Н. К разработке информационной системы предприятия по производству молока / В. Н. Литвинов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 111. – С. 1341-1357.

56. Макаревич, И. В. Внедрение современных технологий в агропромышленном комплексе: цифровые двойники / И. В. Макаревич // Конкурс научно-исследовательских работ студентов Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – С. 264-265.

57. Маринченко, Т.Е. Перспективные разработки в области молочного скотоводства / Т.Е. Маринченко // Техника и технологии в животноводстве. – 2020. – № 2(38). – С. 124-129.

58. Мирзасаидов, М. И. Методические аспекты создания цифровых двойников почвенной среды / М. И. Мирзасаидов // Известия Дагестанского ГАУ. – 2023. – № 4(20). – С. 237-244.

59. Мирошников, С.А. Феномен нагруженного метаболизма и продуктивность молочных коров / С.А. Мирошников, О.А. Завьялов, А.Н. Фролов, М.Я. Курилкина // Животноводство и кормопроизводство. – 2019. – Т 102. – №2. – С. 30-45.

60. Михайленко, И.М. Математическое моделирование и оценивание химического состояния почвенной среды по данным дистанционного

зондирования Земли / И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин // Международный научно-исследовательский журнал. - 2018. - №9-2(75). - С.26-37.

61. Морозов, Н. М. Методические основы разработки стратегии механизации и автоматизации животноводства / Н. М. Морозов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2015. – № 1(17). – С. 9-20.

62. Московский, М. Н. Разработка микропроцессорной системы управления высевом семян / М. Н. Московский, М. А. Литвинов, А. А. Адамян // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 7(58). – С. 16.

63. Мусаева, М. Н. Значение микроэлементов в кормлении крупного рогатого скота / М. Н. Мусаева // Прикаспийский вестник ветеринарии. – 2023. – № 4(5). – С. 69-75/

64. Мусина, Д. Р. Моделирование управленческих воздействий на субъекты агропромышленного комплекса в цифровой отраслевой платформе / Д. Р. Мусина, А. В. Янгиров, С. В. Харитонов // Дискуссия. – 2021. – № 4(107). – С. 42-48.

65. Некрасов, Д. Влияние отдельных факторов на пожизненную продуктивность коров / Д. Некрасов, А. Колганов // Молочное и мясное скотоводство. – 2006. – №5. – С. 28-31.

66. Нечаева, М. Л. "Цифровые двойники" как основа для применения современных информационных и коммуникационных технологий в области экономического анализа АПК / М. Л. Нечаева, М. С. Епимахова // От ЭВМ "Наири" к Higt-tech : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, посвященной 45-летию кафедры информационных технологий и статистики, Киров, 16 декабря 2021 года. – Киров: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Вятский государственный агротехнологический университет, 2022. – С. 74-77.

67. Нотова, С. В. Роль микроэлементов в антиоксидантной системе защиты организма / С. В. Нотова, О. В. Маршинская, Т. В. Казакова // Животноводство и кормопроизводство. – 2023. – Т. 106, № 1. – С. 183-191.

68. Пантелеева, Т. А. Современные цифровые технологии в секторе АПК: анализ и тенденции / Т. А. Пантелеева // Экономика и предпринимательство. – 2020. – № 11(124). – С. 172-175.

69. Перспективный способ восполнения жизненно-важных микроэлементов в кормовых травах / С.П. Замана, Л.И. Бойценюк, О.А. Сорокина, Е.П. Ананичева // Московский экономический журнал. – 2021. – № 2. – С. 20-24.

70. Печеный, Е. А. Самоорганизующаяся кластеризация потока больших данных / Е. А. Печеный, Н. К. Нуриев, С. Д. Старыгина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2020. – № 1(49). – С. 10-20.

71. Погоньшев, В. А. Использование цифровых двойников на предприятиях АПК / В. А. Погоньшев, Д. А. Погоньшева, Н. А. Иванова // Актуальные вопросы экономики и агробизнеса : СБОРНИК ТРУДОВ, Брянск, 23–24 марта 2023 года / БРЯНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2023. – С. 351-356.

72. Погоньшев, В. А. Цифровые двойники в сфере АПК / В. А. Погоньшев, В. Е. Ториков, Д. А. Погоньшева // Современные тенденции развития аграрной науки : Сборник научных трудов международной научно-практической конференции, Брянск, 01–02 декабря 2022 года / Брянский государственный аграрный университет. Том Часть 2. – Брянск: Брянский государственный аграрный университет, 2022. – С. 729-734.

73. Постановление Правительства РФ от 14 июля 2012 г. № 717 «О Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013—2020 годы». Собрание законодательства РФ. – 06.08.2012. – № 32. – ст. 4549.

74. Пыткин, А. В. Цифровизация информационного обеспечения управленческих решений в системе менеджмента сельскохозяйственным предприятием по производству молочной продукции / А. В. Пыткин // Проблемы и перспективы развития АПК региона с использованием дистанционных технологий : материалы краевой студенческой научно-практической конференции , Пермь, 07–08 декабря 2020 года / Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования «Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова». – Пермь: ИПЦ Прокрость, 2021. – С. 103-105.

75. Разработка модели электронной информационной среды управления сельскохозяйственным предприятием молочного животноводства / О.А. Коваленко, А.В. Глущенко, И.Ф. Горлов, Д.А. Мосолова // Инновационное развитие аграрно-пищевых технологий: Материалы международной научно-практической конференции, Волгоград, 17-18 июня 2021 года / Под общей редакцией И.Ф. Горлова. – Волгоград: Общество с ограниченной ответственностью "СФЕРА", 2021. – С. 35-42.

76. Рассказов, А. Н. Перспективы молочного скотоводства / А. Н. Рассказов // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 4(36). – С. 174-177.

77. Российскому АПК помогут цифровые двойники // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации : [сайт]. – 2024. – URL: <https://mcx.gov.ru/ministry/departments/dit/news/rossiyskomu-apk-pomogut-tsifrovye-dvoyniki/?ysclid=lqp8u9yt40219556768> (дата обращения: 02.01.2024).

78. Самсонова, Т. С. Микроэлементный состав продуктов животноводства, получаемых в условиях природно-техногенных провинций региона / Т. С. Самсонова, О. А. Гуменюк // Вопросы нормативно-правового регулирования в ветеринарии. – 2021. – № 1. – С. 102-105.

79. Седов, А. М. Цифровая трансформация управления в молочном животноводстве на базовой платформе интегрированных компьютерных систем "Стимул" и "Селекс" / А. М. Седов // Вестник ВИЭСХ. – 2018. – № 3(32). – С. 43-49.

80. Сергеева, Н. В. Повышение продуктивности молочного животноводства с помощью современных инженерных решений / Н. В. Сергеева // Чайновские чтения : Материалы I Международной научно-практической конференции по проблемам развития аграрной экономики, Москва, 14–15 октября 2020 года. –

Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Научный консультант", 2020. – С. 105-110.

81. Скоркин, В. К. Молочные фермы сегодня и завтра / В. К. Скоркин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2019. – № 2(34). – С. 37-42.

82. Следков, Ю. Г. Цифровой двойник процессов восстановления сельскохозяйственной техники / Ю. Г. Следков, П. М. Кузнецов, А. О Бутко // Инженерные технологии и системы. – 2021. – №. 4. – С. 530-543.

83. Соколов, Н. А. Региональный механизм управления производством молочных продуктов в хозяйствах населения / Н. А. Соколов, Е. М. Подольникова, А. О. Храмченкова // Никоновские чтения. – 2016. – № 21. – С. 190-192.

84. Сосфенов, Д. А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития / Д. А. Сосфенов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 4. – С. 35-43.

85. Спешилова, Н. В. Интеллектуализация технологии подготовки управленческих решений в условиях цифровизации экономики : (на примере регионального сельскохозяйственного производства) / Н. В. Спешилова, В. Н. Шепель. – Оренбург : Экспресс-печать, 2022. – 152 с.

86. Спешилова, Н.В. Формирование кормового рациона скота на основе оптимизационного моделирования / Н.В. Спешилова, М.А. Древина, Р.Н. Абдулгазизов // Сб. научных трудов по материалам междунар. научно-практич. конф. «Вопросы образования и науки в XXI веке». – Тамбов: Издательство ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 134–140.

87. Стальная, М.И. Исследование элементного состава растений / М.И. Стальная // Новые технологии. – 2007. – №3. – С. 91-94.

88. Степанец, М. Э. Функции участников в процессе принятия решений на основе внедрения цифровых технологий в АПК / М. Э. Степанец // Молодые аграрии Ставрополя : сборник студенческих научных трудов по материалам 86-й научно-практической конференции. – Ставрополь : АГРУС Ставропольского государственного аграрного университета, 2021. – С. 125-128.

89. Сухоруков, Д. С. Применение тренажеров сельскохозяйственных машин в профессиональном обучении / Д. С. Сухоруков, В. С. Никульников // Актуальные проблемы естественнонаучного образования, защиты окружающей среды и здоровья человека. – 2017. – Т. 6, № 6. – С. 69-73.

90. Теплоков, Д. Е. Управление количеством вредных веществ в атмосфере / Д. Е. Теплоков, А. Б. Усов // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5(89). – С. 359-366.

91. Тихомиров, И.А. Повышение эффективности использования кормовых ресурсов в системе технологической модернизации молочного скотоводства / И.А. Тихомиров, В.К. Скоркин // Вестник Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства. – 2018. – № 1(29). – С. 66-73.

92. Толеугалиева, С. Т. Экспортқа бағытталу жағдайында сүт өнімдерінің бәсекеге қабілеттілігін арттыру / С. Т. Толеугалиева // Central Asian Economic Review. – 2019. – No. 4(127). – P. 142-155.

93. Тренды и тенденции развития спроса на цифровые технологии в АПК / Л. Ю. Питерская, Т. Л. Ищенко, К. А. Назаретян, Н. Т. Кумпилов // Вестник Академии знаний. – 2022. – № 53(6). – С. 211-214.

94. Трипкош, В. А. Оценка временной сложности алгоритмов распознавания, основанных на решении составной байесовской задачи / В. А. Трипкош, С. С. Акимов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2020. – № 1. – С. 24-28.

95. Указ Президента РФ от 21 января 2020 г. № 20 «Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 27.01.2020. – № 4. – ст. 345.

96. Умаханов, М.А. Роль микроэлементов в жизни растений и животных / М.А. Умаханов // Селекционно-генетические аспекты развития молочного скотоводства: Сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященная 90-летию со дня рождения видного государственного и политического деятеля Ш.И. Шихсаидова, Махачкала,



04–05 июля 2019 года. – Махачкала: ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Республики Дагестан», 2019. – С. 335-342.

97. Фасхутдинова, М. С. Цифровизация в сельскохозяйственных предприятиях / М. С. Фасхутдинова, Н. Б. Ларионова, Р. А. Латыпов // Научное обозрение: теория и практика. – 2021. – Т. 11, № 4(84). – С. 1053-1062.

98. Федоренко В.Ф., Голубев И.Г. Перспективы применения аддитивных технологий при производстве и техническом сервисе сельскохозяйственной техники. – М.: Издательство Юрайт, 2022. – 137 с.

99. Хту, К. А. Алгоритмы и программные средства обработки данных на основе математических моделей с использованием динамической визуализации : специальность 05.13.11 "Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов и компьютерных сетей" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Хту Кхант Аунг, 2022. – 156 с.

100. Цифровизация отраслей растениеводства на основе технологий виртуальной и дополненной реальности / Л. Ф. Ситдикова, Ф. Н. Мухаметгалиев, А. С. Лукин [и др.] // Финансовый бизнес. – 2022. – № 11(233). – С. 66-72.

101. Чекалдин, А. М. Об управлении производством продукции в молочном подкомплексе АПК / А. М. Чекалдин // Инновационное развитие. – 2018. – № 10(27). – С. 88-90.

102. Шатова, М. Н. Корреляционно-регрессионный анализ как инструмент исследования в сельском хозяйстве / М. Н. Шатова, О. В. Ментюкова // Инновационные идеи молодых - десятилетие науки и технологий : Сборник материалов Международной научно-практической конференции, Пенза, 30 ноября 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный аграрный университет, 2023. – С. 22-27.

103. Шахназарян, Г.Э. Молочное скотоводство России: проблемы, пути их преодоления // Региональная экономика: теория и практика. – 2018. – Т. 16. – № 7. – С. 1303-1319.

104. Эдер, А. В. Информационные технологии как драйвер цифрового развития экономики АПК РФ / А. В. Эдер, О. В. Иванов // Пищевая промышленность. – 2020. – № 3. – С. 51-53.

105. Юрченко, И. Ф. Становление Цифровых платформ мелиоративного водохозяйственного комплекса / И. Ф. Юрченко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2020. – № 1(57). – С. 380-395.

106. A multidimensional approach to assessing the elemental status of an organism / S. Akimov, P. Vedeneev, E. Kiyaeva [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 913, No. 1. – P. 012002.

107. Akimov, S. Multidimensional model for estimating the error in the diagnosis of the organism elemental status / S. Akimov, P. Vedeneev, A. M. Pishchukhin // International Review of Automatic Control. – 2018. – Vol. 11, No. 4. – P. 198-202.

108. Berentsen P.B.M. Effects of animal productivity on the costs of complying with environmental legislation in dutch dairy farming / P.B.M. Berentsen // Livestock Production Science. – 2003. – Т. 84. – № 2. – С. 183-194.

109. Berman A. Invited review: are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates? / A. Berman // Journal of Dairy Science. – 2011. – Т. 94. – № 5. – P. 2147-2158.

110. Bína, V. Anomaly Detection in Time Series for Smart Agriculture / V. Bína, J. Bartošová, V. Příbyl // International Journal of Management, Knowledge and Learning. – 2022. – Vol. 11.

111. Bolodurina, I. P. Intelligent methods for assessing the productivity of dairy cattle based on a comprehensive study of elemental status / I. P. Bolodurina, S. S. Akimov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Omsk City, Western Siberia, 04–05 июля 2020 года. – Omsk City, Western Siberia, 2021. – P. 012020.

112. Chen, M. Synthesis and applications of nanoparticles in biology / M. Chen, W. Yang, M. Yin // Progress in Chemistry. – 2012. – Vol. 24, No. 12. – P. 2403-2414.

113. Elemental status of farm animals from different regions with different environmental loads / O. V. Marshinskaia, T. V. Kazakova, S. V. Notova, // IOP

Conference Series: Earth and Environmental Science, Omsk City, Western Siberia, 04–05 июля 2020 года. – Omsk City, Western Siberia, 2021. – P. 012199.

114. Grieves, M.W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises / M.W. Grieves // International journal of product development. – 2005. –Т. 2. – P. 71-84.

115. Influence of toxic load on milk producing ability / Т. V. Kazakova, O. V. Marshinskaia, S. V. Notova, // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Omsk City, Western Siberia, 04–05 июля 2020 года. – Omsk City, Western Siberia, 2021. – P. 012193.

116. Is systems research addressing the current and future needs of dairy farms? / P.J.M. Raedts, R.P.Rawnsley, S.C. Garcia, D.F. Chapman, G.R. Edwards, N. Lane // Animal Production Science. – 2017. – Т. 57. – № 7. – С. 1311-1322.

117. Kazakova, T. PSX-B-25 Milk productivity and zinc species analysis in cattle depending on the level of lead accumulation / Т. Kazakova, O. Marshinskaia, S. Notova // Journal of Animal Science. – 2021. – Vol. 99, No. S3. – P. 272-273.

118. Kazakova, T. V. Milk productivity of cows and the content of the metal-ligand forms of iron / Т. V. Kazakova, O. V. Marshinskaia, S. V. Notova // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volgograd, 17–18 июня 2021 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering. Vol. Volume 848. – Krasnoyarsk, Russian Federation: IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 12026.

119. Lialina, N. Influence of the intensity of feed costs on efficiency of dairy cattle breeding / N. Lialina // Agricultural and Resource Economics. – 2018. – Vol. 4, No. 1. – P. 109-119.

120. Method for identifying the interaction of elements in the organism / A. M. Pishchukhin, S. S. Akimov, G. F. Akhmedyanova, T. A. Pishchukhina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. Vol. 341. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012184.

121. Nazarov, E. A. Digital transformation of agriculture – opportunities and perspectives / E. A. Nazarov, B. Zh. Burkhanov, N. K. Nurmash // Қорқыт Ата атындағы Қызылорда мемлекеттік университетінің. – 2022. – Vol. 62, No. 3. – P. 169-180.

122. Networked multisensor decision and estimation fusion: Based on advanced mathematical methods / Y. Zhu, J. Zhou, X. Shen [et al.] // Networked Multisensor Decision and Estimation Fusion: Based on Advanced Mathematical Methods, 2012. – P. 1-410.

123. Pishchukhin, A. M. The influence of body mass on its elemental status / A. M. Pishchukhin, S. S. Akimov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science : The proceedings of the conference AgroCON-2019, Kurgan, 18–19 апреля 2019 года. Vol. 341. – Kurgan: IOP Publishing Ltd, 2019. – P. 012185.

124. Rudramurthy, G. R. Potential applications of engineered nanoparticles in medicine and biology: an update / G. R. Rudramurthy, M. K. Swamy // Journal of Biological Inorganic Chemistry. – 2018.

125. Vasylieva, N. Development of the controlling system in the management of dairy clusters / N. Vasylieva, O. Velychko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4. – No 3(88). – P. 20-26.

126. Wang, E. C. Nanoparticles and their applications in cell and molecular biology / E. C. Wang, A. Z. Wang // Integrative Biology. – 2014. – Vol. 6, No. 1. – P. 9-26.

127. White, P.J.C. Routes to achieving sustainable intensification in simulated dairy farms: the importance of production efficiency and complimentary land uses / P.J.C. White, M.A. Lee, D.J. Roberts, L.J. Cole // Journal of Applied Ecology. – 2019. – T. 56. – № 5. – P. 1128-1139.

## Приложение А

### Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611055

**Программа многомерной оценки элементного статуса  
организма «SMES»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский  
государственный университет» (RU)*

Авторы: *Пищухин Александр Михайлович (RU), Нотова Светлана  
Викторовна (RU), Веденеев Павел Валентинович (RU), Кияева  
Елена Викторовна (RU), Акимов Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2017662397

Дата поступления 30 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 января 2018 г.



*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

*Г.П. Ивлиев*

# РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023665602

### Программа оценки динамики межэлементных связей микроэлементного состава организма EDIC

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет» (RU)*

Авторы: *Боровский Александр Сергеевич (RU), Акимов Сергей Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023664192

Дата поступления 07 июля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программы для ЭВМ 18 июля 2023 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

принимает подписи электронным способом  
Служба по интеллектуальной собственности  
Владимир Зубов Юрий Сергеевич  
117912, Москва, ул. Мясницкая, д. 26

Ю.С. Зубов