

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



Мамедов Тимур Габилевич

**МЕТОДЫ, МОДЕЛИ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В
ПРОГНОЗНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА**

Специальность 1.2.2 Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук,
Массель Алексей Геннадьевич

Иркутск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. Анализ текущего состояния прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности	15
1.1. Анализ текущего состояния исследований проблем энергетической безопасности	16
1.1.1. Понятие энергетической безопасности.....	17
1.1.2. Чрезвычайные и критические ситуации. Угрозы энергетической безопасности	19
1.1.3. Общая схема исследований проблем энергетической безопасности	25
1.2. Описание существующих подходов, технологий и инструментальных средств поддержки исследований энергетической безопасности.....	27
1.2.1. Интеллектуальная поддержка анализа угроз энергетической безопасности и обоснования мероприятий по обеспечению ЭБ.....	27
1.2.2. Программные средства для исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса	33
1.2.3. Развитие инструментальных средств семантического моделирования в ИСЭМ СО РАН.....	40
1.3. Выводы по главе и постановка задачи	44
ГЛАВА 2. Интеграция методов и средств семантического и математического моделирования в исследованиях энергетической безопасности	47
2.1. Формализованная модель вычислительного эксперимента на основе фрактального стратифицированного подхода к структурированию знаний	48
2.2. Методические основы интеграции математического, семантического и когнитивного моделирования в исследованиях развития ТЭК с позиции обеспечения ЭБ.....	56
2.2.1. Экономико-математическая модель ТЭК и ее расширение экономическими, экологическими и квазидинамическими уравнениями	56

2.2.2. Методика интеграции математического и семантического моделирования в исследованиях развития ТЭК с позиции обеспечения ЭБ..	60
2.3. Численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов	72
2.4. Проектирование ПК «ИНТЭК-SAW»	78
2.5. Выводы по главе	98
ГЛАВА 3. Реализация ПК «ИНТЭК-SAW» и его применение в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности	100
3.1. Архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW».....	101
3.2. Реализация программного комплекса «ИНТЭК-SAW»	105
3.3. Технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК, интегрирующая семантическое и математическое моделирование.....	156
3.4. Апробация разработанного методического и программного обеспечения	159
3.4.1. Вычислительный эксперимент с угрозой «Выбросы CO ₂ »	160
3.4.2. Вычислительный эксперимент с природной угрозой «Маловодье» в Сибирском ФО.....	167
3.4.3. Вычислительный эксперимент с техногенной угрозой «Повреждение Уральского газотранспортного коридора»	172
3.4.4. Вычислительный эксперимент «Дефицит инвестиций в развитие газовой отрасли 2025–2030 гг.»	177
3.5. Выводы по главе	183
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	185
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	187
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	189
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.....	203
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Основные виды угроз энергетической безопасности.....	210
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования	213

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью совершенствования прогнозных исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Развитие ТЭК определяется совокупностью внешних и внутренних факторов, влияющих на условия функционирования энергетики, состав и значимость угроз, а также на обоснование стратегических решений. Это требует развития моделей и инструментальных средств, применяемых в исследованиях энергетической безопасности. Такие исследования развиваются как в зарубежных, так и в российских научных школах. В зарубежной литературе исследования энергетической безопасности преимущественно связаны с анализом уязвимости энергетической инфраструктуры, оценкой устойчивости энергетических систем к возмущающим воздействиям, надежности энергоснабжения потребителей, а также со сценарным анализом последствий реализации природных, техногенных, экономических и геополитических угроз [1–5]. В России данные направления получили развитие в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН), Институте проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Институте энергетических исследований РАН (ИНЭИ РАН), Институте народнохозяйственного прогнозирования РАН (ИНП РАН), Центральном экономико-математическом институте РАН (ЦЭМИ РАН) и других организациях [6–8].

В ИСЭМ СО РАН в рамках исследований энергетической безопасности получило развитие направление, связанное с совместным использованием качественного и количественного анализа [9–11]. В данном направлении применяются методы семантического моделирования для формализации экспертных знаний об угрозах, факторах и мероприятиях, а также методы математического моделирования для количественной оценки состояний ТЭК. Вместе с тем сохраняется проблема недостаточной формализации перехода от

результатов семантического анализа к построению вычислительных сценариев и количественной оценке состояний ТЭК.

В связи с этим актуальной является разработка методов, моделей и инструментальных средств для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК, обеспечивающих интеграцию семантического, в том числе онтологического и когнитивного, моделирования с экономико-математической моделью ТЭК и вычислительным экспериментом.

Степень разработанности темы исследования. Исследования направлений развития топливно-энергетического комплекса, методов прогнозного анализа и обоснования стратегических решений в энергетике представлены в работах Л.А. Мелентьева, А.А. Макарова, А.С. Некрасова, Ю.Д. Кононова, Б.Г. Санеева и других авторов. В них заложены основы исследования развития ТЭК, анализа его балансовых, технологических и ресурсных ограничений, а также обоснования долгосрочных направлений развития энергетики.

Проблемы энергетической безопасности получили развитие в работах Ю.Н. Руденко, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая, А.И. Татаркина, Л. Д. Криворучко, С.М. Сендерова, А.А. Куклина, Н.И. Пятковой, А.В. Еделева, М.Б. Чельцова и других исследователей. В этих работах раскрыты содержание понятия энергетической безопасности, классификации угроз, подходы к оценке надежности энергоснабжения потребителей, устойчивости энергетических систем и к обоснованию мер по снижению негативных последствий реализации угроз.

Методы семантического моделирования, применяемые для анализа сложных слабоструктурированных предметных областей, отражены в трудах Т.Р. Грубера, П. П. Грумпоса, Т.А. Гавриловой, В.В. Грибовой, З.К. Авдеевой, Ю.А. Загорюлько, Г.Б. Загорюлько, С.В. Смирновой, Л.Р. Черняховской, Э.А. Трахтенгерца, Л.В. Массель, А.Г. Масселя, Т.Н. Ворожцовой и других авторов. В этих исследованиях разработаны подходы к формализации знаний, построению онтологий, выявлению причинно-следственных связей и поддержке экспертного анализа.

В зарубежных исследованиях долгосрочного развития энергетики получила развитие линия работ, связанная с согласованием содержательного описания сценариев и количественных расчетных оценок при анализе вариантов развития энергетических систем [12, 13]. В смежных исследованиях, связанных с анализом слабоструктурированных ситуаций и поддержкой принятия решений, развиваются методы онтологического описания предметной области, когнитивного моделирования, инженерии знаний и ситуационного анализа. Онтологические модели используются для формализации понятий, связей и правил предметной области [14], когнитивные модели, для представления факторов и причинно-следственных связей в слабоструктурированных ситуациях [7], интеллектуальные системы поддержки принятия решений, для структурирования экспертных знаний и поддержки анализа в слабо формализованных областях [15, 16]. Вместе с тем в указанных работах не рассматривается задача автоматизированного перехода от семантического описания угроз, факторов и мероприятий к формированию вычислительных сценариев экономико-математической модели ТЭК и количественной оценке состояний энергетической системы с позиции обеспечения энергетической безопасности.

В ИСЭМ СО РАН сформировано направление исследований, ориентированное на совместное использование методов семантического и математического моделирования в задачах энергетической безопасности. В его рамках развивались инструментальные средства онтологического, когнитивного, событийного и вероятностного моделирования, а также программные комплексы для проведения вычислительных экспериментов по исследованию направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Несмотря на значительный объем выполненных исследований, интеграция онтологического, когнитивного и математического моделирования в рамках единого вычислительного эксперимента требует дальнейшего развития. В частности, требуется формализовать переход от семантического представления и причинно-следственных связей фрагментов модели ТЭК к построению вычислительных сценариев, параметризации экономико-математической модели и количественной

оценке последствий рассматриваемых воздействий. Это определило выбор темы и направление настоящего исследования.

Целью диссертационного исследования является разработка методов, моделей и программного комплекса для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Для достижения цели поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ предметной области, существующих технологий и инструментальных средств проведения прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Разработать методику интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

3. Модифицировать экономико-математическую модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК, и разработать формализованную модель вычислительного эксперимента, отличающуюся интеграцией математических и семантических моделей.

4. Разработать численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов.

5. Реализовать многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW, поддерживающий предложенную методику, и модифицировать существующую технологию поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности на основе разработанного ПК.

Объект исследования — информационная технология прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Предмет исследования — методы для интеллектуальной поддержки принятия решений, включая методы интеграции математических и семантических

моделей для прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Научная новизна полученных результатов работы основана на модификации и развитии методов, моделей и программных средств прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности для интеллектуальной поддержки исследований на основе формализованной интеграции семантического и математического моделирования:

1. Впервые для прогнозных исследований ТЭК разработана методика интеграции математических и интеллектуальных технологий, отличающаяся совместным использованием онтологических, когнитивных и экономико-математических моделей и предусматривающая автоматизированный переход от качественного анализа к формированию вычислительных сценариев экономико-математической модели ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Модифицирована экономико-математическая модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК. Разработана формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.

3. Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК, отличающийся учетом когнитивных весов при формировании множества сценарных параметров.

4. Модифицирована технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, отличающаяся совместным использованием математических и семантических моделей, на основе применения разработанного многоагентного программного комплекса ИНТЭК-SAW.

Теоретическая значимость результатов заключается в разработке методического подхода к проведению исследований направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности, интегрирующего семантическое и математическое моделирование, отличающегося автоматизированным переходом от этапа качественного анализа к количественному, а именно, от онтологических и когнитивных моделей к математическим моделям.

Практическая значимость диссертационной работы определяется расширением инструментальных возможностей прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Разработанные методика, модели и программный комплекс позволяют формализовать переход от экспертного описания угроз, факторов и мероприятий к параметрам экономико-математической модели ТЭК и вычислительным сценариям, сократить множество содержательно избыточных расчетных вариантов и повысить интерпретируемость результатов вычислительного эксперимента.

Практическое применение результатов показано на вычислительных экспериментах по оценке последствий дефицита инвестиций в развитие газовой отрасли и влияния экологических ограничений на структуру топливно-энергетического баланса. Разработанный программный комплекс ИНТЭК-SAW может использоваться при подготовке материалов для обоснования стратегических решений по развитию ТЭК и мероприятий по снижению негативных последствий реализации угроз энергетической безопасности.

Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждается использованием результатов исследования в научно-исследовательской деятельности Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, передачей программного комплекса «ИНТЭК-SAW» в НИИ информационных технологий Ханты-Мансийского автономного округа (Югры), а также применением результатов в учебном процессе Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского государственного университета.

Методами и средствами исследования являются методические основы построения информационных технологий и интеллектуальных информационных систем в исследованиях энергетики, методы ситуационного анализа, семантического (онтологического и когнитивного) моделирования, методы объектного подхода (анализ, проектирование, программирование).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Методика интеграции математических и интеллектуальных технологий, предусматривающая автоматизированный переход от качественного анализа к формированию вычислительных сценариев экономико-математической модели ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. Модифицированная экономико-математическая модель ТЭК, учитывающая экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК. Разработанная формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.

3. Численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК, отличающийся использованием результатов обработки экспертных знаний, представленных в виде когнитивных весов причинно-следственных связей.

4. Модифицированная технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, отличающаяся совместным использованием математических и семантических моделей, на основе применения разработанного многоагентного программного комплекса ИНТЭК-SAW.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертационной работы соответствует паспорту научной специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) по следующим пунктам:

П.3. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента (положения 3, 4, выносимые на защиту).

П.8. Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента (положения 1, 2, 4 выносимые на защиту).

П.9. Постановка и проведение численных экспериментов, статистический анализ их результатов, в том числе с применением современных компьютерных технологий (технические науки) (положение 4, выносимое на защиту).

В диссертации представлены оригинальные результаты, соответствующие трем составляющим научной специальности 1.2.2:

1. **Математическое моделирование.** Модифицированная экономико-математическая модель территориально-отраслевого баланса ТЭК. Формализованная модель вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2. **Численные методы.** Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов причинно-следственных связей.

3. **Комплексы программ.** Разработан и реализован многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW, предназначенный для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Обоснованность и достоверность результатов диссертации. Обоснованность полученных результатов обеспечивается использованием теории математического моделирования, системного анализа, линейного программирования, онтологического и когнитивного моделирования, а также согласованностью предложенных методов с задачами прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Достоверность результатов подтверждается корректностью

постановок вычислительных экспериментов, использованием экономико-математической модели территориально-отраслевого баланса ТЭК, реализацией разработанных методических и алгоритмических решений в программном комплексе ИНТЭК-SAW, проведением серии расчетов по сценариям экологических, природных, техногенных и инвестиционных ограничений, а также содержательной непротиворечивостью полученных результатов известным закономерностям функционирования и развития ТЭК.

Апробация результатов работы. Результаты работы докладывались на Международных конференциях «International Conference of Young Scientists "Energy Systems Research"», г. Иркутск (Россия), 2021; «Science Present and Future: Research Landscape in the 21st century», г. Иркутск (Россия), 2022; «6th International Scientific Conference “Intelligent Information”», г. Стамбул (Турция), 2022; Международном конгрессе по интеллектуальным системам и информационным технологиям, Дивногорское (Россия), 2021 г.; научных семинарах «Critical Infrastructures in the Digital World», 2020–2026 гг.; XXV–XXIX Байкальских Всероссийских конференциях «Информационные и математические технологии в науке и управлении», г. Иркутск, 2020–2024 гг.; Международной конференции «Физико-техническая информатика – СРТ», г. Москва (Россия), 2022–2023 гг.

Результаты работы применены при выполнении:

- проектов, поддержанных грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ): гранты РФФИ № 20-07-00994 (2020–2022), № 19-57-04003 (2019–2020), № 18-07-00714 (2018–2020), грант Российского научного фонда (РНФ) № 22-21-00841 (2021–2023);

- проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН: III.17.2.1 «Проблемы разработки, адаптации и применения интеллектуальных информационно-телекоммуникационных технологий в интегрированных интеллектуальных энергетических системах», № госрегистрации АААА-А17-117030310444-2 (2017–2020);

- проекта по госзаданию ИСЭМ СО РАН: III.17.2 «Методология построения ИТ-инфраструктуры для разработки интеллектуальных систем управления

развитием и функционированием систем энергетики», № госрегистрации АААА-А21-121012090007-7 (2021–2025).

По результатам представленной работы в 2022 году автору присуждена стипендия губернатора Иркутской области. Автор является лауреатом конкурса Иркутской области (2024 г.) в составе коллектива в номинации «За лучшие научные, научно-технические и инновационные разработки молодых ученых» за разработку «Цифровая платформа для поддержки устойчивости энергетических и экологических систем Иркутской области», в которую вошли результаты автора.

Публикации по теме диссертационной работы. По теме исследования опубликованы 18 работ, из них 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (К2), 3 статьи проиндексированы в Scopus и/или Web of Science, получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и баз данных.

Объем и структура работы. Диссертация объемом 216 страниц состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 108 наименований и трёх приложений. Работа включает 47 рисунков. Основной текст изложен на 186 страницах.

Личный вклад автора. При выполнении диссертационного исследования часть вопросов обсуждалась автором совместно с коллегами: постановка задачи исследования выполнена при поддержке научного руководителя к.т.н. А.Г. Масселя; методические вопросы применения семантического моделирования и фрактального подхода к структурированию знаний обсуждались с д.т.н. Л.В. Массель; вопросы применения экономико-математической модели ТЭК и проведения вычислительных экспериментов обсуждались с к.т.н. Н.И. Пятковой. В обсуждении результатов работы приняли участие к.т.н. А.Г. Массель, д.т.н. Л.В. Массель, к.т.н. Н.И. Пяткова, к.т.н. А.В. Еделев, д.т.н. С.М. Сендеров.

Автором лично выполнены следующие работы: разработана методика интеграции математического, онтологического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической

безопасности; выполнена модификация экономико-математической модели ТЭК за счет введения экономических, экологических и квазидинамических уравнений; разработана формализованная модель вычислительного эксперимента, обеспечивающая совместное представление математических и семантических моделей; разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов; реализован многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW; выполнены вычислительные эксперименты по оценке влияния экологических, природных, техногенных и инвестиционных ограничений на состояния ТЭК; проведены анализ и интерпретация полученных расчетных результатов.

ГЛАВА 1. Анализ текущего состояния прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности

Первая глава диссертации посвящена изучению состояния предметной области прогнозных исследований ТЭК. В ней подробно рассмотрены понятия прогнозных исследований, связанных с развитием топливно-энергетического комплекса, а также вопросы обеспечения энергетической безопасности на уровне страны и ее регионов в России. В работе приведены подробные определения и представлена актуальная классификация угроз, оказывающих влияние на энергетическую безопасность.

Автор анализирует структуру исследований возможных направлений развития ТЭК с позиций ЭБ и рассматривает инструменты, способные поддерживать эти исследования. Особое внимание уделяется слабоструктурированным процедурам качественного анализа угроз энергетической безопасности и разработке мероприятий по снижению их негативных последствий, основанных на экспертных оценках.

В работе проводится анализ современных разработок, предлагающих методы для интеллектуальной поддержки принятия решений в сфере исследования и обеспечения ЭБ. К таким методам относятся онтологическое и когнитивное моделирование, основанные на ситуационном подходе. Автор подчеркивает важность интеграции этих интеллектуальных методов с методами математического моделирования и предлагает создать специализированное методическое и программное обеспечение для решения задачи интеграции и повышения эффективности проводимых исследований.

Проведенный анализ показывает недостаточную формализацию связи онтологического и когнитивного моделирования с параметрами экономико-математических моделей ТЭК. Это затрудняет переход от экспертного анализа к количественной оценке угроз и определяет необходимость интеграции семантического и математического моделирования [17, 18].

1.1. Анализ текущего состояния исследований проблем энергетической безопасности

Проблема энергетической безопасности в промышленно развитых странах стала очевидной после резкого роста цен на нефть в связи с арабо-израильским конфликтом 1973–1974 годов, что выявило их критическую зависимость энергоснабжения от импорта нефти [19, 20]. В 2012 г. была утверждена первая Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации, а позднее, в 2019 г., Указом Президента Российской Федерации № 216 была утверждена новая Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации, уточнившая состав вызовов, угроз и задач в сфере обеспечения устойчивого функционирования топливно-энергетического комплекса. Эти документы стали основой стратегического планирования в энергетике и были учтены при обновлении Энергетической стратегии России до 2050 года [21].

Энергетическая безопасность охватывает целый спектр важнейших вопросов, связанных с устойчивостью и надёжностью энергоснабжения страны и её регионов. Основные проблемы включают влияние экономических, социальных, политических, природных и техногенных факторов на доступность и непрерывность поставок энергоресурсов. Кроме того, особое внимание уделяется эффективности управления энергетической системой, рациональному использованию ресурсов и минимизации рисков от потенциальных угроз, таких, как перебои в снабжении, экологические инциденты и колебания спроса и цен на международных энергетических рынках [22]. Важной задачей является также выработка комплексных мер и стратегий для предотвращения и нейтрализации последствий возможных кризисных ситуаций в энергетической сфере.

1.1.1. Понятие энергетической безопасности

Топливо-энергетический комплекс Российской Федерации играет важную роль в национальной экономике и в обеспечении национальной безопасности страны [23]. В этих условиях особое значение приобретают задачи устойчивого, надежного и экономически эффективного обеспечения внутреннего спроса на топливо-энергетические ресурсы [24]. Поэтому энергетика выступает не только как отраслевой сектор экономики, но и как важнейший фактор устойчивости хозяйственных связей, социально-экономического развития и жизнеобеспечения населения [25].

Энергетическая безопасность (ЭБ) – состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечивается выполнение предусмотренных законодательством Российской Федерации требований к топливо- и энергоснабжению потребителей, а также выполнение экспортных контрактов и международных обязательств Российской Федерации [23]. В работах, посвящённых проблемам энергетической безопасности, она рассматривается как составная часть национальной безопасности, обладающая собственной спецификой, связанной с особенностями функционирования и развития топливо-энергетического комплекса и необходимостью обеспечения надёжного топливо- и энергоснабжения потребителей [26–29].

В отечественной научной школе, в том числе в исследованиях ИСЭМ СО РАН, энергетическая безопасность рассматривается в связи с угрозами дефицита топливо-энергетических ресурсов и нарушениями надежного топливо- и энергоснабжения потребителей [27, 28]. При этом речь идет как о штатных условиях функционирования ТЭК, так и об условиях крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в системах энергетики, когда особую значимость приобретает обеспечение потребителей энергоресурсами на минимально необходимом уровне [29]. Существенно, что энергетическая безопасность

определяется не только ресурсной обеспеченностью страны, но и состоянием энергетических систем, уровнем их надежности, степенью диверсифицированности энергоснабжения, наличием резервов и возможностью адаптации к возмущающим воздействиям различной природы [30].

Современные условия развития энергетики показывают, что энергетическая безопасность формируется на пересечении технических, экономических, территориальных и институциональных факторов. На ее состояние влияют уровень износа основных производственных фондов, инвестиционная обеспеченность развития энергетики, характер межрегиональных и внешнеэкономических связей, а также способность систем энергетики противостоять негативным воздействиям и сохранять устойчивость функционирования. В этой связи энергетическая безопасность не может сводиться только к наличию собственных энергоресурсов или к понятию энергетической независимости. Более адекватным является подход, при котором она рассматривается как комплексная характеристика состояния и развития ТЭК, отражающая его способность обеспечивать надежное топливо- и энергоснабжение потребителей в нормальных условиях и в условиях действия внутренних и внешних угроз [31–33].

В российской научной литературе энергетическая безопасность определяется как один из ключевых факторов обеспечения экономической и национальной устойчивости [29]. Это связано с тем, что нарушения в функционировании ТЭК способны вызывать не только отраслевые, но и широкие социально-экономические последствия, затрагивающие развитие территорий, устойчивость бюджетно-финансовой системы и условия жизнедеятельности населения. Поэтому современные подходы к обеспечению энергетической безопасности включают не только решение собственно энергетических задач, но и анализ угроз, оценку надежности систем энергетики, развитие энергосбережения, повышение энергоэффективности, укрепление межрегиональных связей и снижение уязвимости энергоснабжения потребителей [30, 31].

Таким образом, в рамках настоящего исследования энергетическая безопасность рассматривается как интегральная характеристика состояния

топливно-энергетического комплекса и систем энергетики, отражающая их способность обеспечивать бездефицитное и надежное топливо- и энергоснабжение потребителей в штатных условиях, а в условиях критических и чрезвычайных ситуаций обеспечивать гарантированное удовлетворение минимально необходимой потребности в энергии, сохраняя устойчивость к внутренним и внешним угрозам в долгосрочной перспективе.

1.1.2. Чрезвычайные и критические ситуации. Угрозы энергетической безопасности

В анализе энергетической безопасности существенное значение имеют понятия чрезвычайной и критической ситуаций, поскольку через них задаются режимы функционирования систем энергетики и оценивается допустимость отклонений в обеспечении потребителей топливно-энергетическими ресурсами [34, 35].

Понятие чрезвычайной ситуации закреплено в законодательстве Российской Федерации [36] и трактуется как обстановка, возникающая в результате аварий, природных или иных воздействий, приводящих к человеческим жертвам, материальному ущербу и нарушению условий жизнедеятельности населения. В контексте энергетической безопасности к чрезвычайным относятся ситуации, при которых нарушение функционирования объектов топливно-энергетического комплекса приводит к масштабным социально-экономическим последствиям и существенному нарушению топливо- и энергоснабжения потребителей.

В исследованиях энергетической безопасности используется также более общее понятие ситуаций с нарушением требований энергетической безопасности, под которыми понимается совокупность условий, формирующихся под воздействием природных, техногенных, экономических и иных факторов и приводящих к снижению надежности и доступности энергоснабжения. Такие ситуации носят системный характер и затрагивают функционирование

региональных энергетических систем и взаимосвязанных отраслей экономики [28, 37].

Для описания состояний, предшествующих чрезвычайным, применяется понятие критической ситуации. Критической считается ситуация, при которой параметры функционирования систем энергетики приближаются к предельным значениям и сохраняется высокая вероятность перехода в чрезвычайное состояние при дальнейшем развитии негативных воздействий [38, 39]. К таким ситуациям относятся снижение резервов топлива и мощностей ниже допустимых уровней, ухудшение балансовых характеристик, а также развитие цепочек отказов, ограничивающих возможности обеспечения потребителей энергоресурсами.

Выделение критических ситуаций как самостоятельного режима функционирования имеет важное методическое и практическое значение, поскольку позволяет рассматривать процессы деградации энергетических систем на ранних стадиях и принимать меры по предотвращению перехода к чрезвычайным состояниям. Данный подход согласуется с положениями Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации, в которой подчеркивается необходимость обеспечения устойчивого функционирования топливно-энергетического комплекса и снижения уязвимости его ключевых элементов в условиях действия совокупности угроз [23].

Особую роль в современных условиях играет состояние критической энергетической инфраструктуры, поскольку нарушение функционирования ее отдельных объектов способно вызвать существенные социально-экономические последствия. Существенное значение здесь имеет реализация угроз энергетической безопасности в сфере газа как доминирующего первичного энергоресурса в топливно-энергетическом балансе, проявляющихся в условиях высокой зависимости ряда регионов от его надежных поставок, ограниченности резервов и значительной протяженности транспортных связей [32]. В региональном разрезе это обуславливает различия в чувствительности территорий к нарушениям энергоснабжения, что подтверждается разработанными подходами к мониторингу состояния энергетической безопасности на региональном уровне [22]. Вместе с тем

в исследованиях ИСЭМ СО РАН показано, что при анализе критической инфраструктуры необходимо учитывать не только техническое состояние отдельных объектов, но и их влияние на общую работоспособность системы, а также на возможные масштабы недопоставки энергоресурсов потребителям [40]. Данный подход получил дальнейшее развитие в работах, посвященных формированию перечней критически важных объектов с позиции обеспечения энергетической безопасности и обоснованию мер по минимизации негативных последствий чрезвычайных ситуаций на таких объектах [41]. В более общем виде значимость критически важных объектов энергетики при взаимосвязанной работе энергетических отраслей определяется их влиянием на устойчивость топливо- и энергоснабжения потребителей [42].

Современные подходы к анализу угроз энергетической безопасности исходят из необходимости системного учёта факторов природного, техногенного, экономического и организационного характера, а также сценариев их совместного проявления. В рамках таких подходов ЧС и КС рассматриваются как ключевые режимы, определяющие переходы энергетических систем от устойчивого функционирования к состояниям дефицита и дестабилизации [22, 30]. Это обуславливает важность разработки индикативных систем мониторинга, позволяющих своевременно выявлять опасные тенденции, оценивать вероятность развития критических ситуаций и обосновывать меры по предотвращению перехода к режимам в условиях чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, разграничение понятий чрезвычайной и критической ситуаций в энергетике является не только терминологическим, но и методическим инструментом, обеспечивающим связь правовых режимов, инженерно-технических ограничений и управленческих решений в задачах обеспечения энергетической безопасности регионов и страны в целом.

Угрозы энергетической безопасности носят комплексный характер и формируются под воздействием факторов различной природы, включая социально-политические, экономические, техногенные, природные, а также внешнеполитические и внешнеэкономические условия. В зависимости от

специфики региона и состояния энергетической инфраструктуры значимость отдельных типов угроз может существенно различаться. Обобщённая характеристика основных угроз энергетической безопасности [29] по выделенным типам приведена в приложении Б.

Угрозы энергетической безопасности целесообразно рассматривать с позиций характера их отрицательного воздействия на процессы функционирования и развития систем энергетики [29]. В соответствии с данным подходом они представляют собой совокупность условий и факторов, способных вызвать нарушения топливо- и энергоснабжения потребителей, снижение устойчивости энергетической инфраструктуры, возникновение дефицитов топливно-энергетических ресурсов и ухудшение условий выполнения требований, предъявляемых к энергетической безопасности страны. Реализация указанных угроз порождает негативные факторы различной природы, проявляющиеся в сферах производства, транспорта, распределения и потребления энергетических ресурсов, что обуславливает необходимость разработки мер их предупреждения, ослабления и нейтрализации. В случае длительного действия такие угрозы могут приводить к устойчивым дисбалансам в топливно-энергетических балансах, снижению способности энергетического сектора удовлетворять потребности экономики и населения, замедлению социально-экономического развития и усилению региональной дифференциации условий энергоснабжения [23, 43].

Анализ современного состояния энергетического сектора и перспектив его развития позволяет выделить совокупность ключевых стратегических угроз энергетической безопасности. К их числу относятся экономические угрозы, связанные с дефицитом инвестиционных ресурсов и хроническим недофинансированием капитальных вложений в топливно-энергетический комплекс и энергосбережение. Это приводит к замедлению ввода новых мощностей, высокому уровню износа основных фондов, недостаточности резервов мощности и запасов топлива, а также к запаздыванию освоения новых перспективных районов добычи углеводородов. Существенную роль продолжают играть низкая энергоэффективность экономики и сохранение энергоёмкой

отраслевой структуры, формирующие экономически необоснованно высокий спрос на топливно-энергетические ресурсы и напряжённость энергетических балансов [23, 44].

К числу стратегических угроз относятся также структурные дисбалансы топливно-энергетического баланса, включая недостаточную диверсификацию энергоснабжения, высокую концентрацию производства и транспортных потоков энергоресурсов, а также ограниченную пропускную способность межрегиональных энерготранспортных связей. Указанные факторы повышают уязвимость энергоснабжения отдельных территорий и ограничивают возможности маневрирования ресурсами между регионами, что особенно критично в условиях реализации чрезвычайных и критических ситуаций [32, 44].

Существенное влияние на уровень энергетической безопасности оказывают социально-политические и институциональные угрозы, включая финансовую нестабильность и неплатежи в топливно-энергетическом комплексе, дефицит квалифицированных кадров, кризисные явления в сфере теплоснабжения и несовершенство системы управления энергетическим сектором. Дополнительные риски формируются под воздействием внешнеэкономических и внешнеполитических факторов, связанных с импортозависимостью по технологиям и оборудованию, а также с ограничениями доступа к внешним рынкам энергоресурсов [23].

Наконец, важную группу угроз энергетической безопасности образуют техногенные и природные факторы, включая аварии на объектах топливно-энергетического комплекса, экстремальные климатические условия и стихийные бедствия. В сочетании с высокой концентрацией энергетической инфраструктуры и ограниченностью резервов такие угрозы способны приводить к масштабным и длительным нарушениям энергоснабжения, формированию дефицитов топливно-энергетических ресурсов и необходимости реализации чрезвычайных мер по обеспечению устойчивости энергетических систем [32, 44].

Современное состояние энергетического сектора России в 2022–2025 гг. формируется под воздействием совокупности внешних и внутренних факторов,

ключевым из которых стало резкое изменение условий функционирования на мировых энергетических рынках в результате санкционных ограничений и трансформации экспортных направлений [45]. Существенное сокращение поставок российских энергоресурсов на традиционные рынки Европы, прежде всего природного газа и угля, обусловило необходимость ускоренной переориентации экспортных потоков и изменения логистических схем, что сопровождалось ростом транспортных издержек и повышенной волатильностью экспортных доходов [46].

Одновременно обострились проблемы импортозамещения в электроэнергетике, нефтегазовом транспорте и энергомашиностроении. Существенная часть критически важного оборудования, включая газовые турбины и их ключевые компоненты, в предшествующий период поставлялась из-за рубежа, что в условиях технологических ограничений усилило уязвимость энергетической инфраструктуры. Высокий уровень износа основных фондов электроэнергетики и топливных отраслей, по оценкам профильных ведомств и экспертных организаций, достигающий 60–70 %, в сочетании с ограниченными инвестиционными возможностями, усиливает риски техногенных нарушений и сдерживает процессы модернизации [47].

На фоне снижения нефтегазовых доходов федерального бюджета в 2023 г. и их частичного восстановления в 2024 г. сохраняется дефицит инвестиционных ресурсов в топливно-энергетическом комплексе. Это замедляет ввод новых генерирующих мощностей и освоение перспективных месторождений углеводородов, формируя предпосылки для усиления стратегических угроз энергетической безопасности в среднесрочной перспективе [48].

В то же время в структуре развития энергетики возрастает значение газификации внутренних регионов, а также опережающего развития энергетических систем Сибири и Дальнего Востока, ориентированных на внутренний спрос и новые экспортные направления. Реализация указанных приоритетов требует адаптации модельных и инструментальных средств анализа для оценки устойчивости энергоснабжения и последствий возможной реализации угроз в условиях высокой неопределённости внешней среды [49].

1.1.3. Общая схема исследований проблем энергетической безопасности

Основная цель исследований в сфере энергетической безопасности государства заключается в научно обоснованном выборе приоритетных направлений, обеспечивающих стабильное и долгосрочное снабжение потребителей всеми необходимыми видами топливно-энергетических ресурсов [29]. Предлагаемые меры должны быть универсальными и эффективными в условиях различных негативных сценариев в экономике и энергетике. Кроме того, особое внимание уделяется разработке решений, гарантирующих бесперебойное энергоснабжение в чрезвычайных ситуациях [33].

В рамках этих исследований решаются следующие задачи: выявление возможных угроз и моделирование на их основе возмущающих сценариев, анализ состояния ТЭК при их реализации, выявление узких мест в энергоснабжении, оценка эффективности мер по их устранению и отбор наиболее надёжных стратегий обеспечения энергетической безопасности [50]. На Рисунке 1.1 отражена схема, иллюстрирующая эти задачи [28]. Особую роль играет оценка устойчивости ТЭК в условиях кризисных сценариев, так как это позволяет формировать практические рекомендации для повышения надёжности энергетической системы. В дальнейшем под энергетическими исследованиями в данном контексте понимается в первую очередь работа по решению этой ключевой задачи.

Масштабность и сложность топливно-энергетического комплекса, а также непосредственная зависимость энергоснабжения потребителей от надёжности его функционирования не позволяют проводить полноценные натурные эксперименты. Поэтому для изучения устойчивости и функционирования системы при различных условиях проводится серия вычислительных экспериментов. Их результаты служат основой для выбора оптимальных решений в управлении и планировании.

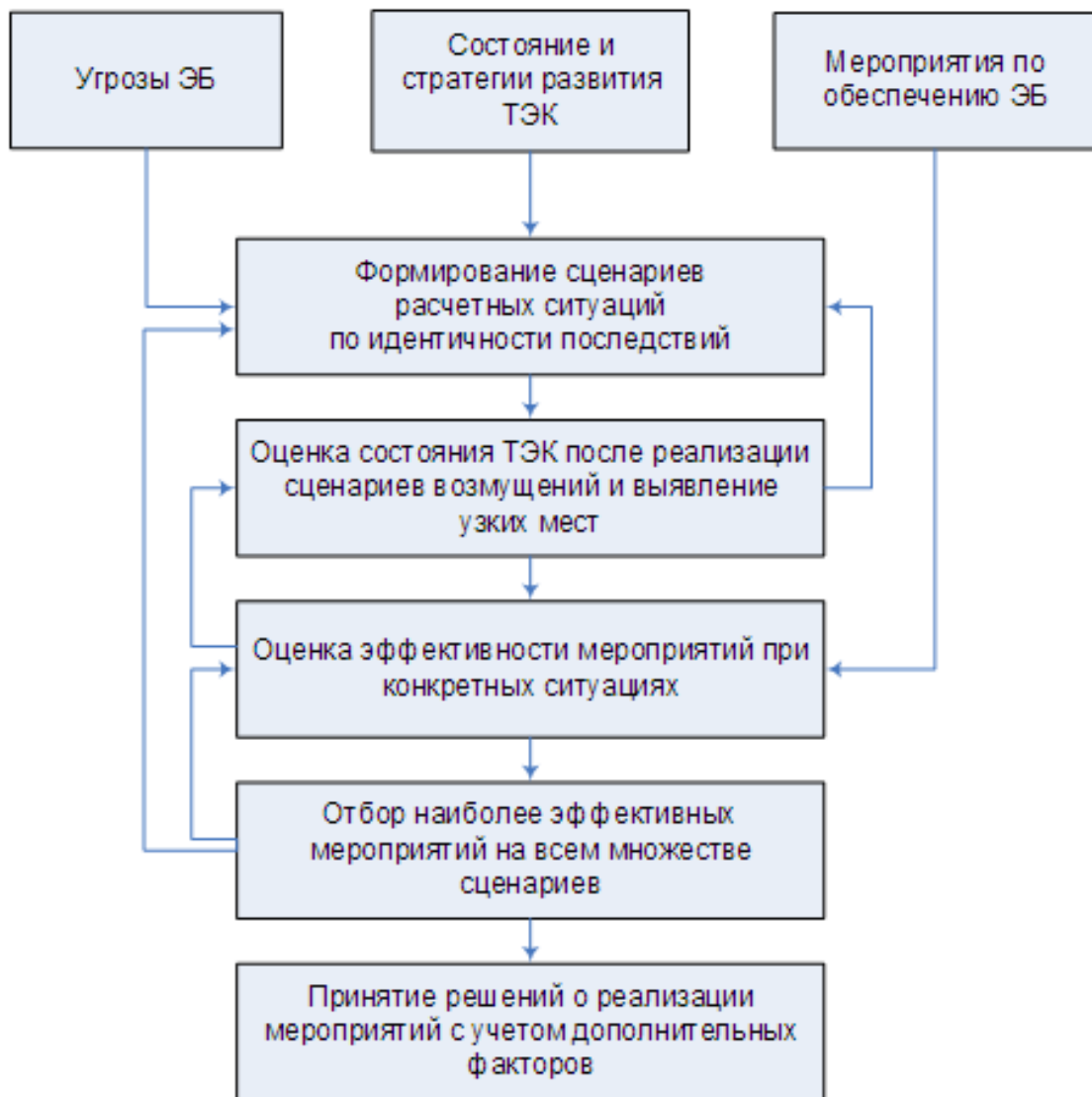


Рисунок 1.1 – Взаимосвязь задач в исследованиях проблем энергетической безопасности страны и регионов

Вычислительный эксперимент предполагает создание модели, адекватно отражающей объект, и её численное исследование, что позволяет имитировать поведение системы при разных условиях. Здесь роль экспериментальной установки выполняет программный комплекс, а не физический объект, что повышает требования к качеству программного обеспечения, применяемого в научных исследованиях.

Оценка состояния топливно-энергетического комплекса с учетом возможных возмущений проводится поэтапно. На первом этапе анализируется предполагаемое развитие ТЭК по укрупнённым показателям, которые затем детализируются по

регионам и объектам с учетом отчётных данных и прогнозируемых изменений. Далее, с помощью экспертных оценок и сценарного подхода, формируются возможные возмущающие воздействия на социально-экономическую систему и ТЭК. На следующем этапе рассчитывается топливно-энергетический баланс по регионам и по стране в целом в условиях возникновения кризисных ситуаций без подготовки. Затем подбираются меры резервирования: запасы топлива, мощности и возможности взаимозаменяемости ресурсов. Следующий этап включает расчёты при условии предварительного внедрения предложенных мер для обеспечения устойчивой работы ТЭК. В завершение формулируются практические рекомендации по обеспечению энергетической безопасности [29].

1.2. Описание существующих подходов, технологий и инструментальных средств поддержки исследований энергетической безопасности

1.2.1. Интеллектуальная поддержка анализа угроз энергетической безопасности и обоснования мероприятий по обеспечению ЭБ

В исследованиях развития ТЭК требования энергетической безопасности учитываются путём интеграции сценариев возможных угроз, кризисов и чрезвычайных ситуаций в базовые расчётные модели. Также анализируются сценарии защитных мероприятий, направленных на снижение рисков [51].

Формирование таких расчётных сценариев предполагает системное влияние на причины и условия, вызывающие угрозы энергетической безопасности, с целью нейтрализации негативных тенденций в ТЭК и смежных отраслях. В работе [15] предложен подход к обоснованию предварительного перечня мер по обеспечению энергетической безопасности страны и регионов, основанный на поэтапной проработке вариантов реагирования.

На первом этапе осуществляется анализ текущего состояния энергетической системы страны или региона с позиций энергетической безопасности. При этом выявляются уязвимые элементы топливно-энергетического комплекса, определяется состав и характер актуальных угроз, рассматриваются возможные сценарии их развития и масштабы реализации. На основе полученных результатов оценивается текущий и прогнозируемый уровень энергетической безопасности, формируется информационно-аналитическая база для выбора соответствующих мер, а также обеспечивается учет фактора энергетической безопасности в стратегическом и тактическом планировании развития энергетики.

На втором этапе формируется совокупность возможных мер по обеспечению энергетической безопасности с учетом прогнозируемых угроз и условий их реализации. Для указанных мер разрабатываются соответствующие сценарии применения. В общем случае мероприятия подразделяются на превентивные, ориентированные на снижение вероятности возникновения угроз и уменьшение уязвимости энергетических систем; оперативные, направленные на поддержание минимально необходимого уровня энергоснабжения приоритетных потребителей и объектов; а также восстановительные, предназначенные для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и восстановления устойчивого функционирования энергетики [52].

На третьем этапе проводится оценка эффективности предлагаемых мер с целью выбора наиболее результативных и экономически обоснованных решений. На данном этапе в едином контуре рассматриваются результаты анализа угроз, возможные последствия их реализации и эффективность соответствующих ответных действий.

Для комплексной оценки уровня энергетической безопасности региона может применяться метод индикативного анализа, дополненный инженерно-экономическим экспертным подходом. Его использование позволяет более детально исследовать структуру угроз, выявить уязвимые элементы энергетической системы и обосновать выбор мер, направленных на повышение уровня энергетической безопасности [22]. Формирование итогового перечня

мероприятий в значительной мере остается на усмотрение экспертов. Связанная с этим последовательность формирования расчетных ситуаций, оценки состояния ТЭК и отбора мероприятий структурно представлена на Рисунке 1.1.

В связи с этим важной задачей становится создание интеллектуальных инструментов поддержки анализа и принятия решений, основанных на семантическом представлении знаний о предметной области, угрозах энергетической безопасности и мероприятиях по их нейтрализации. В ИСЭМ СО РАН разработана интеллектуальная информационная среда, основанная на ситуационном подходе [10, 53, 54]. В её состав входят модули для онтологического (OntoMap), когнитивного (CogMap), событийного (EventMap), вероятностного (BayNet) и пространственного (3D-геовизуализация) моделирования.

Семантическая модель в обобщённом виде представляет собой информационную структуру, предназначенную для отражения основных понятий предметной области и связей между ними [55]. Методологическую основу применения интеллектуальных средств в энергетике составляют онтологии и формируемое на их основе онтологическое пространство знаний [56–58].

Под онтологией понимается формализованное описание предметной области, включающее систему понятий, их атрибутов, отношений и ограничений. Онтологии обеспечивают структурированное представление знаний и создают основу для их формальной интерпретации, обработки и последующего использования в интеллектуальных аналитических процедурах. Существенный вклад в развитие онтологического подхода применительно к энергетике внесли Т. Н. Ворожцова, А. Н. Копайгородский, Н. Н. Макагонова, С. К. Скрипкин и другие исследователи.

В исследованиях энергетической безопасности онтологии играют важную роль, поскольку обеспечивают структурирование знаний, классификацию понятий, формализацию терминологии и систематизацию информации. Это расширяет возможности применения интеллектуальных инструментов анализа и поддержки принятия решений при исследовании угроз, уязвимостей и условий обеспечения энергетической безопасности.

Одним из применяемых подходов в исследованиях энергетических систем является когнитивное моделирование, используемое для построения когнитивных карт и проведения ситуационного анализа энергетических проблем [10]. Когнитивная модель представляется ориентированным графом, в котором вершины соответствуют значимым факторам предметной области, а дуги отражают причинно-следственные связи между ними [59].

Наряду с когнитивным моделированием в исследованиях чрезвычайных ситуаций в энергетике развивается событийное моделирование. В работах В. Л. Аршинского и Л. Н. Столярова предложен подход к формальному описанию событийных процессов на основе Joiner-сетей (JN-моделей) [60–62]. Данный формализм относится к классу алгебраических сетей и рассматривается как расширение сетей Петри, ориентированное на моделирование поведения асинхронных систем. Его особенностью является описание взаимодействия процессов с использованием пусковых и флаговых функций, задаваемых булевыми выражениями.

Для анализа вероятностных и причинно-следственных зависимостей применяется также байесовское моделирование, реализуемое в форме байесовских сетей доверия [63, 64]. Байесовская сеть представляет собой ориентированный ациклический граф, вершины которого соответствуют переменным, а дуги отражают условные зависимости между ними. Вывод в такой сети основан на апостериорном пересчёте вероятностей при поступлении новой информации о состоянии отдельных переменных [65]. Использование байесовских сетей позволяет учитывать как статистические данные, так и экспертные оценки при анализе рисков и неопределённости.

В настоящей диссертационной работе семантическое моделирование рассматривается в части онтологического моделирования предметной области и когнитивного моделирования причинно-следственных связей, необходимых для параметризации экономико-математической модели ТЭК и формирования вычислительных сценариев. Событийное моделирование на основе Joiner-сетей и вероятностное моделирование на основе байесовских сетей доверия в работе не

используются, поскольку задачи описания событийной динамики и вероятностной оценки состояний выходят за рамки принятой постановки исследования.

На Рисунке 1.2 представлены взаимосвязи перечисленных инструментов, интегрированных в рамках интеллектуальной ИТ-среды [10, 60, 65–68].

Представленные программные средства обеспечивают интеллектуальную поддержку исследований, направленных на повышение энергетической безопасности, и позволяют проводить всесторонний качественный анализ соответствующих угроз.

Ранее в лаборатории информационных технологий в энергетике № 34 отдела энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН под руководством Л.В. Массель была предложена двухуровневая информационная технология для интеллектуальной поддержки принятия решений в сфере энергетической безопасности, включающая этапы, распределённые по качественному и количественному уровням анализа [69].

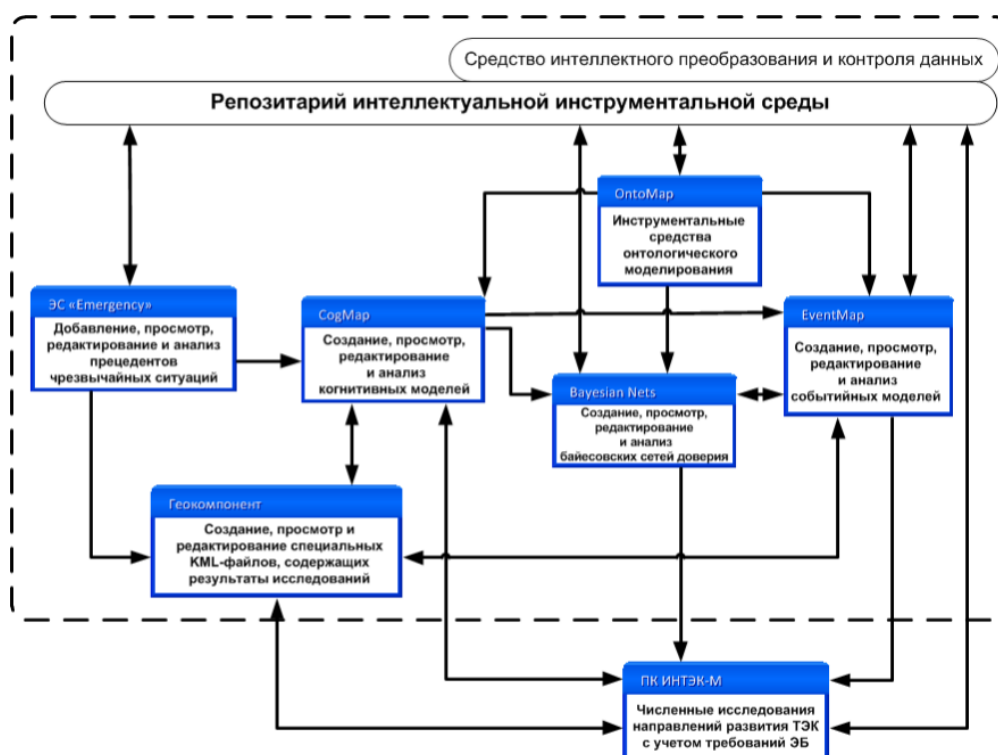


Рисунок 1.2 – Схема взаимосвязей инструментальных средств интеллектуальной ИТ-среды

На первом уровне осуществляется формирование онтологической модели предметной области, предназначенной для систематизации и формализации знаний, используемых при исследовании проблем энергетической безопасности. На этой основе проводится анализ чрезвычайных ситуаций в энергетике, направленный на выявление источников угроз и определение их основных характеристик. Далее строятся когнитивные модели, отражающие причинно-следственные связи между факторами угроз и возможными сценариями развития кризисных ситуаций. В общем случае для оценки рисков могут использоваться вероятностные модели, формируемые на основе экспертных оценок и статистических данных. Исследование динамики развития ситуаций и их последствий может быть дополнено средствами событийного моделирования.

На втором уровне результаты качественного анализа используются при формировании решений по обеспечению энергетической безопасности. На их основе в программном комплексе либо непосредственно специалистом формируются варианты возмущающих и управляющих воздействий и соответствующие сценарии их реализации. Далее выполняются вычислительные эксперименты, обеспечивающие количественную оценку рассматриваемых сценариев с учетом рисков и ограничений развития энергетических систем. Завершающий этап включает интерпретацию полученных результатов и их использование для обоснования решений, направленных на повышение уровня энергетической безопасности.

Такое представление соответствует общей схеме исследований ЭБ, в которой формирование расчетных ситуаций связывает качественную оценку угроз с последующим вычислительным экспериментом. Для настоящего исследования данный переход имеет принципиальное значение, поскольку именно он определяет связь семантических моделей с количественной оценкой состояний ТЭК.

В данной технологии переход от качественного уровня анализа к количественной оценке состояний ТЭК формализован недостаточно. Результаты онтологического и когнитивного моделирования используются при формировании сценариев, однако их отображение на параметры экономико-математической

модели и структуру вычислительного эксперимента задается преимущественно экспертно. Это определяет необходимость разработки методики интеграции математического, онтологического и когнитивного моделирования, обеспечивающей формализованный переход от онтологического описания предметной области и когнитивной карты к параметрам расчетной модели и вычислительным сценариям. Для представления вычислительного эксперимента как единой структуры требуется формализованная модель, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.

Кроме того, при использовании когнитивных моделей сохраняется неопределенность экспертных оценок, характеризующих влияние угроз, факторов и мероприятий на параметры расчетной модели. В рамках указанной технологии эта неопределенность не получает специального численного представления при формировании множества расчетных состояний ТЭК. Поэтому требуется переход от детерминированного задания сценарных параметров к их стохастической корректировке, которая может выполняться на основе взвешенных когнитивных карт.

1.2.2. Программные средства для исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса

Программные средства, применяемые в исследованиях направлений развития энергетики и ТЭК, используются для формирования расчетных сценариев, анализа балансов, оценки технологических, ресурсных, инвестиционных и экологических ограничений, а также для сопоставления вариантов развития энергетики. Широкий обзор современных инструментов энергетического моделирования представлен, в частности, в работе [70], где рассмотрено 75 моделей энергетических и электроэнергетических систем, а также в обзоре [71], посвященном сопоставлению национальных интегрированных моделей энергетических систем.

Современные программные средства данного класса можно разделить на несколько групп. К первой группе относятся системные модели долгосрочного развития энергетики, ориентированные на оптимизацию технологической структуры энергетических систем и выбор рациональных вариантов их развития. К ним относятся TIMES, MESSAGEix, OSeMOSYS, LEAP/NEMO, Temoa [72–74]. Ко второй группе относятся модели электроэнергетики, рынков и межсекторной интеграции, включая PyPSA, Calliope, Balmorel, EnergyPLAN, PLEXOS, ReEDS, Sienna. Они применяются для анализа структуры генерации, режимов работы энергосистем, сетевых ограничений, накопителей энергии и межсекторных связей [75, 76]. Третью группу образуют энерго-экономические и интегрированные оценочные модели, связывающие развитие энергетики с макроэкономическими, климатическими и экологическими факторами. К ним относятся NEMS, PRIMES, GCAM, REMIND. Отдельно следует выделить российские модельно-информационные комплексы, ориентированные на исследование ТЭК с учетом территориальной, ресурсной и балансовой специфики. К этой группе относятся SCANNER ИНЭИ РАН [77], а также комплексы ИНТЭК-М, развиваемые в ИСЭМ СО РАН.

Такое деление отражает различия в назначении рассматриваемых программных средств. Одни комплексы ориентированы преимущественно на долгосрочную оптимизацию структуры энергетики, другие на анализ электроэнергетических рынков и режимов, третьи на исследование взаимосвязей энергетики, экономики, климата и экологических ограничений. Российские разработки в большей степени ориентированы на задачи стратегического анализа ТЭК, учет территориально-производственной структуры, ресурсных балансов и требований энергетической безопасности.

К числу распространенных системных моделей долгосрочного развития энергетики относятся MARKAL, TIMES, MESSAGE и их современные модификации. Данные модели предназначены для описания технологической структуры энергетики, цепочек преобразования энергоресурсов, технологических альтернатив и ограничений, определяющих выбор структуры энергетической

системы. В математическом отношении они преимущественно основаны на линейном программировании и используются для анализа долгосрочных сценариев с учетом ресурсных, технологических, инвестиционных и экологических условий.

TIMES, MESSAGEix, OSeMOSYS, LEAP/NEMO и Temoa обеспечивают проведение сценарных расчетов, долгосрочное планирование и оценку технологических альтернатив. Их применение требует значительного объема исходных данных, настройки структуры модели, калибровки и интерпретации результатов. При этом экспертные причинно-следственные знания, как правило, не входят в расчетную постановку как самостоятельный элемент.

К этой группе также может быть отнесен программный пакет ETHOS.FINE, представляющий собой Python-ориентированную среду формирования оптимизационных моделей энергетических систем. Он предназначен для анализа вариантов построения энергетических систем с учетом нескольких регионов, видов энергоресурсов, временных шагов и инвестиционных периодов. В расчетной постановке минимизируется приведенная стоимость системы при заданных технических и экологических ограничениях. ETHOS.FINE используется преимущественно для технико-экономической оценки сценариев энергетического перехода и декарбонизации, однако его применение к задачам энергетической безопасности требует дополнительной адаптации к территориально-производственной структуре ТЭК и сценариям реализации угроз.

Модели PyPSA, Calliope, Balmorel, EnergyPLAN, PLEXOS, ReEDS и Sienna ориентированы преимущественно на моделирование электроэнергетики, рынков и межсекторных связей. Они применяются для анализа структуры генерации, режимов работы энергосистем, сетевых ограничений, диспетчеризации, накопителей энергии, теплоснабжения, транспорта и водородной энергетики. Указанные средства обладают развитым аппаратом представления электроэнергетических систем, однако для задач исследования направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности требуют дополнительной адаптации, поскольку такие задачи связаны с территориально-производственной структурой ТЭК, межотраслевыми балансами ТЭР, угрозами

топливо- и энергоснабжению и оценкой состояний ТЭК в критических и чрезвычайных условиях.

Модели NEMS, PRIMES, GCAM и REMIND относятся к энерго-экономическим и интегрированным оценочным моделям. Они используются для исследования взаимосвязей энергетики, экономики, климата, землепользования, водных ресурсов, технологического развития и энергетической политики. Их достоинством является возможность анализа долгосрочных глобальных, национальных и макрорегиональных сценариев. Вместе с тем высокий уровень агрегирования и ориентация на макроэкономические и климатические взаимосвязи ограничивают их применение для детального исследования территориально-производственной структуры ТЭК и оценки состояний его развития с позиции обеспечения энергетической безопасности.

В ИНЭИ РАН разработан модельно-информационный комплекс SCANNER [77], предназначенный для системных исследований развития ТЭК России, национальной экономики и мировых энергетических рынков на средне- и долгосрочную перспективу. Комплекс объединяет информационную базу, аналитические средства и систему моделей, обеспечивающих согласованное рассмотрение производства, преобразования, транспорта и конечного потребления энергоресурсов, а также формирование топливно-энергетических балансов.

В ИСЭМ СО РАН сформирована линия программно-модельных и программно-вычислительных средств, ориентированных на исследование направлений развития ТЭК, систем энергетики и задач энергетической безопасности. К числу таких разработок относятся модельно-компьютерный комплекс для исследования долгосрочных стратегий развития ТЭК во взаимосвязи с экономикой, система моделей МЭСТЭК, динамическая территориально-производственная модель ТЭК России, двухуровневая система моделей для исследования энергетической безопасности России и ее регионов, а также программно-вычислительные комплексы «Нефть и газ России», «Корректива», «СЮОЗ», «ОРИРЭС» и программные комплексы семейства ИНТЭК [78–82]. Динамическая составляющая указанных моделей связана с поэтапным

представлением развития ТЭК на прогнозном горизонте. В работах Б.Г. Санеева и соавторов по разработке региональных энергетических программ рассматриваются методы согласования прогнозов энергопотребления, развития энергетических отраслей, топливно-энергетических балансов и ресурсных ограничений. Эти положения используются как методическая основа моделирования развития ТЭК в территориальном разрезе [83]. Указанные средства применяются для стратегического прогнозирования, оценки потребности в энергоресурсах, оптимизации структуры ТЭК и электроэнергетики, анализа критических ситуаций и оценки соответствия вариантов развития требованиям энергетической безопасности. Обобщенная характеристика инструментальных средств ИСЭМ СО РАН для стратегического планирования развития энергетики представлена в работе [78].

Программно-вычислительный комплекс «Нефть и газ России» используется для моделирования газотранспортной системы и связанных с ней режимов поставок энергоресурсов, в том числе в нештатных и аварийных режимах [42]. В исследованиях энергетической безопасности данный комплекс применяется для выявления уязвимых элементов инфраструктуры, анализа структуры сетей и оценки последствий ограничений поставок для потребителей во взаимосвязи с функционированием других отраслевых энергетических систем.

ПВК «Корректива» применяется для проведения вычислительных экспериментов на основе балансовых экономико-математических моделей и методов комбинаторного моделирования [84, 85]. В комплексе обеспечиваются подготовка расчетных данных для динамической модели ТЭК, учет связей между временными состояниями, анализ вариантов развития и выявление потенциально критически важных объектов. В задачах энергетической безопасности ПВК позволяет учитывать различные сочетания условий развития ТЭК, факторов и угроз. Вместе с тем такая постановка сопровождается ростом размерности вычислительного эксперимента и усложнением содержательной интерпретации результатов.

Рассмотренные программные средства имеют ограничения применительно к исследованию направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Универсальные энергетические модели ориентированы преимущественно на штатные сценарии долгосрочного развития, а также возмущающие воздействия в них, как правило, учитываются через специальные расчетные условия и корректировку исходных данных модели. Комплексы ИСЭМ СО РАН учитывают специфику задач энергетической безопасности, включая анализ критических и чрезвычайных условий. Вместе с тем при комбинаторном формировании вариантов сохраняется трудность интерпретации большого числа расчетных состояний.

С учетом принятой постановки исследования наиболее близкими инструментальными средствами являются программные комплексы ИНТЭК и ИНТЭК-М, относящиеся к прикладной линии ИСЭМ СО РАН и ориентированные на исследование направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности [86–91]. В комплексе используется экономико-математическая модель ТЭК, относящаяся к классу линейных оптимизационных моделей территориально-производственного баланса топливно-энергетических ресурсов [27, 30]. В данной модели согласуются процессы добычи, переработки, преобразования, транспорта и потребления топливно-энергетических ресурсов с учетом заданного спроса, технологических возможностей, ресурсных и инфраструктурных ограничений. Такая постановка применяется для количественной оценки состояний ТЭК в исследованиях надежности топливо- и энергоснабжения, и энергетической безопасности.

При исследовании направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности требуется учет условий, влияющих на допустимую область расчетной модели и реализуемость вариантов развития. К таким условиям относятся инвестиционные и бюджетные ограничения, укрупненные экологические ограничения и межпериодные связи. Инвестиционные ограничения задают предельный объем капитальных вложений в развитие добычных, производственных и транспортных мощностей и позволяют оценивать последствия

недостаточного инвестиционного обеспечения для ввода и модернизации энергетических объектов, располагаемых мощностей и уровня дефицитов топливно-энергетических ресурсов. Экологические ограничения при укрупненном территориальном представлении ТЭК предназначены для учета допустимых изменений структуры топливно-энергетического баланса и задания ограничений на изменение выбросов относительно базового варианта. Они не подменяют специализированные экологические модели. Межпериодные связи отражают влияние решений и возмущений одного расчетного периода на условия функционирования ТЭК в последующих периодах. В настоящей работе такой учет реализуется без перехода к полной динамической модели, путем корректировки параметров модели следующего периода на основе сопоставления базового и сценарного расчетов предыдущего периода.

Указанные обстоятельства определяют необходимость развития экономико-математической модели ТЭК за счет введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи.

Рассмотренные программные средства, включая комплексы семейства ИНТЭК, не ориентированы на web-доступ как основной способ организации работы исследователя. Их локальное использование требует установки и обновления программного обеспечения на рабочих местах пользователей, что усложняет сопровождение комплекса и затрудняет коллективную работу с общими моделями, сценариями и результатами расчетов. Требуется единая инструментальная среда с централизованным хранением моделей, онтологий, когнитивных карт, вычислительных сценариев и результатов экспериментов. Это определяет целесообразность web-ориентированной реализации нового программного комплекса, обеспечивающей доступ через браузер и расширенные возможности интерактивного представления балансовых таблиц, графических схем, онтологических и когнитивных моделей.

1.2.3. Развитие инструментальных средств семантического моделирования в ИСЭМ СО РАН

Формирование инструментальной базы семантического моделирования в ИСЭМ СО РАН связано с развитием исследований энергетической безопасности, в рамках которых ключевое значение приобретают задачи качественного анализа: структурирование знаний о предметной области, выявление причинно-следственных связей между факторами угроз и формирование сценариев их реализации. Уже в конце 2000-х годов в публикациях ИСЭМ СО РАН подчёркивалась необходимость применения когнитивного моделирования для анализа угроз энергетической безопасности как метода, позволяющего формализовать экспертные представления о системе факторов, их взаимовлиянии и возможных последствиях [10, 54].

В работах А.Г. Масселя когнитивные карты рассматривались как инструмент качественной оценки угроз энергетической безопасности и анализа взаимосвязей между факторами риска, что заложило методологическую основу для дальнейшего развития семантических и когнитивных методов в исследованиях энергетики [10, 66].

Следующим этапом стало развитие не только методологии, но и инструментальной поддержки когнитивного анализа. В публикациях начала 2010-х годов описывается технология применения когнитивного моделирования в исследованиях проблем энергетической безопасности, реализованная в рамках специализированных программных средств. При этом подчёркивалась необходимость предварительного структурирования знаний и согласования терминологии, что обусловило использование онтологического моделирования в качестве основы для построения когнитивных карт [53, 56].

В рамках данного направления в ИСЭМ СО РАН было разработано инструментальное средство OntoMap, предназначенное для построения и анализа онтологий энергетики и энергетической безопасности. OntoMap обеспечивает

формализацию понятийного аппарата, классификацию факторов и формирование семантических связей между ними, что позволяет создать единую понятийную базу для последующего когнитивного и сценарного анализа и снизить неоднозначность интерпретации факторов угроз [56, 57].

Для анализа причинно-следственных связей между факторами угроз энергетической безопасности было разработано инструментальное средство CogMap, реализующее методы когнитивного моделирования. Когнитивные карты позволяют выявлять ключевые факторы, направления и характер их влияния, а также качественно оценивать последствия реализации различных угроз. Ограничения статических когнитивных карт при анализе динамики процессов обусловили переход к динамическому когнитивному моделированию, в рамках которого было разработано инструментальное средство DCogMap, обеспечивающее задание числовых состояний концептов, весовых коэффициентов связей и анализ изменения состояний во времени [62].

Для формализованного описания сценариев реализации угроз энергетической безопасности в ИСЭМ СО РАН было разработано инструментальное средство EventMap, ориентированное на событийно-ориентированное моделирование. EventMap позволяет описывать последовательности событий, формировать цепочки развития критических и чрезвычайных ситуаций и анализировать варианты их эскалации, обеспечивая переход от анализа отдельных факторов к целостным сценариям развития ситуации во времени [62]. В работе [34] были рассмотрены вопросы совместного применения онтологического, когнитивного и событийного моделирования.

Параллельно развивалось направление, ориентированное на вероятностную интерпретацию неопределённости, характерной для задач энергетической безопасности. В условиях ограниченности статистической информации и редкой реализации многих угроз эффективным инструментом стали байесовские сети доверия. В работах Е.В. Пятковой и соавторов была предложена методика моделирования угроз энергетической безопасности с использованием байесовских

сетей, позволяющая учитывать вероятности факторов и состояний системы, а также обновлять оценки при поступлении новых данных [63–65].

Инструмент BayNet, основанный на байесовских сетях доверия, дополняет когнитивные и событийные модели возможностью количественной вероятностной оценки сценариев. BayNet используется для анализа вероятностей реализации различных сценариев угроз энергетической безопасности и сопоставления альтернативных вариантов развития по уровню риска [63, 64].

К 2020-м годам инструменты OntoMap, CogMap, DCogMap, EventMap и BayNet рассматриваются как элементы единой интеллектуальной ИТ-среды ИСЭМ СО РАН и используются совместно в задачах поддержки принятия решений. В публикациях, посвящённых интеграции интеллектуальных информационных технологий и агентно-сервисному подходу, подчёркивается, что онтологическая, когнитивная, событийная и вероятностная компоненты образуют взаимодополняющий комплекс средств качественного анализа, обеспечивающий полный цикл формирования сценариев энергетической безопасности [60, 92].

Для систематизации и сопоставления разработанных в ИСЭМ СО РАН инструментов семантического моделирования, применяемых при исследованиях энергетической безопасности, в Таблице 1.1 приведена их сравнительная характеристика, отражающая назначение, ключевые функциональные возможности и методологические основы.

Таким образом, эволюция инструментов семантического моделирования ИСЭМ СО РАН отражает переход от отдельных качественных методов анализа к интегрированной интеллектуальной среде, обеспечивающей формализацию знаний, выявление причинно-следственных связей, сценарное описание развития ситуаций и вероятностную оценку неопределённости. Получаемые результаты используются при формировании вычислительных сценариев количественного моделирования развития топливно-энергетического комплекса и анализе угроз энергетической безопасности.

Таблица 1.1 – Инструментальные средства семантического моделирования

Инструмент	Назначение	Функции
OntoMap, ИСЭМ СО РАН, А.Н. Копайгородский	Формализация знаний о предметной области энергетики и ЭБ	Онтологическое моделирование. Построение и редактирование онтологий, формирование иерархий понятий и семантических связей
CogMap, ИСЭМ СО РАН, А.Г. Массель	Анализ угроз ЭБ на основе когнитивных карт	Когнитивное моделирование. Представление факторов и причинно-следственных связей в виде ориентированного графа
DCogMap, ИСЭМ СО РАН, Р.Ю. Марков, рук. Л.В. Массель	Динамическое когнитивное моделирование угроз ЭБ	Задание числовых значений концептов и весов связей, анализ изменения состояний во времени
EventMap, ИСЭМ СО РАН, В.Л. Аршинский и др.	Описание сценариев реализации угроз ЭБ	Событийное моделирование. Формализация последовательностей событий и цепочек развития критических и чрезвычайных ситуаций
BayNet, ИСЭМ СО РАН, Л.В. Массель, Е.В. Пяткова и др.	Вероятностная оценка угроз и последствий	Байесовские сети доверия. Учет неопределенности и оценка вероятностей состояний и сценариев

В настоящей диссертационной работе непосредственно используются онтологическое и когнитивное моделирование. Онтологические модели применяются для структурирования знаний о предметной области, угрозах, показателях и элементах экономико-математической модели. Когнитивные модели используются для представления причинно-следственных связей между факторами угроз и параметрами модели. Событийное и вероятностное моделирование рассматриваются как смежные средства для интеллектуальной поддержки исследований энергетической безопасности и в работе непосредственно не применяются.

1.3. Выводы по главе и постановка задачи

В первой главе рассмотрены основные направления исследований энергетической безопасности, методы индикативной оценки, подходы к анализу угроз, критических и чрезвычайных ситуаций, а также программные средства, применяемые для исследования направлений развития ТЭК.

Показано, что прогнозные исследования ТЭК составляют одно из направлений исследований энергетической безопасности. Их содержание связано с формированием расчетных сценариев, оценкой состояний ТЭК при исследовании направлений его развития, выявлением ограничений топливо- и энергоснабжения и обоснованием мероприятий по снижению последствий реализации угроз. При этом, индикаторы энергетической безопасности являются важным средством оценки рассматриваемых состояний, однако не все они могут быть непосредственно рассчитаны средствами экономико-математической модели ТЭК. Часть индикаторов требует привлечения статистической, ведомственной, социально-экономической и экспертной информации. В связи с этим при проведении вычислительных экспериментов наряду с индикаторами ЭБ необходимо использовать показатели ТЭК, задаваемые исследователем в соответствии с целью анализа.

Анализ существующих подходов и программных средств позволил выделить следующие ограничения:

1. Недостаточная формализация перехода от качественного анализа угроз, факторов и экспертных знаний к параметрам экономико-математической модели ТЭК.
2. Избыточность комбинаторного формирования расчетных вариантов, приводящая к росту числа расчетных состояний и усложнению их содержательной интерпретации.

3. Ограниченность базовой постановки экономико-математической модели ТЭК в части учета межпериодных, инвестиционных, бюджетных и экологических ограничений.

4. Недостаточная поддержка пользовательского интерфейса: задания показателей, ограничений, ресурсов, технологий и дополнительных ограничений для модели при проведении вычислительных экспериментов.

5. Ограниченность средств представления результатов расчета в терминах онтологических и когнитивных моделей, что затрудняет связь количественных результатов с исходным экспертным описанием предметной области.

Таким образом, актуальной является разработка таких методики и программного комплекса для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, которые бы обеспечивали интеграцию семантического и математического моделирования, осуществляя формализованный переход от экспертных знаний к параметрам расчетной модели, и позволили сократить множество содержательно избыточных расчетных состояний, а также обеспечили возможность задания пользовательских показателей и ограничений в более удобной и наглядной форме.

Целью настоящей работы является разработка методов, моделей и программного комплекса для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Проведенный в первой главе анализ предметной области, существующих подходов, моделей и программных средств прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности позволил сформулировать следующие задачи исследования:

1. Разработать методику интеграции математического, онтологического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК.

2. Модифицировать экономико-математическую модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК, и разработать формализованную модель вычислительного эксперимента, отличающуюся совместным представлением математических и семантических моделей.

3. Разработать численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов причинно-следственных связей.

4. Реализовать программный комплекс ИНТЭК-SAW, поддерживающий предложенную методику, модифицированную модель и проведение вычислительных экспериментов при исследовании направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

ГЛАВА 2. Интеграция методов и средств семантического и математического моделирования в исследованиях энергетической безопасности

Во второй главе предложена методика интеграции семантического и математического моделирования в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности. Методика обеспечивает связь онтологических и когнитивных моделей с экономико-математической моделью ТЭК, вычислительными сценариями и количественной оценкой состояний энергетической системы. Также представлены проектные решения, положенные в основу программного комплекса «ИНТЭК-SAW».

В основу предлагаемого в диссертации фрактального стратифицированного подхода положен ранее разработанный фрактальный подход к структурированию знаний (Массель Л.В.) и его развитие применительно к стратифицированным моделям оценки эффективности сложных систем. В настоящей работе данный подход адаптирован к задачам прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Предлагаемый подход основывается на представлении предметной области прогнозных исследований ТЭК в виде фрактального стратифицированного информационного пространства, в котором данные, знания, модели и результаты исследования организуются как совокупность взаимосвязанных слоев. Такое представление используется для согласования качественного анализа угроз, мероприятий по их нейтрализации, сценарных состояний ТЭК и индикаторов энергетической безопасности.

В главе приведена экономико-математическая модель территориально-отраслевого баланса ТЭК, используемая как математическая основа вычислительных экспериментов. Предложено ее расширение экономическими, экологическими и квазидинамическими уравнениями, обеспечивающими учет инвестиционных, бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК.

Методика интеграции включает формирование реляционной основы интеграции, построение онтологической модели экономико-математической модели ТЭК, разработку когнитивной модели исследуемой ситуации и формирование вычислительного сценария. Указанная последовательность задает переход от экспертных знаний о факторах, угрозах и мероприятиях к параметризации экономико-математической модели [93–95].

Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов причинно-следственных связей. Метод предназначен для учета неопределенности экспертных оценок воздействий угроз и мероприятий при формировании множества сценарных состояний ТЭК [17].

В главе также обоснована необходимость реинжиниринга программных комплексов семейства «ИНТЭК» и представлены проектные решения по созданию программного комплекса «ИНТЭК-SAW». Комплекс предназначен для поддержки семантического моделирования, формирования вычислительных сценариев, проведения вычислительных экспериментов и анализа результатов в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2.1. Формализованная модель вычислительного эксперимента на основе фрактального стратифицированного подхода к структурированию знаний

В основу предлагаемой формализованной модели вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса с позиции энергетической безопасности положен ранее разработанный фрактальный подход к структурированию знаний и его развитие применительно к стратифицированным моделям оценки эффективности сложных систем [96, 97]. Его использование в настоящей работе обусловлено многофакторностью прогнозных исследований ТЭК, различным уровнем детализации рассматриваемых объектов и необходимостью согласования разнородных представлений:

энергетической инфраструктуры, угроз энергетической безопасности, мероприятий, математических и семантических моделей, моделируемых состояний ТЭК и индикаторов энергетической безопасности. Фрактальная стратифицированная модель позволяет представить эти компоненты в виде взаимосвязанных слоев информационного пространства и задать отображения между ними, что необходимо для формализации перехода от качественного анализа к количественной оценке состояний ТЭК.

Предлагаемый подход основывается на представлении предметной области прогнозных исследований ТЭК в виде фрактального стратифицированного информационного пространства (графически оно иллюстрируется совокупностью вложенных сферических оболочек), в котором данные, знания, модели и результаты исследования организуются как совокупность взаимосвязанных слоев [79, 80], каждый из которых может быть расслоен. В соответствии с этим подходом фрактальная стратифицированная модель вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции энергетической безопасности задается через множество взаимосвязанных слоев информационного пространства:

$$Z = \{S, M, P, T, E, V, I\}, \quad (2.1)$$

где S – слой методов семантического моделирования; M – слой методов математического моделирования; P – слой энергетической инфраструктуры; T – слой угроз энергетической безопасности; E – слой мероприятий по обеспечению энергетической безопасности; V – слой моделируемых состояний ТЭК; I – слой индикаторов энергетической безопасности.

Такое представление позволяет рассматривать процесс исследования, как последовательность отображений между слоями, обеспечивающих переход от семантического описания объектов и процессов предметной области средствами семантического моделирования к формированию сценарных условий, количественной оценке и последующему уточнению знаний.

Графически предложенную формализованную ФС-модель вычислительного эксперимента можно представить в виде конуса, представленного на Рисунке 2.1, являющегося вырезкой из общего информационного пространства предметной

области. Такое графическое представление отражает совокупность данных и знаний об энергетической инфраструктуре, угрозах, мероприятиях, методах их анализа и результатах исследования, а также позволяет наглядно показать отношения между слоями и их вложенность. При этом каждый слой может быть детализирован на следующем уровне рассмотрения, что соответствует фрактальному принципу организации знаний.

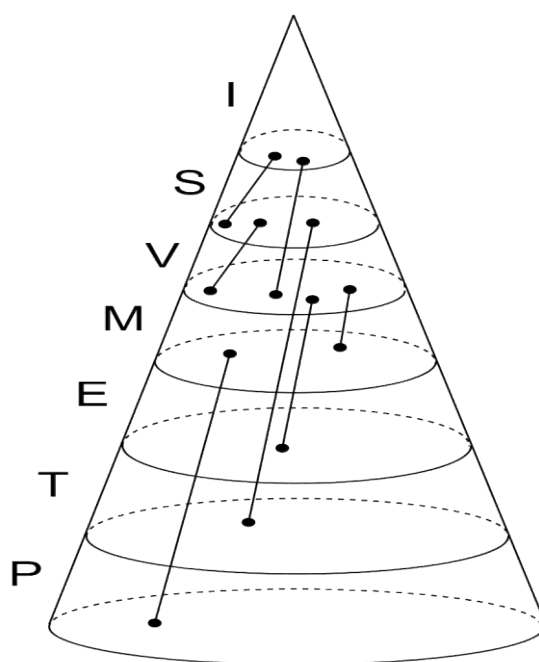


Рисунок 2.1 – ФС-модель вычислительного эксперимента, отличающаяся интеграцией математических и семантических моделей

Отображение из слоя энергетической инфраструктуры в слой методов математического моделирования задается формулой:

$$F_M^P: P \rightarrow M, \quad (2.2)$$

отображение из слоя угроз энергетической безопасности в слой методов семантического моделирования задается формулой:

$$F_S^T: T \rightarrow S, \quad (2.3)$$

отображение из слоя мероприятий по обеспечению энергетической безопасности в слой методов семантического моделирования задается формулой:

$$F_S^E: E \rightarrow S, \quad (2.4)$$

отображение из слоя методов семантического моделирования в слой моделируемых состояний ТЭК задается формулой:

$$F_V^S: S \rightarrow V, \quad (2.5)$$

отображение из слоя методов математического моделирования в слой моделируемых состояний ТЭК задается формулой:

$$F_V^M: M \rightarrow V, \quad (2.6)$$

отображение из слоя моделируемых состояний ТЭК в слой индикаторов энергетической безопасности задается формулой:

$$F_I^V: V \rightarrow I, \quad (2.7)$$

отображение из слоя индикаторов энергетической безопасности в слой методов семантического моделирования задается формулой:

$$F_S^I: I \rightarrow S. \quad (2.8)$$

Более детальное представление взаимосвязей между слоями, а также их внутренней структуры приведено на Рисунке 2.2, где отражён следующий уровень детализации фрактальной стратифицированной модели вычислительного эксперимента в прогнозных исследований ТЭК с позиции энергетической безопасности.

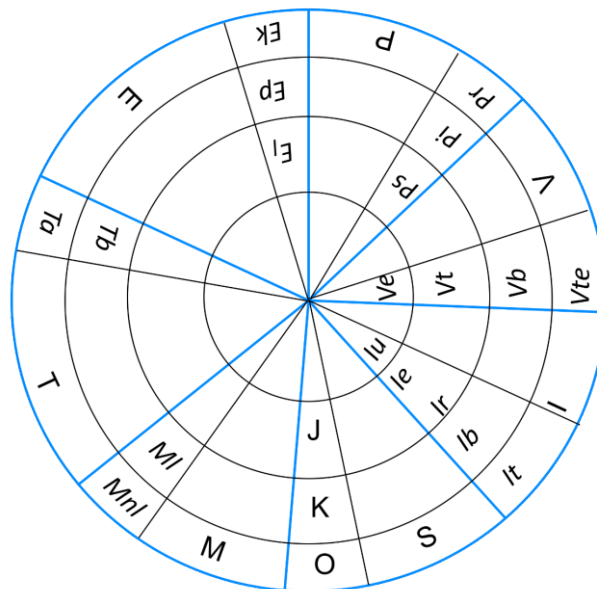


Рисунок 2.2 – Расширенная фрактальная стратифицированная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся интеграцией математических и семантических моделей

Содержательная интерпретация слоёв ФС-модели задаётся следующим образом. Слой методов семантического моделирования имеет вид, представленный формулой:

$$S = \{OM, KM, JM\}, \quad (2.9)$$

где OM – слой онтологического моделирования, KM – слой когнитивного моделирования, JM – слой событийного моделирования. Онтологическое моделирование используется для формализации понятийного аппарата предметной области, структурирования знаний об объектах ТЭК, угрозах, мероприятиях и индикаторах ЭБ. Когнитивное моделирование обеспечивает представление причинно-следственных связей и взаимного влияния факторов, характеризующих состояние ТЭК и развитие угроз. Событийное моделирование позволяет описывать процессы реализации угроз и мероприятий во времени и тем самым формировать сценарную основу исследования.

Слой методов математического моделирования представляется в виде, заданном формулой:

$$M = \{M_l, M_{nl}\}, \quad (2.10)$$

где M_l – слой линейных моделей, M_{nl} – слой нелинейных моделей. Такое разделение обусловлено необходимостью использования различных математических представлений в зависимости от структуры задачи, характера ограничений и особенностей моделируемых сценариев.

Слой угроз энергетической безопасности задается с учетом характера их реализации во времени, что представлено формулой:

$$T = \{T_a, T_b\}, \quad (2.11)$$

где T_a – слой угроз, реализация которых рассматривается как происходящая в момент времени, T_b – слой угроз, реализация которых происходит на некотором интервале времени. Подобная дифференциация имеет методическое значение, поскольку позволяет учитывать различную динамику проявления угроз и, соответственно, особенности их моделирования.

Слой мероприятий по обеспечению энергетической безопасности представляется в виде, заданном формулой:

$$E = \{E_k, E_p, E_l\}, \quad (2.12)$$

где E_k – слой компенсационных мероприятий, E_p – слой превентивных мероприятий, E_l – слой ликвидационных мероприятий. Такое разбиение отражает различную функциональную направленность мероприятий: предупреждение возникновения неблагоприятных ситуаций, снижение ущерба от реализованных угроз и ликвидацию их последствий.

Слой энергетической инфраструктуры имеет вид, представленный формулой:

$$P = \{P_r, P_s, P_i\}, \quad (2.13)$$

где P_r – слой ТЭК в целом, P_s – слой энергетических систем, P_i – слой энергетических объектов. Данная декомпозиция соответствует иерархическому характеру организации энергетики и позволяет проводить исследования как на макроуровне, так и на уровне конкретных объектов.

Слой моделируемых состояний ТЭК задается множеством, представленным формулой:

$$V = \{V_b, V_t, V_e, V_{te}\}, \quad (2.14)$$

где V_b – базовое состояние ТЭК без возмущающих и управляющих воздействий, V_t – состояние ТЭК при реализации угроз, V_e – состояние ТЭК при реализации мероприятий, V_{te} – состояние ТЭК при одновременной реализации угроз и мероприятий. Тем самым обеспечивается возможность сценарного исследования различных вариантов функционирования и развития ТЭК.

Слой индикаторов энергетической безопасности [98] представляется в виде, заданном формулой:

$$I = \{I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6, I_7, I_8, I_9\}, \quad (2.15)$$

где I_1 характеризует обеспеченность потребности в энергоресурсах объемами их производства; I_2 – соотношение годового прироста балансовых запасов первичных энергоресурсов и объемов их добычи; I_3 – долю природного газа в структуре потребления первичных энергоресурсов; I_4 – динамику внутренних цен на основные первичные энергоресурсы; I_5 – изменение удельной энергоемкости ВВП; I_6 – существенные негативные воздействия на объекты энергетики; I_7 – устойчивость энергоснабжения потребителей по различным видам энергоресурсов,

включая региональный аспект; I_8 – физический износ основных производственных фондов в отраслях энергетики; I_9 – долю экспорта российских энергоресурсов в общем объеме их производства, включая экспорт в страны АТР. Выделение указанных объектов индикативного анализа позволяет проводить оценку состояния ТЭК с позиции энергетической безопасности и надежности топливо- и энергоснабжения потребителей.

Предлагаемая ФС-модель рассматривается как концептуальная основа организации вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции энергетической безопасности, интеграции качественных и количественных методов анализа и интерпретации результатов. Реализация предложенного подхода включает последовательность взаимосвязанных этапов. На первом этапе исследований формируется фрактальное стратифицированное информационное пространство предметной области, выделяются его основные слои, подслои и отображения между ними. На втором этапе выполняется качественный анализ предметной области с использованием методов семантического моделирования, в результате которого формируется описание объектов ТЭК, угроз энергетической безопасности, мероприятий по их нейтрализации, а также связей между ними. На следующем этапе осуществляется идентификация угроз энергетической безопасности и соответствующих мероприятий, после чего формируются сценарии исследуемых состояний ТЭК, включая базовые, возмущенные, управляющие и комбинированные варианты.

Дальнейший этап связан с переходом от качественного описания к количественному анализу. Он обеспечивается отображением параметров и зависимостей, выявленных на семантическом уровне, в математические модели функционирования и развития ТЭК. В зависимости от постановки задачи при этом могут использоваться линейные и нелинейные модели, соответствующие рассматриваемым сценариям. Для каждого сценария выполняются расчеты, позволяющие получить количественные оценки состояния ТЭК в условиях действия угроз и реализации мероприятий. Полученные результаты отображаются в пространство сценарных состояний и затем оцениваются с использованием

системы индикаторов энергетической безопасности. Завершающий этап состоит в интерпретации результатов количественного анализа и их возврате в семантическое пространство исследования, что обеспечивает уточнение онтологических, когнитивных и событийных моделей, а также формирование рекомендаций по обеспечению энергетической безопасности и поддержке принятия решений.

Таким образом, интерпретация ФС-модели в контексте прогнозных исследований ТЭК с позиции ЭБ может быть представлена следующим образом. Исходному моделированию энергетической инфраструктуры соответствует отображение F_M^P , обеспечивающее переход от описания объектов энергетики к их математическому представлению. Моделирование угроз и мероприятий реализуется посредством отображений F_S^T и F_S^E , обеспечивающих их включение в семантическое пространство исследования. Формирование состояний ТЭК в условиях реализации угроз и мероприятий осуществляется на основе отображений F_V^S и F_V^M , связывающих качественные и количественные представления сценариев. Оценка сценариев по индикаторам энергетической безопасности реализуется посредством отображения F_I^V , а интерпретация результатов и их использование для уточнения знаний посредством отображения F_S^I .

Следовательно, разработанная фрактальная стратифицированная модель позволяет формализовать сложную структуру знаний о прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения ЭБ через выделение взаимосвязанных слоёв и отображений между ними. В отличие от традиционного описания, ограничивающегося перечислением уровней исследования, предложенный подход ориентирован на обеспечение технологической связности между качественным и количественным этапами анализа. Это создаёт методическую основу для интеграции семантического и математического моделирования, автоматизированного формирования сценариев, расчёта состояний ТЭК и их оценки по индикаторам энергетической безопасности. Тем самым ФС-модель выступает не только как средство концептуального описания предметной области,

но и как основа построения современной инструментальной технологии для интеллектуальной поддержки прогнозных исследований ТЭК с позиции энергетической безопасности.

2.2. Методические основы интеграции математического, семантического и когнитивного моделирования в исследованиях развития ТЭК с позиции обеспечения ЭБ

2.2.1. Экономико-математическая модель ТЭК и ее расширение экономическими, экологическими и квазидинамическими уравнениями

Исследования направлений развития ТЭК в диссертационной работе опираются на экономико-математическую модель оптимизации балансов топливно-энергетических ресурсов по России [27, 30]. В математическом отношении модель представляет собой задачу линейного программирования. В содержательном плане она описывает территориально-производственную структуру ТЭК, включая добычу, переработку, преобразование, транспорт энергоресурсов и их потребление различными категориями потребителей.

Модель имеет вид, где целевая функция представлена выражением:

$$C^T X + \sum_{t \in T} r_t^T (R_t - Y_t) \rightarrow \min, \quad (2.16)$$

балансовое уравнение выражением:

$$AX - \sum_{t \in T} Y_t = 0, \quad (2.17)$$

ограничения на технологические способы выражением:

$$0 \leq X \leq D, \quad (2.18)$$

а ограничения на удовлетворение спроса выражением:

$$0 \leq Y_t \leq R_t, t \in T, \quad (2.19)$$

где X – вектор интенсивностей использования технологических способов функционирования энергетических объектов; A – матрица технологических коэффициентов производства, переработки, преобразования и транспорта энергоресурсов; Y_t – вектор объемов потребления топлива и энергии потребителями категории t ; D – вектор технически допустимых интенсивностей использования технологических способов; R_t – вектор заданного спроса потребителей категории t ; C – вектор удельных приведенных затрат; r_t – вектор удельных ущербов от дефицита энергоресурсов.

Для формализованного описания структуры модели используется система кодирования переменных и ограничений [65]. Переменные типа TRV имеют код вида $XXXYYZZ$, где XXX обозначает объект или группу объектов добычи, производства, транспорта, переработки либо потребления энергоресурсов, YY – район, ZZ – технологию. Ограничения типа IR имеют код вида $QQQYY$, где QQQ обозначает энергетический ресурс, YY – район. Такая система обозначений используется при формировании расчетных сценариев и установлении связей между элементами экономико-математической и семантической моделей.

Существовавшая ранее модель обеспечивала расчет территориально-производственных балансов, структуры использования энергоресурсов и дефицитов. Вместе с тем она недостаточно отражала экономические, экологические и межпериодные связи, существенные при исследовании направлений развития ТЭК. В настоящей работе модель модифицирована путем введения дополнительных уравнений и ограничений, обеспечивающих учет бюджетных, экологических и межпериодных условий.

Экономические связи задаются через ограничение на допустимый объем капитальных вложений, представленное формулой:

$$\sum_{i \in J_I} k_i x_i \leq I, \quad (2.20)$$

где J_I – множество технологических способов, требующих инвестиционного обеспечения; k_i – удельные капитальные вложения по технологическому способу

i ; x_i – интенсивность использования соответствующего технологического способа;
 I – допустимый объем инвестиционных ресурсов.

Экологические связи задаются уравнением расчета суммарных выбросов загрязняющего вещества p в федеральном округе r , представленным формулой:

$$E_r^{(p)} = \sum_{i \in F_r} a_i^{(p)} F_i, \quad (2.21)$$

где $E_r^{(p)}$ – суммарные выбросы загрязняющего вещества p в федеральном округе r ;
 F_i – объем использования топлива вида i ; $a_i^{(p)}$ – коэффициент выбросов загрязняющего вещества p для топлива i ; F_r – множество видов топлива, используемых в федеральном округе r .

Экологическое ограничение на допустимый уровень выбросов задается формулой:

$$E_r^{(p)} \leq L_r^{(p)}, \quad (2.22)$$

где $L_r^{(p)}$ – допустимый уровень выбросов загрязняющего вещества p в федеральном округе r . В модели учитываются выбросы CO_2 , SO_2 , NO_x и твердых частиц.

Квазидинамические связи вводятся для учета межпериодных последствий сценарных решений. Для периода t показатель z_j , формируемый группой переменных модели, задается выражением:

$$z_j^{(t,\omega)} = \sum_{i \in I_j} a_{ji}^{(t,\omega)} x_i^{(t,\omega)}, \omega \in \{0, s\}, \quad (2.23)$$

где $\omega = 0$ соответствует базовому варианту, $\omega = s$ – сценарному варианту; I_j – множество переменных, формирующих показатель z_j ; $a_{ji}^{(t,\omega)}$ – коэффициенты связи; $x_i^{(t,\omega)}$ – значения переменных модели.

Межпериодное отклонение определяется по формуле:

$$\Delta_j^{(t)} = z_j^{(t,0)} - z_j^{(t,s)}, j \in J_{qd}, \quad (2.24)$$

где J_{qd} – множество показателей, используемых для квазидинамической корректировки. Полученное отклонение применяется для изменения условий модели следующего периода по формуле:

$$P_j^{(t+1,s)} = \Phi_j \left(P_j^{(t+1,0)}, \Delta_j^{(t)} \right), \quad (2.25)$$

где P_j – корректируемый параметр модели следующего периода; Φ_j – функция межпериодного переноса.

Функция межпериодного переноса задает правило изменения допустимой области модели следующего расчетного периода и имеет вид:

$$\Phi_j: (P_j^{(t+1,0)}, \Delta_j^{(t)}) \mapsto P_j^{(t+1,s)}. \quad (2.26)$$

В качестве корректируемых параметров могут выступать верхние и нижние границы переменных, а также границы ограничений модели. Для переменной x_i может использоваться правило расчета отклонения, представленное формулой:

$$\Delta_i^{(t)} = \max \left(0, x_i^{(t,0)} - x_i^{(t,s)} \right), \quad (2.27)$$

и правило корректировки верхней границы, представленное формулой:

$$U_i^{(t+1,s)} = \max \left(L_i^{(t+1,0)}, U_i^{(t+1,0)} - \alpha_i \Delta_i^{(t)} \right), \quad (2.28)$$

где $U_i^{(t+1,s)}$ – верхняя граница переменной в сценарной модели следующего периода; $U_i^{(t+1,0)}$, $L_i^{(t+1,0)}$ – верхняя и нижняя границы переменной в базовой модели следующего периода; α_i – коэффициент межпериодного переноса.

Корректировка нижней границы отдельного ограничения задается формулой:

$$L_r^{(t+1,s)} = \Phi_{r,L} \left(L_r^{(t+1,0)}, \Delta_r^{(t)} \right), \quad (2.29)$$

а корректировка верхней границы, формулой:

$$U_r^{(t+1,s)} = \Phi_{r,U} \left(U_r^{(t+1,0)}, \Delta_r^{(t)} \right), \quad (2.30)$$

где $L_r^{(t+1,s)}$, $U_r^{(t+1,s)}$ – нижняя и верхняя границы ограничения в сценарной модели следующего периода; $L_r^{(t+1,0)}$, $U_r^{(t+1,0)}$ – соответствующие границы в базовой модели следующего периода; $\Phi_{r,L}$, $\Phi_{r,U}$ – функции корректировки границ ограничения.

Использование термина «квазидинамические связи» обусловлено тем, что связь между расчетными периодами задается не системой динамических уравнений состояния, а процедурой переноса последствий сценарного расчета периода t на параметры оптимизационной задачи периода $t + 1$. При этом структура линейной оптимизационной модели сохраняется, но изменяется ее допустимая область.

Таким образом, модификация экономико-математической модели ТЭК заключается во введении дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи. Это обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

2.2.2. Методика интеграции математического и семантического моделирования в исследованиях развития ТЭК с позиции обеспечения ЭБ

Методика интеграции математического и семантического моделирования в исследованиях развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности разработана для обеспечения перехода от качественного описания предметной области, угроз и мероприятий к количественному анализу вариантов развития ТЭК. Необходимость такой методики обусловлена тем, что традиционные экономико-математические модели позволяют выполнять расчеты и оценивать состояние системы, однако в явном виде не обеспечивают формализованного учета знаний о структуре предметной области, причинно-следственных зависимостях между ее элементами, а также воздействии угроз и компенсирующих мероприятий.

Предлагаемая методика обеспечивает формализованное связывание семантического описания предметной области с параметрами экономико-математической модели ТЭК, формирование вычислительных сценариев на основе онтологий и когнитивных карт, модификацию параметров модели в соответствии с заданными воздействиями и интерпретацию результатов вычислительных экспериментов в семантическом пространстве исследования. Тем самым реализация положений методики позволяет связать семантический уровень исследования, на котором описываются объекты, процессы, угрозы и мероприятия, с математическим уровнем, на котором осуществляется количественная оценка состояний и варианты развития ТЭК.

Предлагаемая методика интеграции когнитивного и математического моделирования включает четыре взаимосвязанных этапа: определение множества реляционных отношений, обеспечивающих связь семантических и математических моделей; построение онтологического описания модели ТЭК; построение когнитивных карт исследования развития ТЭК; проведение вычислительного эксперимента. Такая последовательность этапов обеспечивает переход от формализованного описания элементов экономико-математической модели к формированию вычислительных сценариев и последующей интерпретации результатов.

Этап 1. Определение множества реляционных отношений для интеграции семантических и математических моделей.

На первом этапе формируется система реляционных отношений, описывающих взаимосвязи между элементами математической модели и семантическими сущностями предметной области. Данный этап является основой интеграции, поскольку именно здесь задаётся формализованное сопоставление переменных, ограничений и параметров экономико-математической модели с объектами энергетической инфраструктуры, угрозами и мероприятиями.

Для формализации данных, используемых в исследовании, предлагается использовать реляционные базы данных и алгоритмы их обработки. В этих целях была сформирована схема в нотации Чена, представленная на Рисунке 2.3. Сформированная структура данных обеспечивает совместное хранение элементов математической модели, вычислительных сценариев и компонентов когнитивных карт, используемых для задания и интерпретации сценариев развития ТЭК.

Отношение «Модель» содержит основные сведения о математической модели, включая её идентификатор, наименование, описание и целевую функцию. С данным отношением связаны отношения «Уравнение» и «Переменная», в которых хранятся соответственно ограничения модели и её переменные. Для отношения «Уравнение» фиксируются идентификатор, наименование, верхняя и нижняя границы, а также ссылка на модель, к которой принадлежит данное

ограничение. Для отношения «Переменная» сохраняются идентификатор, наименование, верхняя и нижняя границы, а также коэффициент стоимости.

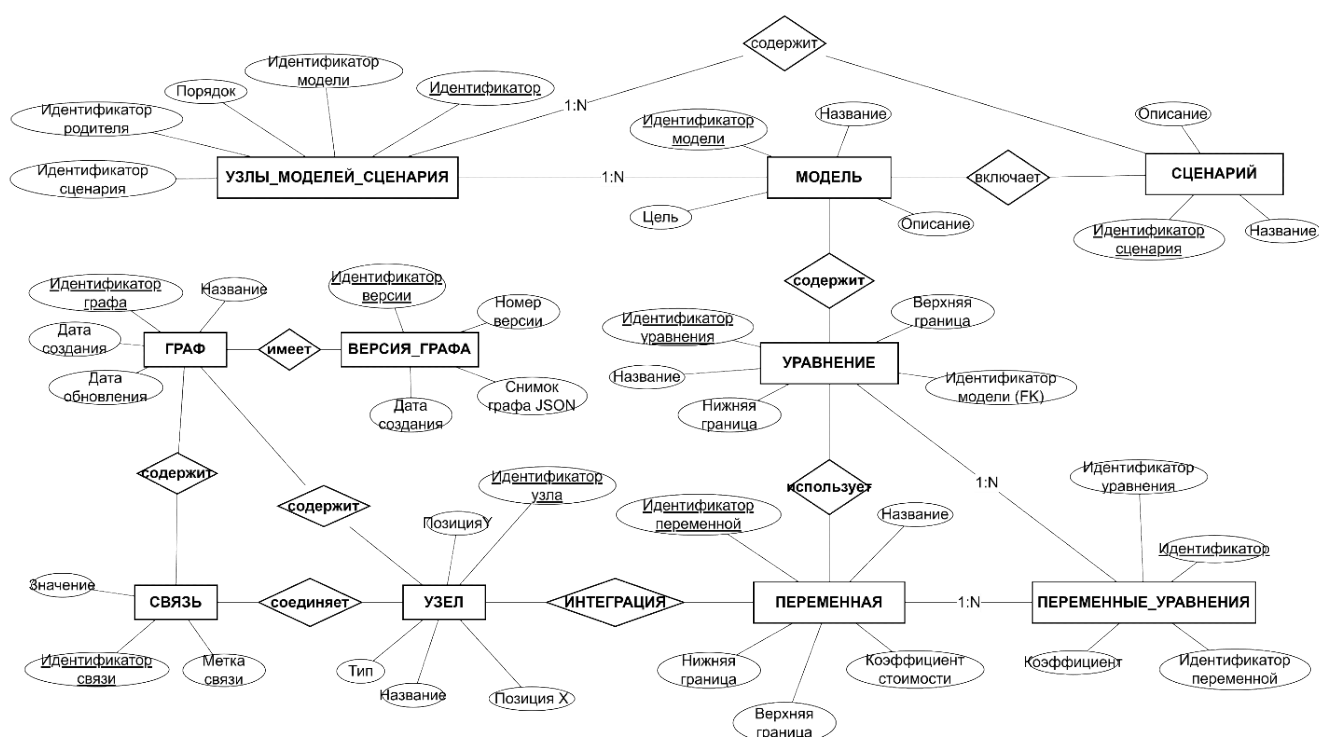


Рисунок 2.3 – Множество реляционных отношений в нотации Чена
(модель «сущность–связь»)

Для формализованного описания структуры математической модели введено отношение «Переменные_уравнения», отражающее вхождение переменных в уравнения. В данном отношении фиксируются идентификаторы уравнения и переменной, а также коэффициент при переменной в соответствующем уравнении. Это позволяет задавать структуру математических ограничений модели и использовать её при формировании вычислительных сценариев.

Для описания сценарной организации вычислительного эксперимента используется отношение «Сценарий», содержащее идентификатор сценария, его наименование и описание. Связь между сценарием и используемыми моделями реализуется через отношение «Узлы_моделей_сценария», в котором фиксируются идентификатор сценария, идентификатор модели, идентификатор родительского

узла и порядок следования. Это отношение позволяет задавать иерархическую структуру сценария и определять последовательность использования моделей в рамках вычислительного эксперимента.

Семантическая составляющая интеграции представлена отношениями, описывающими когнитивные карты. Отношение «Граф» хранит информацию о когнитивных картах, включая их идентификатор, наименование, дату создания и дату обновления. Для обеспечения возможности хранения и анализа различных состояний когнитивной карты введено отношение «Версия_графа», в котором сохраняются идентификатор версии, номер версии, дата создания и снимок графа в формате JSON.

Отношение «Узел» хранит информацию о концептах когнитивной карты. Для каждого узла фиксируются его идентификатор, наименование, тип и координаты расположения на графической схеме. Отношение «Связь» предназначено для хранения информации о взаимосвязях между узлами когнитивной карты. В нём сохраняются идентификатор связи, её метка и числовое значение, характеризующее силу или направление влияния. Тем самым обеспечивается возможность формального описания причинно-следственных зависимостей между факторами, угрозами и мероприятиями.

Таким образом, разработанная система реляционных отношений обеспечивает интеграцию математической модели, вычислительных сценариев и когнитивных карт в рамках единого информационного пространства исследования. Это создаёт основу для автоматизированного формирования сценариев, модификации параметров модели под воздействием угроз и мероприятий, а также для интерпретации результатов расчётов в семантическом представлении.

Таким образом, на первом этапе создаётся реляционная основа, необходимая для формализованного связывания семантических и математических моделей и дальнейшего формирования вычислительных сценариев.

Этап 2. Построение онтологического описания модели ТЭК.

На втором этапе выполняется автоматизированное построение онтологического описания экономико-математической модели ТЭК. Онтология

используется для структуризации знаний о составе уравнения, типах входящих в него переменных и связях между ними и рассматривается как промежуточное представление между математической моделью и когнитивной картой.

Входом алгоритма является ограничение математической модели вида IR_{QQQYY} , где QQQ – код ресурса, а YY – код района. На основании кода уравнения определяется тип балансируемого ресурса и территориальная принадлежность рассматриваемой модели. Для выбранного уравнения формируется центральный концепт онтологии I_1 , соответствующий ресурсу в заданном районе. Например, для уравнения 00121 таким концептом является «природный газ в Северо-Западном районе».

Далее из состава уравнения выделяются все входящие в него переменные, после чего выполняется их классификация по типу. Переменные с буквенными префиксами D , B , E , I , K интерпретируются соответственно как добыча или производство ресурса, потребность в ресурсе, экспорт, импорт и транспорт. Переменные с числовыми кодами интерпретируются как технологические объекты или процессы преобразования энергоресурсов. Для интерпретации переменных используются справочники кодов районов, технологий и типов операций.

На следующем шаге каждой выделенной переменной ставится в соответствие концепт онтологии. После этого между центральным концептом I_1 и концептами переменных устанавливаются связи первого уровня в соответствии с метаонтологией ТЭК. Для добывающих и производящих переменных формируются связи типа «добывает» или «производит», для импортных и экспортных переменных формируются связи «импортирует» и «экспортирует», для транспортных переменных формируются связи «привозит» и «вывозит», для потребителей формируются связи «потребляет». Тем самым формируется онтология, описывающая структуру баланса соответствующего ресурса в заданном районе.

Формирование уравнения баланса первичного ТЭР выполняется на основе метаонтологии, представленной на Рисунке 2.4. Центральному концепту соответствует балансируемый ресурс в заданном районе, а окружающим

концептам соответствуют переменные математической модели, интерпретированные в терминах добычи, импорта, экспорта, транспорта, потребления и технологического преобразования ресурса.

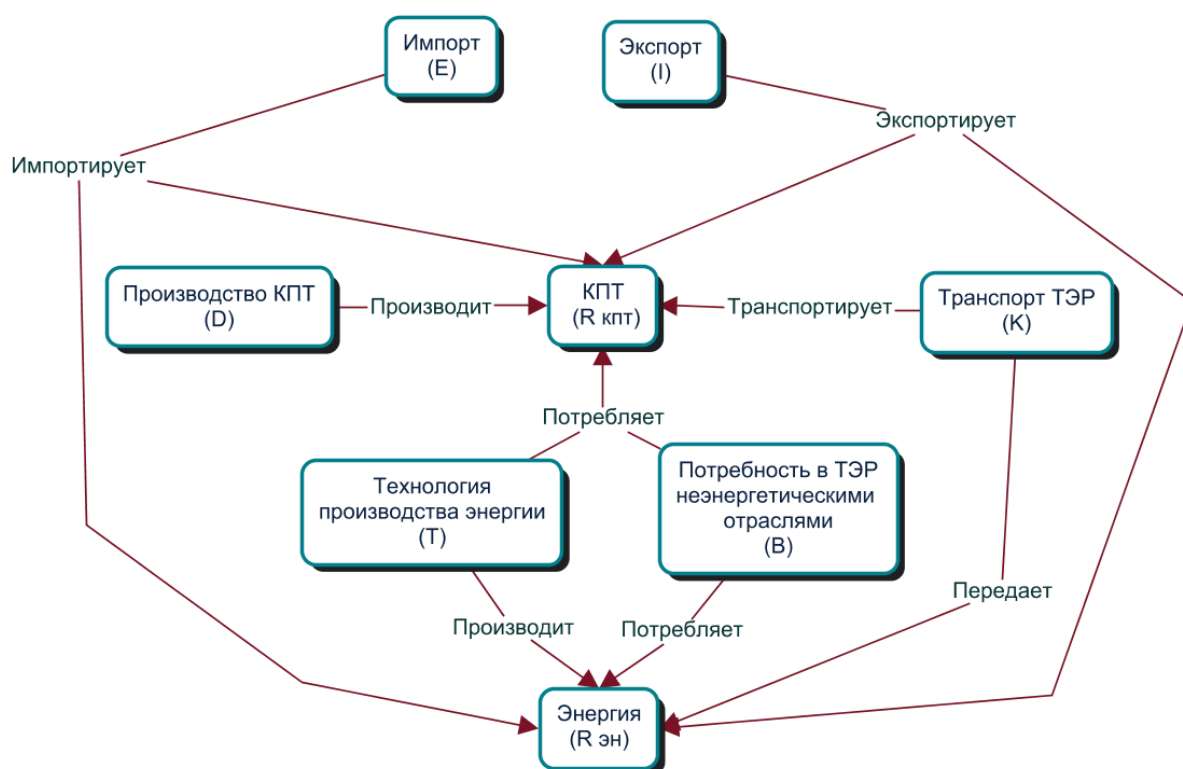


Рисунок 2.4 – Метаонтология представления фрагмента
экономико-математической модели ТЭК по выбранному энергоресурсу в
федеральном округе

Если в составе уравнения присутствуют технологические переменные, характеризующие преобразование первичного ресурса в электроэнергию или теплоэнергию, онтологический граф расширяется за счет дополнительной детализации технологических связей. Для соответствующих переменных создаются концепты технологий T_j , для которых устанавливаются связи вида $I_1 \rightarrow T_j$ («ресурс потребляется технологией») и $T_j \rightarrow I_2$ («технология производит вторичный энергоресурс»), где I_2 соответствует электроэнергии, теплоэнергии или электрической мощности в заданном федеральном округе. В результате единое

онтологическое представление включает баланс выбранного энергоресурса и связи его технологического преобразования.

Результатом работы алгоритма является единый онтологический граф фрагмента экономико-математической модели ТЭК, включающий концепт балансируемого энергоресурса, связанные с ним концепты производства, импорта, экспорта, транспорта, потребления и технологий, а также отношения между ними. Полученный граф используется далее, как основа для автоматизированного построения когнитивной карты исследуемого сценария. Пример онтологического представления фрагмента экономико-математической модели ТЭК для природного газа в Сибирском федеральном округе представлен на Рисунке 2.5.

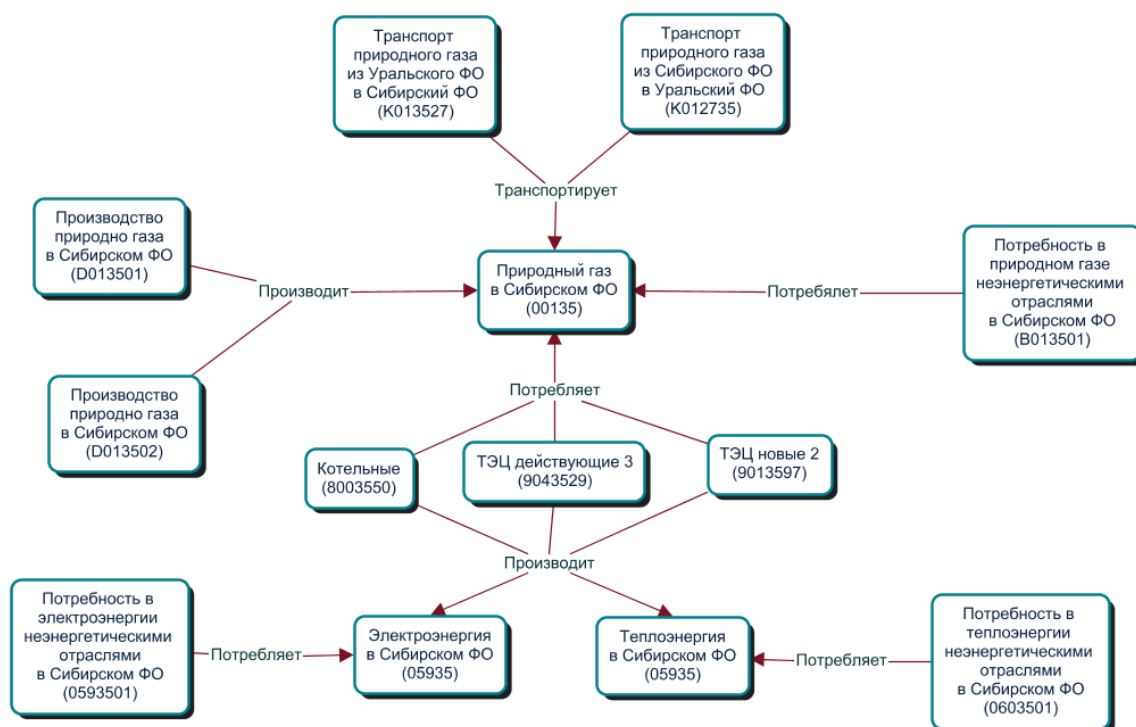


Рисунок 2.5 – Пример онтологического представления фрагмента экономико-математической модели ТЭК по природному газу в Сибирском федеральном округе

Этап 3. Построение когнитивных карт исследования развития ТЭК.

На третьем этапе на основе сформированного онтологического описания строятся когнитивные карты исследования развития ТЭК. Если онтология

обеспечивает структуризацию знаний о составе модели и фиксирует наличие связей между ее элементами, то когнитивная карта позволяет отразить причинно-следственные зависимости между факторами развития ТЭК, угрозами энергетической безопасности и мероприятиями по их нейтрализации. Тем самым осуществляется переход от структурного представления предметной области к её сценарно-аналитическому описанию.

В рамках предлагаемой методики когнитивная карта рассматривается, с одной стороны, как интерфейс формирования вычислительного сценария, а с другой как средство интерпретации результатов оптимизационных расчётов. В когнитивной карте выделяются два типа концептов: концепты, соответствующие элементам экономико-математической модели, и концепты, характеризующие угрозы и мероприятия. Первые обеспечивают связь когнитивной карты с математической моделью, вторые позволяют включать в вычислительный сценарий возмущающие и управляющие воздействия.

Построенная на предыдущем этапе онтология используется как основа для формирования когнитивной карты, а именно для задания триплетов, описывающих взаимосвязи между элементами экономико-математической модели и факторами угроз и мероприятий. Для включения угрозы или мероприятия в когнитивную карту задаётся триплет, содержащий наименование соответствующего фактора, тип элемента экономико-математической модели, на который оказывается воздействие, код элемента, параметр элемента, тип связи и значение связи. Таким образом, каждому фактору угрозы или мероприятию ставится в соответствие определённый способ модификации параметров математической модели.

В качестве параметров элементов модели, изменяемых через когнитивную карту, рассматриваются: для переменных типа TRV это: верхнее ограничение, нижнее ограничение и коэффициент при целевой функции; для ограничений типа IR это: верхнее ограничение, нижнее ограничение и коэффициент переменной в неравенстве. Эти параметры приведены в Таблице 2.1.

Механизм перехода от когнитивной карты к экономико-математической модели реализуется через кодовое сопоставление концептов карты с элементами

расчетной модели. Для каждого концепта, соответствующего элементу экономико-математической модели, фиксируются тип элемента, его код, изменяемый параметр и значение сценарного воздействия. Код элемента используется как формальный идентификатор, позволяющий связать семантическое представление угрозы или мероприятия с конкретной переменной либо ограничением модели. Тем самым качественное воздействие, заданное на уровне когнитивной карты, получает количественную интерпретацию в виде изменения параметров экономико-математической модели.

Таблица 2.1 – Параметры элементов экономико-математической модели, используемые при построении триплетов когнитивной карты

Тип элемента модели	Параметр элемента
TRV	Верхнее ограничение
	Нижнее ограничение
	Коэффициент при целевой функции
IR	Верхнее ограничение
	Нижнее ограничение
	Коэффициент переменной в неравенстве

В программной реализации данный механизм выполняется как процедура формирования нового варианта модели. Исходная экономико-математическая модель копируется, после чего для узлов когнитивной карты, содержащих коды элементов модели, выполняется поиск соответствующих переменных в созданной копии. Если для узла заданы измененные значения нижней или верхней границы, они переносятся в соответствующие параметры переменной нового варианта модели. Полученный вариант включается в дерево вычислительного сценария и используется для последующего оптимизационного расчета. Таким образом, когнитивная карта выступает не только средством представления причинно-следственных связей, но и инструментом параметризации вычислительного сценария.

После задания соответствующих триплетов в когнитивной карте формируются концепты угроз и мероприятий, связанные с элементами математической модели. Изменение значений этих концептов приводит к

модификации параметров экономико-математической модели, что обеспечивает формирование альтернативных вычислительных сценариев. В результате расчёта модели получаются новые оптимальные значения параметров, которые затем могут быть интерпретированы в терминах семантического пространства исследования. Тем самым обеспечивается возможность не только задания сценарного воздействия, но и последующего анализа его последствий.

Таким образом, когнитивная карта в рамках предлагаемой методики выступает как связующее звено между онтологическим описанием предметной области и экономико-математической моделью ТЭК. Она обеспечивает формализованное включение угроз и мероприятий в вычислительный сценарий, модификацию параметров математической модели и последующую интерпретацию результатов расчётов в семантическом пространстве исследования.

Этап 4. Формирование и реализация вычислительного сценария исследования.

На четвёртом этапе осуществляется формирование и реализация вычислительного сценария исследования. Данный этап включает построение базового варианта модели, формирование вариантов развития ТЭК в условиях реализации угроз и мероприятий, выполнение расчётов и интерпретацию полученных результатов с использованием семантических моделей. Для построения вычислительного сценария определяются базовый вариант модели, состав рассматриваемых угроз и мероприятий, а также индикаторы, по которым оценивается эффективность выбранной стратегии развития в условиях возмущающих воздействий.

Формирование базового варианта начинается с выбора онтологии, описывающей исследуемую область ТЭК. Исследователь задаёт район или совокупность районов, которым в модели соответствуют определённые коды. По этим кодам из отношения онтологий извлекаются соответствующие концепты и устанавливаются связи между ними.

На этом же этапе определяются угрозы и мероприятия, включаемые в вычислительный сценарий, а также их исходные значения, характеризующие

базовый вариант. Из отношения угроз и мероприятий выбираются те из них, которые связаны с элементами модели, представленными в выбранной онтологии. Такое сопоставление выполняется по кодам элементов модели, то есть по переменным и ограничениям. После этого выполняется поиск оптимального решения для базового варианта модели. Для концептов онтологии рассчитываются и устанавливаются соответствующие значения, что создаёт основу для перехода к формированию альтернативных сценарных вариантов.

Формирование вариантов развития ТЭК в условиях возмущающих воздействий осуществляется путём задания новых значений концептов угроз и выполнения последующих расчётов. На уровне программного комплекса альтернативный вариант формируется как отдельная копия базовой модели с изменёнными параметрами, полученными из когнитивной карты. Такой подход позволяет сохранять исходную модель без изменений, сопоставлять базовый и сценарные варианты, а также последовательно включать в вычислительный сценарий варианты с угрозами, мероприятиями и их совместным действием. Если для угроз установлены функциональные зависимости, описывающие причинно-следственные связи, то для проведения расчётов достаточно задать новые значения концептов угроз и выполнить расчёт. Если же причинно-следственные связи представлены в виде знаков, весов или иных форм описания, исследователь задаёт значение параметра того элемента модели, с которым связана соответствующая угроза, после чего также выполняется расчёт.

Аналогичным образом осуществляется построение и расчёт вариантов модели с мероприятиями. Последовательное повторение данной процедуры позволяет сформировать полный вычислительный сценарий, включающий базовый вариант, варианты с реализацией угроз, варианты с реализацией мероприятий, а также комбинированные варианты, учитывающие совместное действие угроз и компенсирующих воздействий.

Полученные результаты расчётов интерпретируются в семантическом пространстве исследования и могут быть отображены на когнитивной карте. Это позволяет сопоставить изменения количественных параметров модели с

соответствующими факторами угроз и мероприятиями, а также выполнить визуальный анализ последствий рассматриваемых сценариев. Тем самым когнитивная карта используется не только как средство задания сценарных воздействий, но и как инструмент интерпретации результатов вычислительного эксперимента. На Рисунке 2.6 представлены две блок-схемы, описывающие предлагаемую методику.

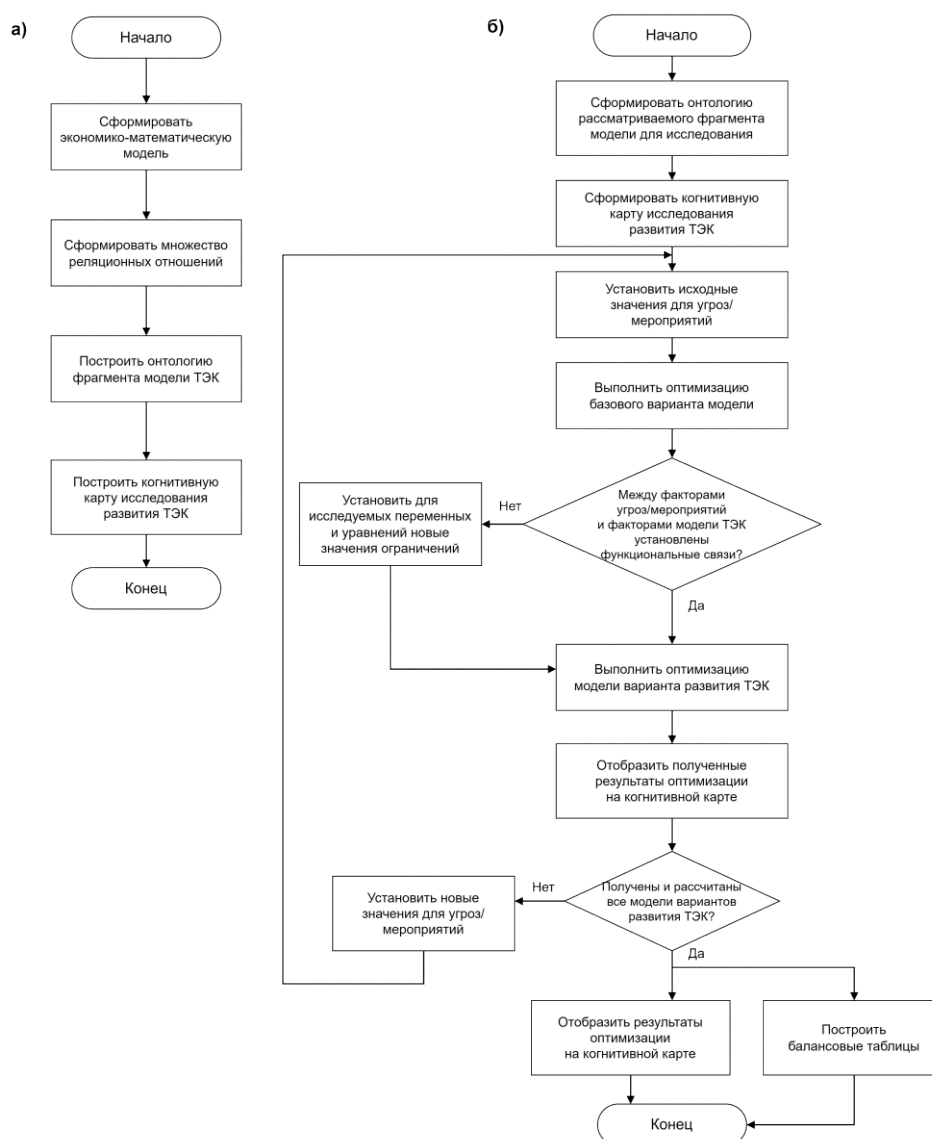


Рисунок 2.6 – а) блок-схема формирования реляционной, онтологической и когнитивной моделей, реализующая интеграцию семантического и математического моделирования; б) блок-схема проведения вычислительного эксперимента на основе интеграции семантического и математического моделирования

Таким образом, результатом четвёртого этапа является сформированный вычислительный сценарий исследования, обеспечивающий переход от базового варианта модели к множеству альтернативных сценариев развития ТЭК в условиях реализации угроз и мероприятий, а также получение и интерпретацию результатов соответствующих расчётов.

2.3. Численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов

В исследованиях направлений развития топливно-энергетического комплекса существенное значение имеет учет неопределенности, обусловленной изменчивостью внешних воздействий, вариацией условий функционирования энергетических систем и неполной определенностью экспертных оценок угроз энергетической безопасности. Использование только детерминированных сценариев математического моделирования в таких условиях не позволяет в полной мере отразить возможное множество состояний исследуемой системы и ограничивает возможности анализа устойчивости рассматриваемых вариантов развития ТЭК.

В связи с этим в рамках разработанной фрактальной стратифицированной модели прогнозных исследований ТЭК предлагается численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели на основе когнитивных весов (SCWA – Stochastic Cognitive Weight Adjustment). Метод предназначен для формализованного учета неопределенности сценарных воздействий и согласования качественных экспертных представлений, формируемых в слое семантического моделирования, с количественными параметрами экономико-математической модели ТЭК. Его применение позволяет перейти от единичного детерминированного расчета к формированию множества сценарных состояний, отражающих возможные варианты реализации угроз и мероприятий.

Предлагаемый численный метод представляет собой адаптацию метода Монте-Карло к задаче стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов.

В отличие от классической схемы Монте-Карло, в которой вероятностные распределения параметров задаются априорно, в предлагаемом методе вероятностные характеристики корректируемых параметров формируются на основе результатов когнитивного моделирования. Для этого используются агрегированные когнитивные веса причинно-следственных связей и оценки уверенности экспертов.

Под агрегированными когнитивными весами понимаются обобщенные количественные оценки результирующего влияния совокупности входящих связей когнитивной карты на соответствующий параметр экономико-математической модели. Указанные оценки учитывают знак и интенсивность причинно-следственного влияния, а также степень уверенности экспертов в заданных связях. Это позволяет формализовать переход от качественного описания угроз и факторов развития ТЭК к параметризации стохастических расчетов.

Таким образом, метод представляет собой модификацию процедур стохастического параметрического анализа оптимизационных моделей, дополненную механизмом семантической интерпретации неопределённости, что обеспечивает согласованное использование экспертных знаний и количественных методов исследования развития топливно-энергетического комплекса.

В методе используется когнитивная карта, представляемая ориентированным взвешенным графом:

$$G = (V_c, E_c), \quad (2.31)$$

где $V_c = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ – множество концептов, а $E_c \subseteq V_c \times V_c$ – множество причинно-следственных связей между ними.

Каждая связь $(v_j \rightarrow v_i) \in E_c$ характеризуется весовым коэффициентом

$$w_{ji} \in [-1, 1], \quad (2.32)$$

и степенью уверенности эксперта [10], задаваемой выражением

$$c_{ji} \in [0, 1]. \quad (2.33)$$

Для интеграции когнитивного и математического моделирования вводится отображение:

$$\Phi: V_c \rightarrow P, \quad (2.34)$$

сопоставляющее концептам когнитивной карты параметры математической модели. Экономико-математическая модель ТЭК представляется в виде задачи оптимизации:

$$\min_{x \in X} F(x, p), \quad (2.35)$$

где x – вектор переменных модели, $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ – вектор параметров, $p_i^{(0)}$ – их базовые значения.

Для каждого концепта v_i рассматривается множество входящих воздействий:

$$In(v_i) = \{(v_j \rightarrow v_i) \in E_c\}, \quad (2.36)$$

Отдельная входящая связь может быть записана в виде:

$$In(v_i) = \{(v_j \rightarrow v_i)\}. \quad (2.37)$$

Агрегированное когнитивное воздействие определяется как нормированная взвешенная сумма входящих влияний по формуле:

$$W_i = \frac{\sum_{(j \rightarrow i) \in In(v_i)} w_{ji} c_{ji}}{\sum_{(j \rightarrow i) \in In(v_i)} c_{ji}}, \quad (2.38)$$

при условии, что $\sum_{(j \rightarrow i) \in In(v_i)} c_{ji} > 0$. Если для концепта v_i входящие связи отсутствуют, принимается условие:

$$W_i = 0. \quad (2.39)$$

Такая форма позволяет учитывать как знак и силу когнитивного влияния, так и степень доверия к экспертным оценкам, не допуская искусственного увеличения суммарного эффекта только за счет числа входящих связей.

Суммарная степень уверенности экспертов определяется выражением:

$$C_i = 1 - \prod_{(j \rightarrow i) \in In(v_i)} (1 - c_{ji}). \quad (2.40)$$

Данная величина интерпретируется как агрегированная мера уверенности по совокупности входящих воздействий и принимает значения в интервале $[0, 1]$.

Стохастическая корректировка параметра p_i в k -й реализации моделируется случайной величиной:

$$\Delta p_i^{(k)} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), \quad (2.41)$$

где математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение задаются соответственно формулами:

$$\mu_i = \beta W_i p_i^{(0)}, \quad (2.42)$$

$$\sigma_i = \alpha |p_i^{(0)}| (1 - C_i). \quad (2.43)$$

Здесь β – коэффициент, задающий масштаб среднего смещения параметра под действием когнитивного воздействия, α – коэффициент, определяющий уровень стохастической вариации.

Предварительно исходное значение параметра $p_i^{(0)}$ детерминированно преобразуется в соответствии со сценарными условиями. Результат такого преобразования обозначим через выражение:

$$\tilde{p}_i = \Psi_i(p_i^{(0)}), \quad (2.44)$$

где Ψ_i задает сценарное изменение i -го параметра. В зависимости от постановки задачи функция Ψ_i может описывать изменение параметра в относительных или абсолютных величинах.

Тогда значение параметра в k -й реализации определяется по формуле:

$$p_i^{(k)} = \max(0, \tilde{p}_i + \Delta p_i^{(k)}), \quad (2.45)$$

где Π – оператор проекции на допустимый интервал изменения параметра.

Для каждой реализации параметров $p^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$, решается оптимизационная задача:

$$x^{(k)} = \arg \min_{x \in X} F(x, p^{(k)}), \quad (2.46)$$

в результате чего формируется множество сценарных состояний:

$$V^{SCWA} = \{V^{(k)}\}_{k=1}^N. \quad (2.47)$$

Агрегирование результатов вычислительного эксперимента выполняется на основе статистических характеристик исследуемых индикаторов. Для индикатора I_r определяется оценка математического ожидания по формуле:

$$E[I_r] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N I_r^{(k)}, N \geq 1, \quad (2.48)$$

и дисперсии по формуле:

$$Var(I_r) = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(I_r^{(k)} - E[I_r] \right)^2, N \geq 2. \quad (2.49)$$

Предложенный численный метод обеспечивает формализованное связывание когнитивной модели с параметрами экономико-математической модели и формирование множества сценарных состояний ТЭК в условиях неопределенности. Это позволяет исследовать развитие топливно-энергетического комплекса, выявлять чувствительность энергетической системы к реализации угроз и обосновывать выбор мероприятий по обеспечению энергетической безопасности в рассматриваемом аспекте.

В отличие от детерминированного задания сценарных параметров, предлагаемый метод учитывает направленность и силу причинно-следственных связей, заданных в когнитивной модели. За счет этого корректировка параметров экономико-математической модели выполняется не произвольно, а с учетом причинно-следственных связей, заданных в когнитивной карте.

Последовательность выполнения предложенного численного метода стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов представлена на Рисунке 2.7. Алгоритм метода включает задание исходной экономико-математической модели и базовых параметров, построение когнитивной карты и привязку ее концептов к параметрам модели, агрегирование экспертных оценок, определение вероятностных характеристик корректируемых параметров, многократное решение оптимизационной задачи и последующий расчет индикаторов энергетической безопасности по множеству полученных сценарных состояний.

Представленный алгоритм положен в основу программной реализации метода в ПК «ИНТЭК-SAW», рассматриваемой в Разделе 3.2, и используется при проведении вычислительных экспериментов, результаты которых приведены в Разделе 3.4.

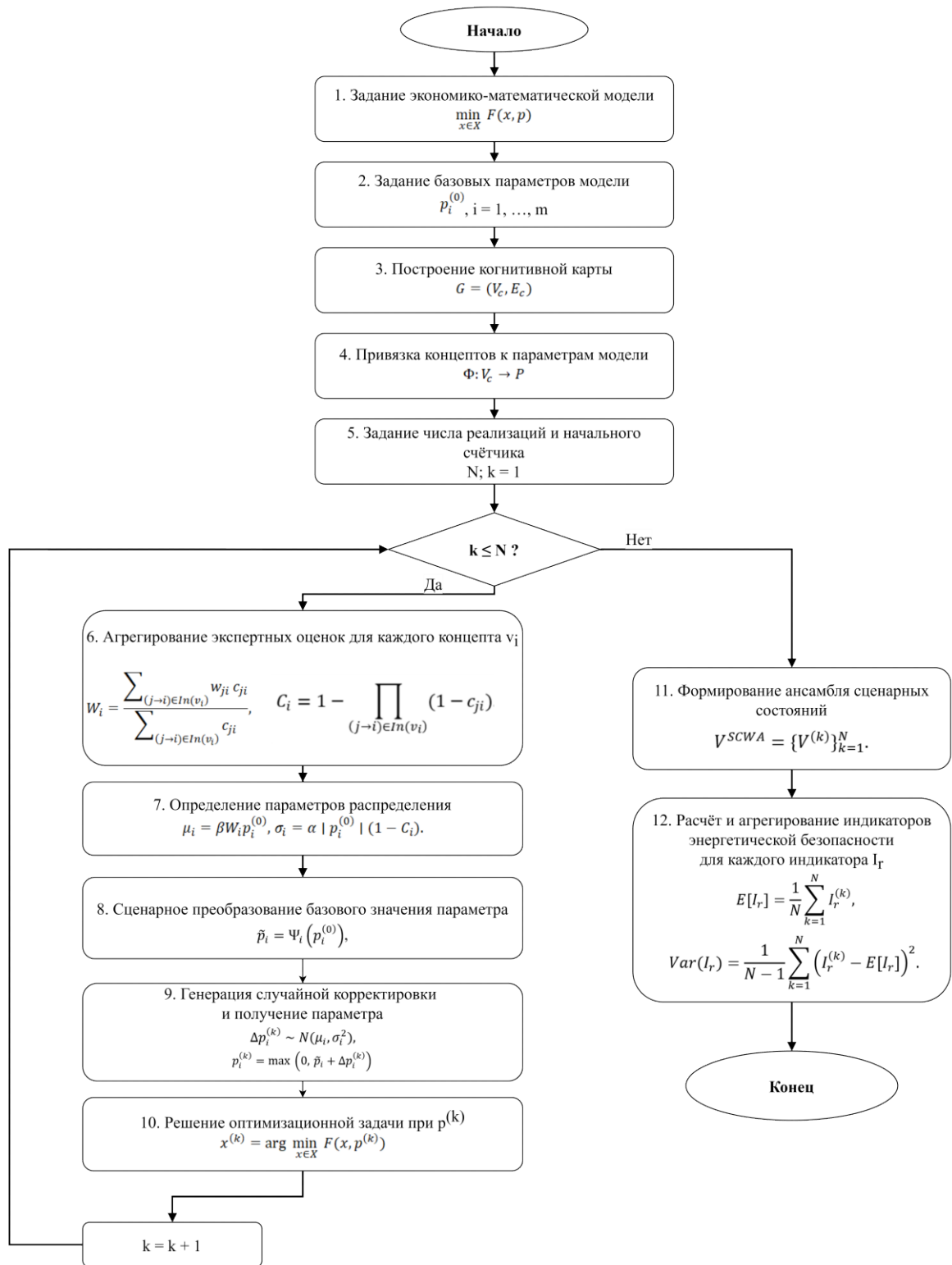


Рисунок 2.7 – Блок-схема численного метода стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов

2.4. Проектирование ПК «ИНТЭК-SAW»

Программный комплекс «ИНТЭК» предназначен для поддержки принятия стратегических решений по развитию топливно-энергетического комплекса и используется как инструмент проведения вычислительных экспериментов и анализа сценариев развития ТЭК с позиции обеспечения ЭБ. Одним из этапов развития данного направления стал программный комплекс «ИНТЭК-М», реализованный на основе агентного подхода к распределению функций между специализированными компонентами. Такая архитектура обеспечивала формирование сценариев развития ТЭК, учет чрезвычайных ситуаций, корректировку информационных моделей, выполнение расчетов и представление результатов анализа.

В состав ПК «ИНТЭК-М» входили агент работы с чрезвычайными ситуациями, агент формирования сценариев развития ТЭК, агент формирования и корректировки информационных моделей, агент-решатель и агент формирования отчетов. Агент работы с чрезвычайными ситуациями обеспечивал формализацию экспертных описаний и их преобразование в параметры расчетной модели. Агент формирования и корректировки информационных моделей был предназначен для настройки цифрового представления ТЭК с учетом условий рассматриваемого сценария. Агент-решатель обеспечивал решение задачи линейного программирования, а агент формирования отчетов обеспечивал представление результатов расчетов. В целом комплекс поддерживал проведение вычислительного эксперимента от задания исходных условий до получения и анализа результатов.

Вместе с тем анализ опыта применения ПК «ИНТЭК-М» показал наличие ограничений, затрудняющих его дальнейшее использование в качестве современного инструментального средства исследования. К числу таких ограничений относились устаревание технической базы, отсутствие задокументированного исходного кода и утрата преемственности разработки.

Указанные обстоятельства обусловили необходимость создания нового программного комплекса, ориентированного на современные требования к интеграции семантического и математического моделирования, web-ориентированной реализации и развитию агентно-сервисной архитектуры.

До разработки ПК «ИНТЭК-SAW» был реализован промежуточный этап развития инструментальных средств, связанный с созданием программного комплекса «ИНТЭК-А» [99, 100]. Его разработка позволила уточнить состав основных функциональных компонентов, отработать отдельные архитектурные решения и сохранить методическую преемственность с ранее созданными версиями комплекса. Реализация комплекса выполнялась на основе опубликованных научных работ, в которых были изложены концептуальные и архитектурные принципы предыдущих версий, а также с учетом опыта их практического применения при анализе направлений развития ТЭК [101]. На данном этапе были разработаны и зарегистрированы отдельные программные компоненты, реализующие основные функции комплекса. К ним относились:

- 1) менеджер управления сценариями [102], предназначенный для формирования сценариев исследования развития ТЭК и работы с их элементами;
- 2) менеджер управления словарями [103], обеспечивающий формирование и ведение словарей переменных и уравнений;
- 3) менеджер управления моделями [104], предназначенный для формирования моделей исследования ТЭК и их включения в единый сценарий.

На следующем этапе указанные компоненты были объединены в единый программный комплекс «ИНТЭК-А» [105], предназначенный для подготовки базового варианта модели, задания сценарных условий, выполнения оптимизационных расчетов и представления результатов в балансовой форме. Тем самым ПК «ИНТЭК-А» стал промежуточным этапом развития инструментальных средств и создал программно-методическую основу для последующей разработки ПК «ИНТЭК-SAW» [106–108].

Архитектура ПК «ИНТЭК-А» построена на основе агентно-сервисного подхода, что обеспечивает модульность, расширяемость и воспроизводимость

вычислительных экспериментов. Внутренняя организация компонентов реализована с использованием архитектурного паттерна MVVM, обеспечивающего разделение пользовательского интерфейса и предметно-ориентированной логики, а также повышающего надежность программной реализации. Использование языков программирования C# и Python и формата обмена данными JSON обеспечивает гибкость архитектуры и возможность дальнейшего развития комплекса.

Реализация настольной версии программного комплекса позволила обеспечить автономную работу системы, оперативную загрузку данных и контроль корректности вычислительных процедур. ПК «ИНТЭК-А» сохранил функциональные возможности предыдущих версий и был расширен за счет поддержки различных паттернов информационных моделей, множественной корректировки сценарных вариантов и унифицированных средств задания ограничений. Применение комплекса «ИНТЭК-А» позволило получать воспроизводимые расчетные результаты, создающие аналитическую основу для исследования направлений развития ТЭК.

Вместе с тем расширение круга исследовательских задач и повышение требований к инструментальным средствам обусловили необходимость дальнейшего развития программной среды. Это потребовало пересмотра архитектурных решений, состава реализуемых средств и способов взаимодействия пользователя с системой. В рамках диссертационного исследования указанные обстоятельства рассматриваются как предпосылка проектирования нового программного комплекса «ИНТЭК-SAW», ориентированного на интеграцию семантического и математического моделирования, проведение вычислительных экспериментов и интеллектуальную поддержку исследований направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

При проектировании ПК «ИНТЭК-SAW» учитывались ограничения ранее применявшихся инструментальных средств и требования к проведению современных вычислительных экспериментов. К числу основных проектных требований отнесены: web-ориентированная реализация пользовательского

интерфейса; поддержка задания пользовательских показателей и ограничений; возможность настройки ресурсов, технологий, переменных и ограничений экономико-математической модели; связь расчетной модели с онтологическими и когнитивными представлениями; интерпретация результатов расчета в терминах факторов, угроз, показателей и параметров модели. Реализация указанных требований направлена на снижение трудоемкости формирования расчетных сценариев и анализа результатов по сравнению с комбинаторным формированием большого числа расчетных вариантов.

Для обоснования проектных решений был выполнен анализ процессов исследования направлений развития ТЭК. Анализ текущего состояния (AS-IS) позволил выделить основные функции, реализуемые в ходе исследования, определить состав используемых инструментальных средств, а также выявить ограничения существующей организации вычислительной и семантической частей исследования. На Рисунке 2.8 представлен контекстный блок, отражающий основную функцию анализа направлений развития топливно-энергетического комплекса.

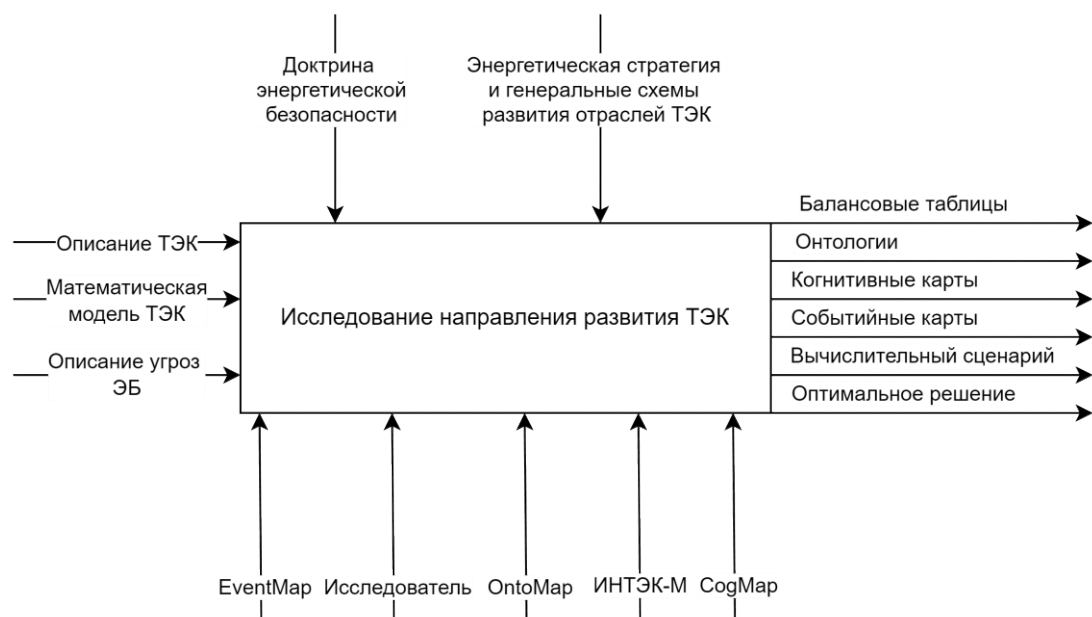


Рисунок 2.8 – Контекстная диаграмма исследования направления развития ТЭК в нотации IDEF0 (AS-IS)

На первом уровне декомпозиции процесса исследования направлений развития ТЭК выделяются два основных бизнес-процесса: семантическое моделирование и проведение вычислительного эксперимента. Исследования направлений развития ТЭК в существующей практике выполняются с использованием двухуровневой технологии, объединяющей инструментальные средства семантического и математического моделирования и обеспечивающей получение качественных и количественных оценок состояния и развития системы. Семантическое моделирование ориентировано на построение онтологий, когнитивных и событийных карт, на основе которых исследователь формирует вычислительный сценарий. Проведение вычислительного эксперимента заключается в расчёте этапов сценария с помощью ПК «ИНТЭК», результатом чего являются балансовые оценки по топливно-энергетическим ресурсам и индикаторы энергетической безопасности, включая, например, оценки дефицита ТЭР. Основные этапы исследования направлений развития ТЭК представлены на Рисунке 2.9.

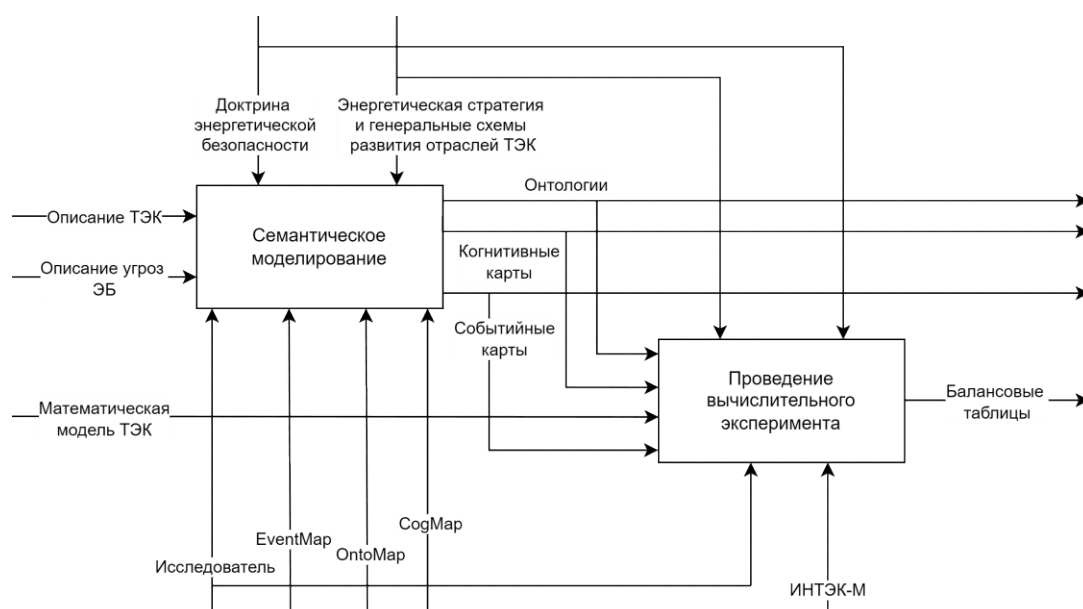


Рисунок 2.9 – Декомпозиция первого уровня исследования направления развития ТЭК в нотации IDEF0 (AS-IS)

На втором уровне декомпозиции процесса семантического моделирования выделяются ключевые этапы качественного анализа. Сначала осуществляется построение онтологий, необходимых для систематизации информации, используемой в исследовании. Затем, опираясь на эти онтологии, проводится анализ прецедентов чрезвычайных ситуаций в энергетике с целью выявления и детализации угроз энергетической безопасности. На основе полученных результатов выполняется когнитивное моделирование, в результате которого формируется когнитивная карта. Завершающий этап включает событийное моделирование развития угроз и их последствий. Итоги качественного анализа в дальнейшем используются для формирования вычислительных сценариев в программном комплексе «ИНТЭК-М», обеспечивая информационную поддержку принятия решений. Соответствующая декомпозиция представлена на Рисунке 2.10.

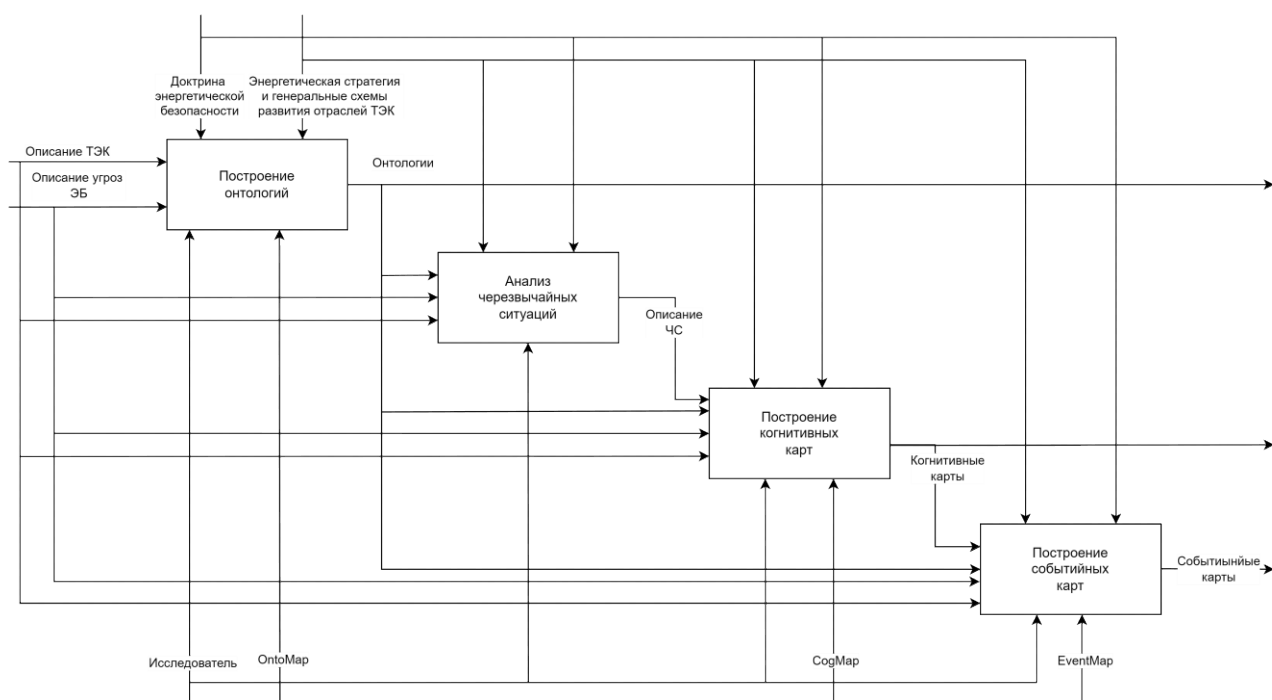


Рисунок 2.10 – Декомпозиция второго уровня бизнес-процесса семантического моделирования в нотации IDEF0 (AS-IS)

На втором уровне декомпозиции бизнес-процесса проведения вычислительного эксперимента выделяются три основных подпроцесса. На первом

подпроцессе исследователь формирует вычислительный сценарий на основе результатов качественного анализа. Такой сценарий включает различные варианты модели ТЭК: без реализации угроз и мероприятий, с реализацией угроз энергетической безопасности, с мероприятиями по недопущению или ликвидации последствий реализации угроз, а также их комбинированные сочетания. На втором подпроцессе осуществляется оптимизация сформированного сценария с использованием встроенного в ПК «ИНТЭК» решателя. На третьем подпроцессе по полученным оптимальным значениям формируются балансовые таблицы по топливно-энергетическим ресурсам для каждого района. Использование результатов бизнес-анализа исследования направлений развития ТЭК позволило сформулировать требования к новой версии программного комплекса «ИНТЭК». Декомпозиция данного бизнес-процесса представлена на Рисунке 2.11.

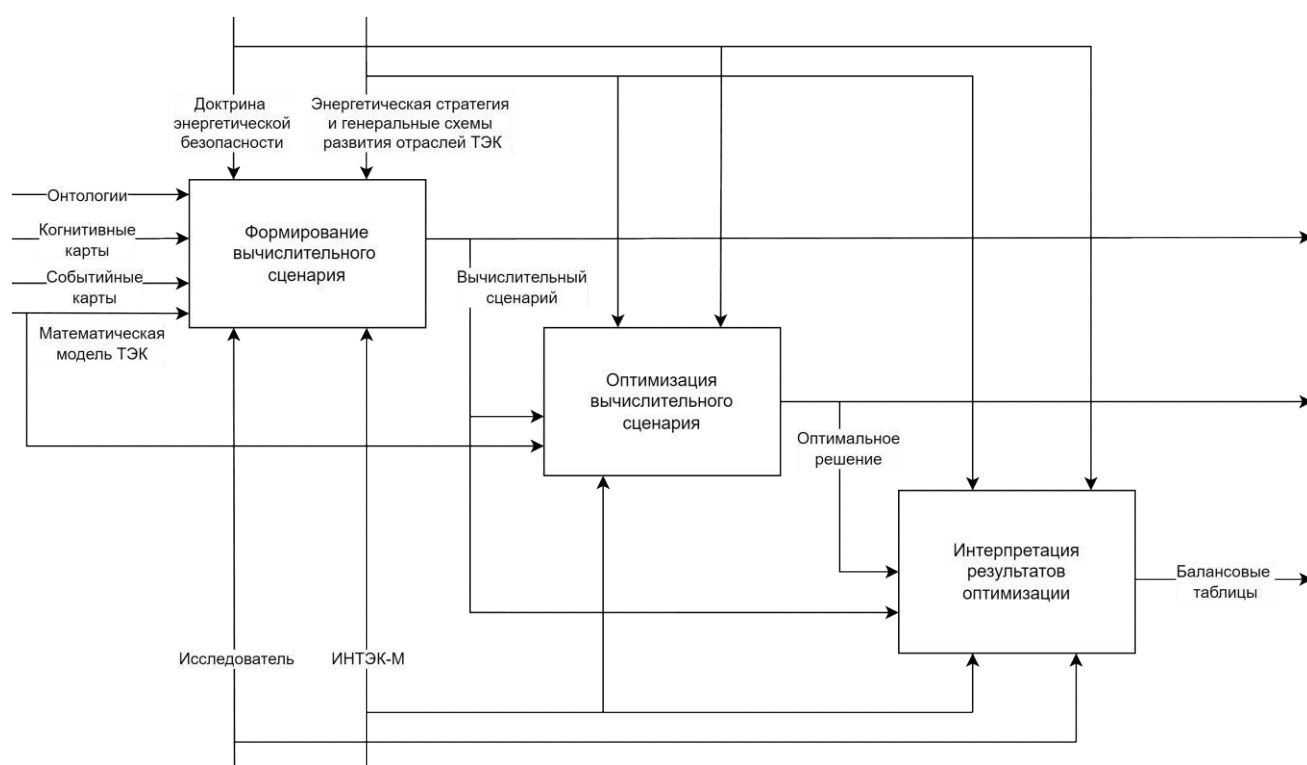


Рисунок 2.11 – Декомпозиция второго уровня бизнес-процесса проведения вычислительного эксперимента в нотации IDEF0 (AS-IS)

Построение функциональных моделей в нотации IDEF0 позволило уточнить состав основных этапов исследования направлений развития ТЭК, определить используемые информационные потоки, управляющие воздействия и инструментальные средства, а также выявить ограничения существующей организации вычислительных экспериментов. Полученные результаты послужили основой для формулирования требований к программному комплексу, ориентированному на интеграцию семантического и математического моделирования.

Программный комплекс «ИНТЭК-SAW» должен обеспечивать поддержку полного цикла исследований направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности, начиная с формирования семантического описания предметной области и построения вычислительных сценариев и заканчивая проведением оптимизационных расчетов и интерпретацией полученных результатов. С учетом назначения комплекса и особенностей решаемых задач были выделены функциональные, технологические, эксплуатационные, интерфейсные и предметно-ориентированные требования.

К функциональным требованиям относятся:

1. Обеспечение поддержки полного цикла исследований направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности, включая семантическое моделирование предметной области, формирование вычислительных сценариев, проведение вычислительных экспериментов и анализ полученных результатов.
2. Наличие встроенных средств семантического моделирования, позволяющих выполнять построение и редактирование онтологий предметной области ТЭК, а также формирование онтологических и когнитивных моделей без использования внешних программных продуктов.
3. Обеспечение автоматизированного перехода от семантических моделей к вычислительным сценариям экономико-математической модели ТЭК, что является необходимым условием согласования качественного и количественного уровней исследования.

4. Поддержка формирования сценариев развития ТЭК как на основе параметрического задания расчетных условий, так и на основе когнитивных карт, отражающих причинно-следственные связи между факторами исследуемой ситуации.

5. Возможность задания функциональных зависимостей между вершинами когнитивной карты и последующего использования этих зависимостей для корректировки параметров математической модели.

6. Проведение вычислительных экспериментов для сформированных сценариев, включая выполнение оптимизационных расчетов, управление процессом вычислений и контроль корректности получаемых расчетных результатов.

7. Формирование выходных данных вычислительного эксперимента, включающих расчетные балансы топливно-энергетических ресурсов по федеральным округам, значения переменных экономико-математической модели и показатели, используемые для оценки состояний ТЭК с позиции энергетической безопасности.

8. Представление результатов расчетов в табличной, графической и семантически интерпретируемой форме, в том числе в виде когнитивных карт с отображением количественных значений в вершинах и связях.

9. Обеспечение сквозной связности данных между семантическими моделями, вычислительными сценариями и результатами расчетов без необходимости ручного переноса информации.

10. Поддержка накопления и повторного использования ранее созданных элементов исследования, включая варианты моделей ТЭК, онтологии, когнитивные карты, сценарии и результаты вычислительных экспериментов.

11. Наличие средств выявления и визуализации причинно-следственных связей между изменениями параметров модели и результатами расчетов, а также средств содержательной интерпретации получаемых результатов.

К технологическим требованиям относятся:

1. Реализация комплекса в виде веб-ориентированного приложения, обеспечивающего доступ пользователей через браузер без установки специализированного программного обеспечения.

2. Построение комплекса на основе модульной и расширяемой архитектуры, позволяющей добавлять новые виды моделей, методы анализа и средства визуализации без переработки существующих компонентов.

3. Использование централизованного хранилища данных на основе реляционной базы данных, обеспечивающей целостность, согласованность и версию моделей, сценариев и результатов вычислительных экспериментов.

4. Разделение функций пользовательского интерфейса, прикладной логики, хранения данных и расчетного контура, необходимое для сопровождения и последующего развития программного комплекса.

5. Обеспечение возможности расширения расчетной схемы комплекса за счет подключения новых методов, алгоритмов и программных средств оптимизационного моделирования.

К эксплуатационным требованиям относятся:

1. Обеспечение достаточной производительности комплекса для интерактивной работы пользователя при формировании моделей, задании сценариев и анализе результатов расчетов.

2. Поддержка масштабируемости комплекса при увеличении числа пользователей, объема хранимых данных и количества выполняемых вычислительных экспериментов.

3. Обеспечение устойчивой работы системы при одновременном выполнении нескольких расчетных задач.

4. Поддержка многопользовательского режима работы с разграничением прав доступа к моделям, сценариям и результатам исследований.

5. Обеспечение надежного хранения и обработки данных, включая механизмы резервного копирования, восстановления и защиты от некорректных действий пользователя.

6. Обеспечение возможности централизованного развертывания, обновления и поэтапного расширения функциональности комплекса без нарушения его эксплуатации.

К требованиям к пользовательскому интерфейсу относятся:

1. Реализация визуально ориентированного интерфейса, обеспечивающего контекстную навигацию, автоматизацию типовых операций и поэтапное раскрытие сложности используемых моделей.
2. Наличие основной рабочей области и панелей управления, обеспечивающих удобную организацию работы пользователя с моделями, сценариями, когнитивными картами и результатами расчетов.
3. Поддержка интерактивного редактирования элементов моделей, включая работу с концептами, связями и группами элементов, а также средства масштабирования и панорамирования графического представления.
4. Сохранение состояния пользовательской среды при повторном входе, что необходимо для продолжения работы с ранее созданными моделями и сценариями.
5. Визуализация когнитивных карт с использованием цветовой кодировки, условных обозначений, числовых значений и средств динамического отображения влияний.
6. Представление результатов расчетов в виде интерактивных таблиц, диаграмм, графиков, картографических представлений и диаграмм энергетических потоков.
7. Наличие средств интерактивного управления элементами моделей, сценариями и расчетами, визуальной индикации вычислительного процесса, остановки расчетов, уведомления об ошибках, поиска, навигации и встроенной справочной поддержки.

К предметно-ориентированным требованиям относятся:

1. Поддержка визуализации энергетических потоков и формирования балансовых таблиц по основным видам топливно-энергетических ресурсов.
2. Обеспечение расчета и анализа значений показателей, используемых для оценки состояний ТЭК с позиции энергетической безопасности.

3. Поддержка семантического моделирования на основе онтологий и когнитивных карт в рамках единой инструментальной среды.
4. Обеспечение автоматизированного преобразования когнитивных карт в вычислительные сценарии экономико-математической модели ТЭК.
5. Поддержка сравнения альтернативных сценариев функционирования и развития ТЭК с формированием агрегированных показателей и их содержательной интерпретацией.
6. Обеспечение анализа и объяснения результатов оптимизационных расчетов с учетом причинно-следственных связей, заданных на этапе семантического моделирования.

Рассмотрим ТО-ВЕ-диаграммы процессов исследования направлений развития ТЭК, сформированные на основе выдвинутых требований к новой системе. Их построение позволяет формализовать целевую организацию исследовательских процессов с учетом интеграции семантического и математического моделирования в рамках единой инструментальной среды.

ТО-ВЕ-диаграммы отражают переход от единой технологии, реализуемой несколькими программными средствами, к единой инструментальной среде ПК «ИНТЭК-SAW». Это снижает трудоемкость передачи данных между этапами семантического и математического моделирования и повышает воспроизводимость вычислительных сценариев.

На нулевом уровне декомпозиции на Рисунке 2.12 представлен программный комплекс «ИНТЭК-SAW» как центральный инструмент исследования направлений развития ТЭК. В отличие от ранее использовавшегося набора разрозненных программных средств новая система объединяет в единой среде средства семантического и математического моделирования и тем самым заменяет программные комплексы OntoMap и CogMap на соответствующих этапах исследования. Результатом работы системы являются как традиционные балансовые таблицы, так и когнитивные карты, содержащие количественные значения в вершинах и отражающие результаты вычислительных экспериментов в семантическом представлении.

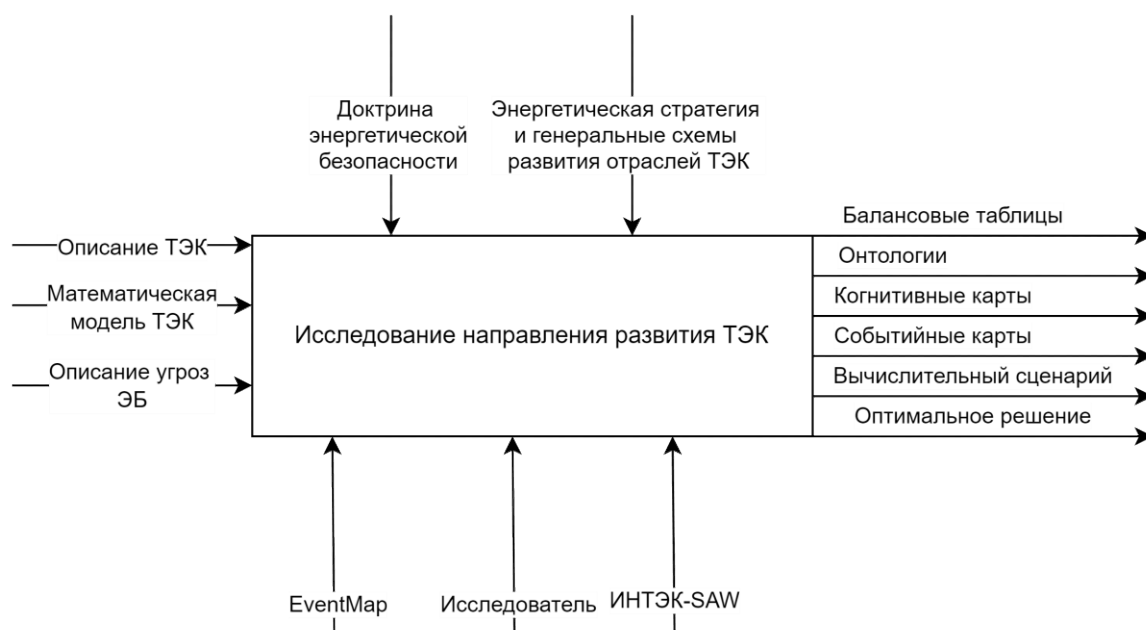


Рисунок 2.12 – Контекстная диаграмма исследования направлений развития ТЭК в нотации IDEF0 (TO-BE)

На первом уровне декомпозиции, представленном на Рисунке 2.13, отражено одно из ключевых отличий новой системы от существующей практики, заключающееся в автоматизации перехода от онтологий и когнитивных карт к формированию вычислительного сценария. В программном комплексе «ИНТЭК-SAW» формируются триплеты онтологий, описывающие отношения между факторами модели ТЭК, а также триплеты когнитивных карт, характеризующие влияние факторов угроз и мероприятий на элементы экономико-математической модели. При этом значением связи между вершинами триплетов когнитивной карты может выступать функциональная зависимость. Это позволяет использовать когнитивную карту не только как средство визуализации причинно-следственных связей, но и как интерфейс модификации параметров варианта модели ТЭК. В результате исследователь получает возможность задавать сценарий через семантическую модель, а после выполнения расчета интерпретировать результаты непосредственно на когнитивной карте. Полученные количественные оценки отображаются в вершинах карты и тем самым выступают альтернативной формой представления результатов наряду с балансовыми таблицами.

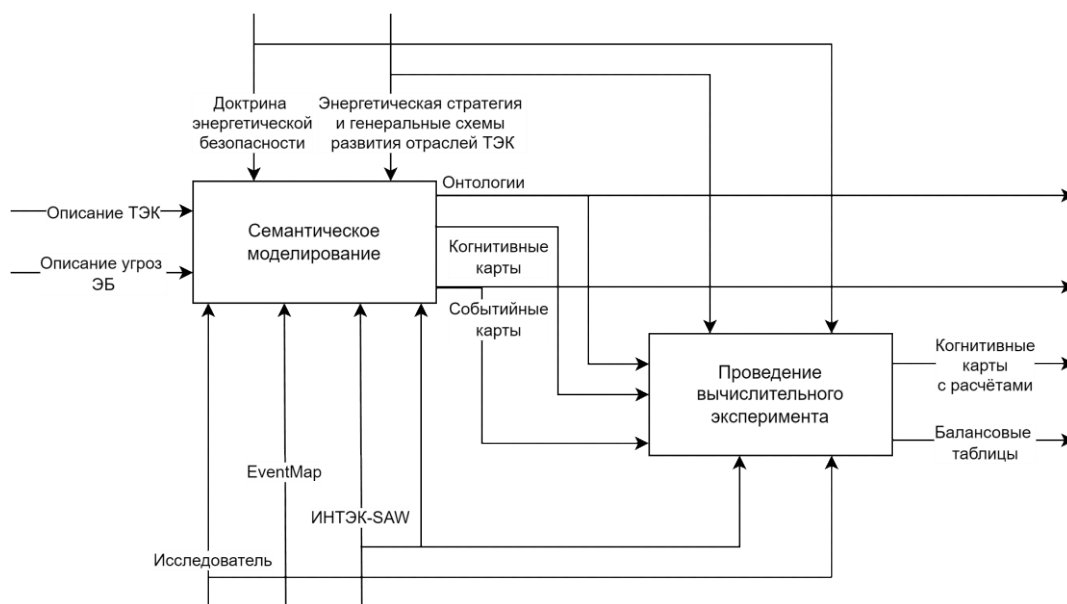


Рисунок 2.13 – Декомпозиция первого уровня исследования направлений развития ТЭК в нотации IDEF0 (TO-BE)

На втором уровне декомпозиции бизнес-процесса «Семантическое моделирование» на Рисунке 2.14 показано, что программный комплекс «ИНТЭК-SAW» принимает на себя функции, ранее реализуемые специализированными средствами OntoMap и CogMap. При этом сохраняется ранее сформированная логика семантического моделирования, включающая построение онтологий, анализ чрезвычайных ситуаций, формирование когнитивных карт и описание событийных процессов. Изменяется не содержание этапов, а способ их реализации, поскольку основные операции переносятся в единую программную среду ПК «ИНТЭК-SAW». Это относится прежде всего к процессам построения онтологий и когнитивных карт. Таким образом, в новой системе семантическое моделирование выполняется в рамках единой программной среды, что обеспечивает согласованность данных, исключает необходимость ручного переноса информации между различными приложениями и создает основу для последующей автоматизации формирования вычислительных сценариев.

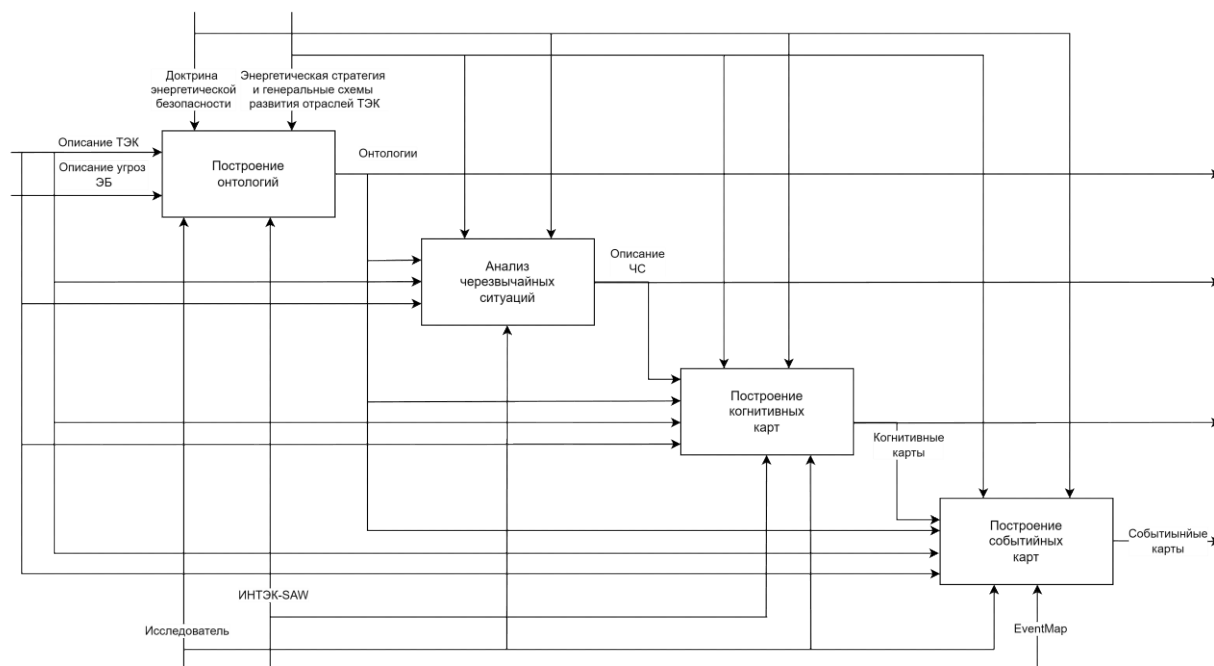


Рисунок 2.14 – Декомпозиция второго уровня бизнес-процесса семантического моделирования в нотации IDEF0 (TO-BE)

На втором уровне декомпозиции бизнес-процесса «Проведение вычислительного эксперимента», представленном на Рисунке 2.15, программный комплекс «ИНТЭК-SAW» рассматривается как средство формирования вычислительного сценария с использованием интерфейса в виде когнитивной карты. В рамках такого подхода когнитивная карта выполняет двойную функцию. С одной стороны, она используется для задания сценарных воздействий на модель. С другой стороны, она служит средством интерпретации результатов оптимизации. Это означает, что переход от качественного описания факторов угроз и мероприятий к количественным оценкам состояния ТЭК осуществляется в пределах одной и той же инструментальной среды. Формирование вычислительного сценария при этом опирается на результаты семантического моделирования и параметры экономико-математической модели ТЭК. Последующая интерпретация оптимального решения возвращает результаты расчета в семантические модели, что обеспечивает их сопоставление с исходными угрозами и мероприятиями.

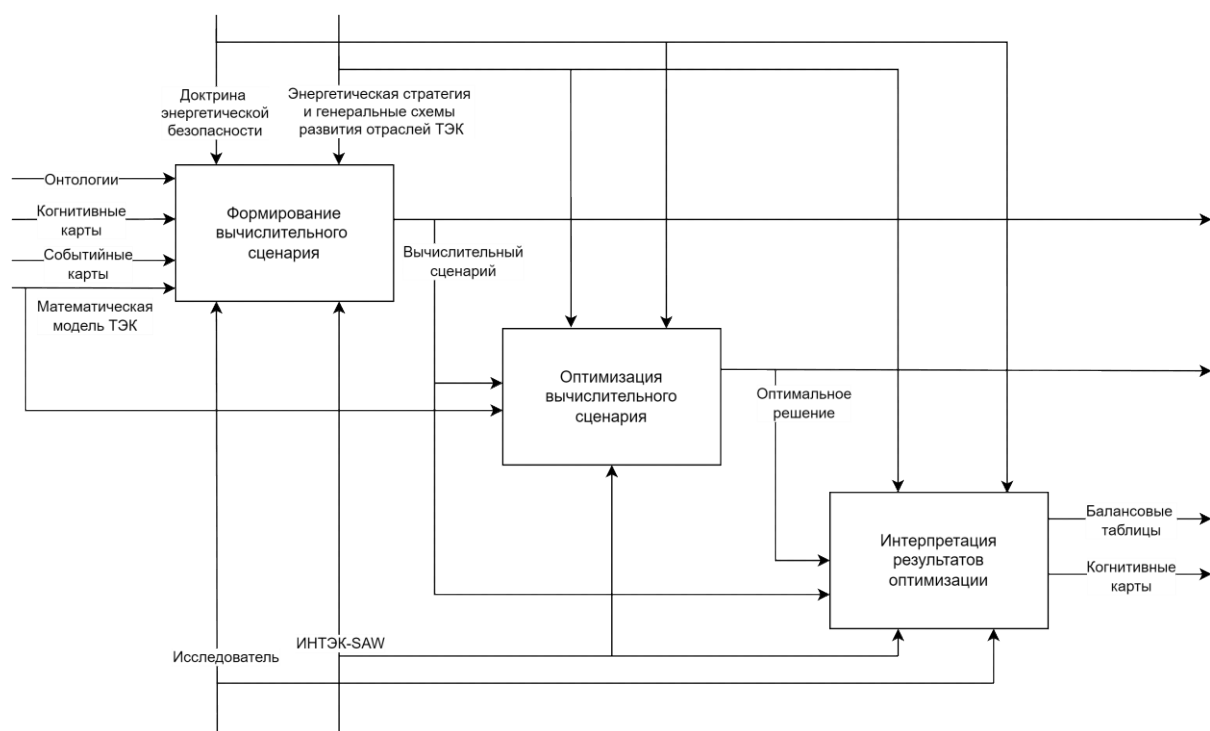


Рисунок 2.15 – Декомпозиция второго уровня бизнес-процесса проведения вычислительного эксперимента в нотации IDEF0 (TO-BE)

Таким образом, построенные контекстная диаграмма и диаграммы декомпозиции TO-BE в нотации IDEF0 формализуют целевую структуру процессов исследования направлений развития ТЭК и отражают функциональную роль программного комплекса «ИНТЭК-SAW» в обеспечении семантического и математического моделирования, формировании вычислительных сценариев и интерпретации результатов. Вместе с тем IDEF0-диаграммы позволяют описать состав и взаимосвязь основных функций системы, но не ориентированы на представление взаимодействия пользователей с программным комплексом и не отражают сценарии использования функциональных возможностей системы с точки зрения конечного пользователя.

В то же время для обоснования архитектурных решений и реализации программного комплекса необходимо формализовать пользовательские сценарии работы с системой, а также определить состав и границы функциональности, доступной различным категориям пользователей. С этой целью дальнейшее

описание программного комплекса «ИНТЭК-SAW» выполнено с использованием диаграммы вариантов использования, представленной на Рисунке 2.16, что позволяет рассмотреть систему с точки зрения реализуемых функций и взаимодействия с пользователями.

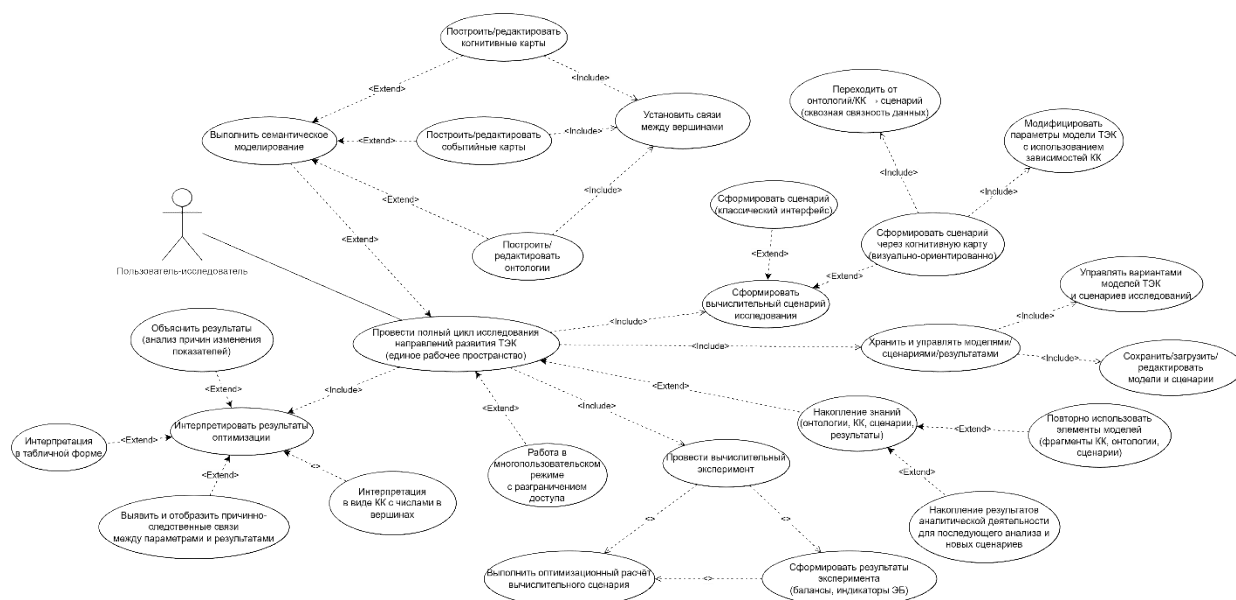


Рисунок 2.16 – Диаграмма вариантов использования ПК «ИНТЭК-SAW»

Диаграмма вариантов использования формируется на основе разработанных требований к системе и построенных ТО-ВЕ-моделей бизнес-процессов и отражает основные действия пользователя при выполнении семантического моделирования, формировании вычислительных сценариев, проведении вычислительных экспериментов и анализе результатов. Переход от IDEF0-моделей к диаграмме вариантов использования осуществляется путем декомпозиции функциональных блоков ТО-ВЕ-диаграмм в набор логически завершенных пользовательских действий, соответствующих отдельным вариантам использования системы. При этом каждый вариант использования отражает реализацию одной или нескольких функций, описанных в IDEF0-моделях, и обеспечивает выполнение конкретного этапа исследования направлений развития ТЭК.

В результате диаграмма Use Case дополняет IDEF0-описание, обеспечивает формализацию пользовательских сценариев работы с программным комплексом

«ИНТЭК-SAW» и создает основу для дальнейшего проектирования интерфейса и программной архитектуры системы.

Основным актором системы выступает эксперт-исследователь, осуществляющий формирование семантических моделей, задание вычислительного сценария, проведение вычислительного эксперимента и интерпретацию его результатов. Именно эксперт определяет состав рассматриваемых угроз и мероприятий, задаёт параметры сценариев и выполняет анализ полученных оценок состояния ТЭК с позиции энергетической безопасности.

К числу ключевых вариантов использования системы относится формирование концептуальной модели ТЭК. Данный вариант использования включает работу с онтологиями предметной области, предназначенными для описания структуры объектов энергетики, видов топливно-энергетических ресурсов, технологий, территориальных связей и их взаимосвязей. Формирование онтологического описания позволяет упорядочить понятийный аппарат исследования, выделить основные сущности предметной области и обеспечить переход к построению семантических моделей, используемых в дальнейшем при формировании вычислительного сценария.

Следующий вариант использования связан с когнитивным анализом исследования развития ТЭК. Он обеспечивает построение когнитивных карт, отражающих причинно-следственные связи между факторами развития ТЭК, угрозами энергетической безопасности и мероприятиями по их нейтрализации. В рамках данного варианта использования эксперт задаёт направления влияния между концептами, определяет характер воздействий и формирует семантическую основу сценарного анализа. Тем самым когнитивная карта используется как средство качественного описания исследуемой ситуации и как интерфейс перехода к вычислительному сценарию.

К важнейшим вариантам использования относится формирование вычислительного сценария. На данном этапе эксперт задаёт состав угроз и мероприятий, определяет их исходные значения и устанавливает параметры, подлежащие изменению в рамках сценария. Формирование сценария

осуществляется на основе связей между семантическими моделями и элементами математической модели и обеспечивает переход от качественного описания факторов к количественному исследованию их влияния на состояние ТЭК.

Отдельный вариант использования связан с проведением вычислительного эксперимента. Он включает запуск расчётов по сформированному сценарию, выполнение оптимизационных процедур и получение количественных оценок для базового, возмущённого, управляющего и комбинированного вариантов развития ТЭК. В рамках этого варианта использования система обеспечивает автоматизированную обработку данных сценария и формирование результатов расчёта для соответствующих вариантов модели.

Завершающим вариантом использования является анализ и интерпретация результатов. Он включает представление результатов вычислительного эксперимента в виде балансовых таблиц, значений параметров модели и их отображение в когнитивной карте. На этом этапе эксперт сопоставляет полученные количественные оценки с семантическим описанием сценария, анализирует влияние угроз и мероприятий на состояние ТЭК и оценивает результаты исследования с позиции энергетической безопасности.

Для логического завершения описания функциональной структуры системы необходимо перейти к рассмотрению динамического аспекта реализации представленных вариантов использования. Если диаграмма Use Case определяет состав функций системы и границы взаимодействия пользователя с ними, то диаграмма деятельности позволяет отразить последовательность выполнения операций в рамках вычислительного эксперимента и тем самым описать технологическую логику работы системы.

Представленная диаграмма на Рисунке 2.17 деятельности иллюстрирует алгоритм функционирования программного модуля, обеспечивающего работу с когнитивными картами и сценариями исследования. Процесс начинается с проверки соединения с базой данных. При отсутствии соединения выполнение завершается с выдачей соответствующего уведомления. В случае успешного подключения система осуществляет последовательную загрузку сценариев и

моделей, после чего пользователь получает возможность выбрать необходимый вариант для исследования. Далее выполняются операции, связанные с формированием или редактированием когнитивной карты, выбором параметров сценария, запуском расчёта и последующей интерпретацией результатов.

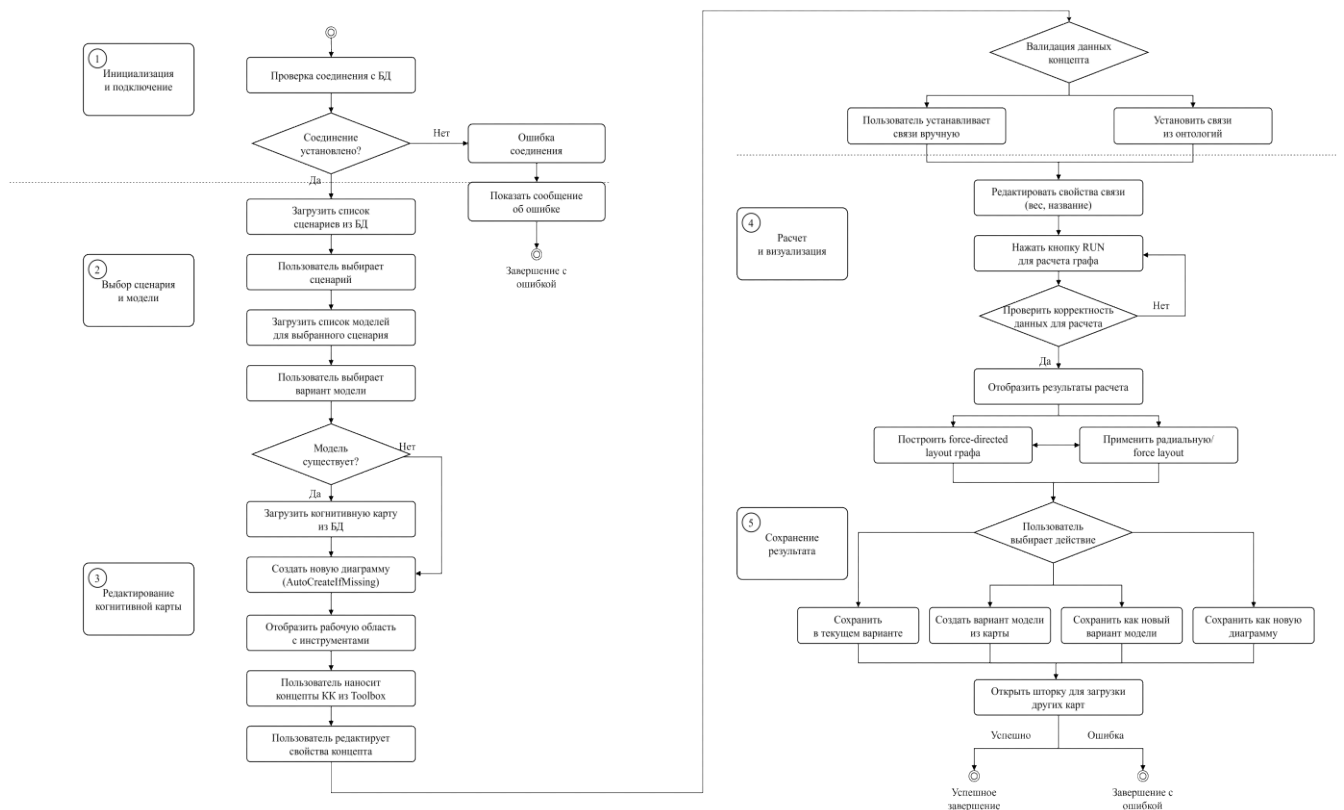


Рисунок 2.17 – Диаграмма деятельности реализации вычислительного эксперимента с использованием когнитивной карты

Этап формирования модели включает размещение концептов на рабочем поле с использованием инструментальной панели, редактирование их атрибутов и обязательную проверку корректности введённых данных. Установление связей между концептами может выполняться как посредством непосредственного пользовательского ввода, так и в автоматизированном режиме с использованием интеллектуального поиска, основанного на онтологическом описании предметной области. После задания наименований связей и определения их весовых коэффициентов инициируется процедура расчёта графа. При подтверждении корректности исходных данных система выполняет визуализацию структуры с

применением алгоритмов размещения узлов, в том числе силового и радиального. На заключительном этапе пользователю предоставляется возможность выбора способа сохранения результатов, включая обновление текущего варианта модели, создание новой модификации или сохранение в виде самостоятельной диаграммы. Завершение данного цикла обеспечивает переход либо к работе с альтернативными картами, либо к штатному завершению сеанса.

Представленная диаграмма деятельности отражает последовательность пользовательских и системных операций при формировании когнитивной карты и выполнении связанных с ней процедур расчёта и сохранения. Однако для проектирования программного комплекса необходимо не только описать динамику функционирования системы, но и формализовать структуру данных, обеспечивающих реализацию соответствующих процессов. С этой целью далее рассматриваются логические модели данных, описывающие основные сущности и связи, используемые в программном комплексе «ИНТЭК-SAW» для поддержки математического и семантического моделирования.

2.5. Выводы по главе

Во второй главе разработаны методические положения интеграции семантического и математического моделирования в прогнозных исследованиях ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Разработана фрактальная стратифицированная модель вычислительного эксперимента в прогнозных исследованиях ТЭК. В ней предметная область, энергетическая инфраструктура, угрозы ЭБ, мероприятия, вычислительные сценарии, состояния ТЭК и индикаторы энергетической безопасности представлены как взаимосвязанные слои. Отображения между слоями задают переход от качественного анализа угроз и мероприятий к количественной оценке состояний энергетической системы.

Выполнено расширение экономико-математической модели территориально-отраслевого баланса ТЭК за счет экономических, экологических и квазидинамических уравнений. Это позволяет учитывать инвестиционные, бюджетные, экологические и межпериодные ограничения при исследовании направлений развития ТЭК.

Предложена методика интеграции онтологических, когнитивных и экономико-математических моделей. Методика включает формирование БД для интеграции моделей, построение онтологической модели экономико-математической модели ТЭК, разработку когнитивной модели исследуемой ситуации и формирование вычислительного сценария. Методика определяет формализованный переход от экспертных знаний о факторах, угрозах и мероприятиях к параметрам расчетной модели.

Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло и когнитивных весов. Метод предназначен для учета неопределенности экспертных оценок и формирования множества сценарных состояний ТЭК.

Обоснована необходимость реинжиниринга ПК «ИНТЭК-М». Сформулированы проектные решения по созданию ПК «ИНТЭК-SAW», предназначенного для поддержки семантического моделирования, формирования вычислительных сценариев, проведения вычислительных экспериментов и анализа результатов. Результаты выполненного реинжиниринга рассмотрены в следующей главе.

ГЛАВА 3. Реализация ПК «ИНТЭК-SAW» и его применение в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности

В третьей главе рассматриваются вопросы программной реализации разработанных в диссертации методов, моделей и инструментальных средств для интеллектуальной поддержки прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Представлена программная реализация предложенного подхода к интеграции семантического и математического моделирования в виде программного комплекса «ИНТЭК-SAW». Рассматриваются архитектура, структура и основные принципы построения комплекса, а также особенности реализации его функциональных компонентов, обеспечивающих построение моделей, формирование вычислительных сценариев, выполнение расчетов и представление результатов исследования.

Особое внимание уделено реализации технологии поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения ЭБ, основанной на совместном использовании онтологического, когнитивного и экономико-математического моделирования. Показано, каким образом в рамках программного комплекса обеспечивается переход от семантического моделирования исследуемой ситуации к формированию вычислительного сценария и количественной оценке последствий рассматриваемых воздействий. В заключительной части главы представлены результаты апробации разработанного методического и программного обеспечения на примерах вычислительных экспериментов, что позволяет оценить работоспособность предложенных решений и практическую значимость комплекса «ИНТЭК-SAW» для исследований направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

3.1. Архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW»

В рамках реализации предложенного в работе подхода к интеграции семантического и математического моделирования разработана архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW», ориентированная на поддержку прогнозных исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Архитектурные решения комплекса направлены на обеспечение согласованного функционирования инструментальных средств построения вычислительных сценариев, проведения оптимизационных расчётов и интерпретации полученных результатов. В данном пункте рассматриваются структура данных программного комплекса, логические модели, отражающие взаимосвязь семантического и математического контуров исследования, а также архитектура функциональных компонентов системы и её соответствие фрактальной стратифицированной модели организации прогнозных исследований.

Архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW», представленная на Рисунке 3.1, реализована на основе агентно-сервисного подхода и ориентирована на поддержку прогнозных исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности. Архитектурная организация комплекса обеспечивает согласованное взаимодействие пользовательского уровня, сервисов управления запросами, агентов семантического и математического моделирования, расчётных средств и средств представления результатов. Такое построение отражает необходимость интеграции семантического и математического моделирования в рамках единой программной среды. В архитектуре комплекса семантический слой обеспечивает формирование онтологий, когнитивных карт и сценарных описаний, используемых при подготовке расчётных условий. Оптимизационный слой выполняет преобразование этих условий в параметры экономико-математической модели, поиск оптимального решения и передачу результатов в средства интерпретации.

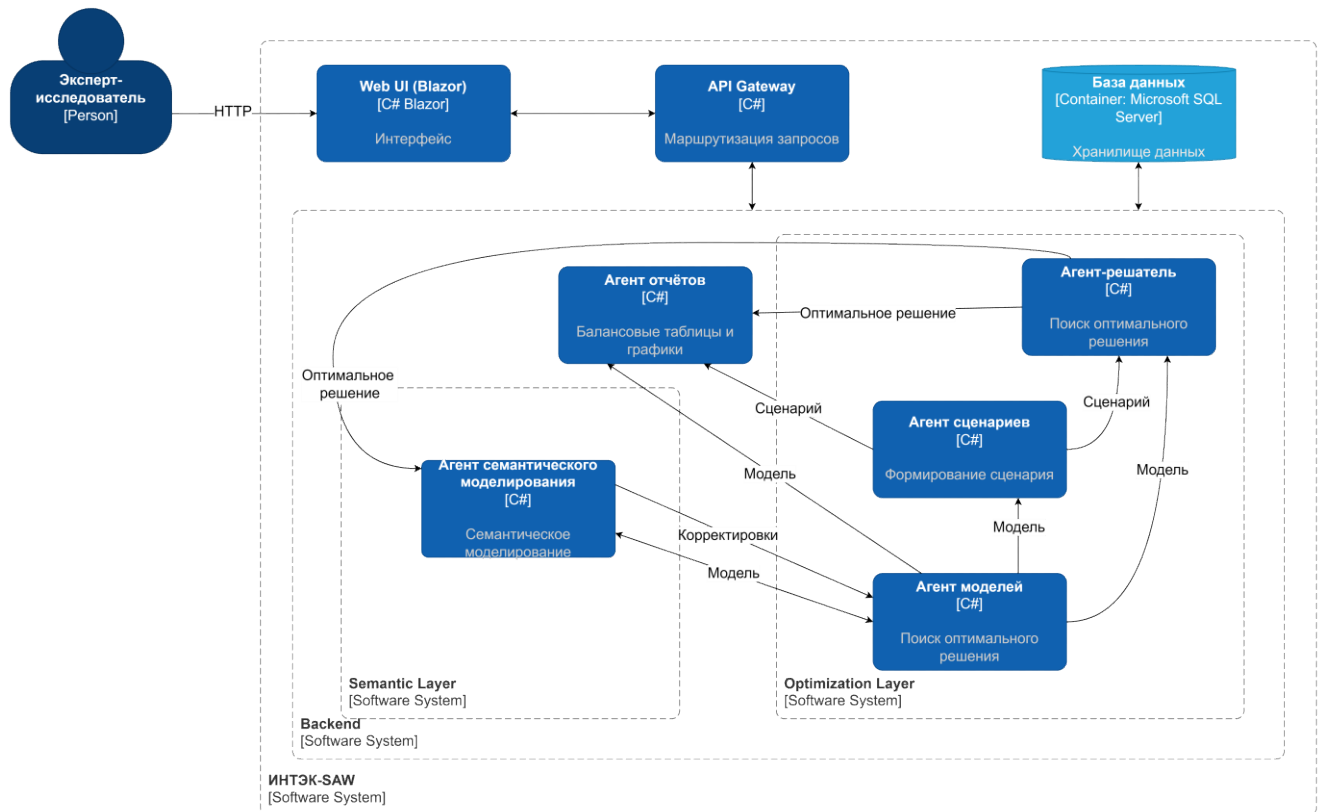


Рисунок 3.1 – Архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW»

На верхнем уровне архитектуры располагаются пользователь, Web UI, реализованный на платформе Blazor, API Gateway и база данных. Пользовательский интерфейс обеспечивает взаимодействие исследователя с системой при построении моделей, формировании сценариев и анализе результатов. API Gateway выполняет функции маршрутизации запросов и обеспечивает взаимодействие между пользовательским интерфейсом и внутренними компонентами комплекса. Хранение моделей, сценариев, семантических структур и результатов вычислительных экспериментов осуществляется в централизованной базе данных [108]. Тем самым обеспечиваются целостность, согласованность и воспроизводимость проводимых исследований.

Внутренняя часть программного комплекса включает два взаимосвязанных слоя: слой семантического моделирования и слой оптимизационного моделирования. Такое разделение соответствует логике предлагаемого подхода, в рамках которого качественное описание исследуемой системы используется как основа для построения и расчёта формализованных математических моделей.

Слой семантического моделирования реализован агентом семантического моделирования, структура которого представлена на Рисунке 3.2. Агент включает два взаимосвязанных сервиса: сервис онтологического моделирования и сервис когнитивного моделирования. Сервис онтологического моделирования предназначен для структурирования знаний о предметной области и формирования онтологического описания ТЭК. Сервис когнитивного моделирования обеспечивает построение причинно-следственных схем, отражающих влияние факторов, угроз и управляющих воздействий на развитие ТЭК. Результатом функционирования агента семантического моделирования являются формализованные представления знаний, используемые далее при формировании вычислительных сценариев и корректировке параметров математической модели.

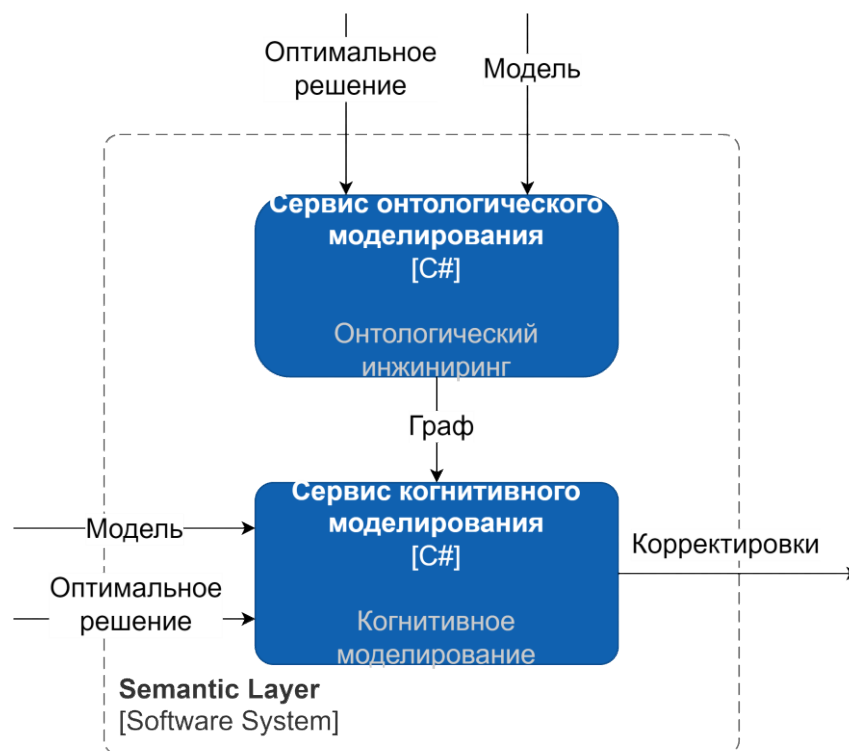


Рисунок 3.2 – Архитектура агента семантического моделирования в комплексе «ИНТЭК-SAW»

Слой оптимизационного моделирования включает агент сценариев, агент моделей и агент-решатель. Агент сценариев предназначен для формирования

вычислительного сценария исследования на основе семантических описаний, исходных предпосылок и корректировок параметров. Он обеспечивает связывание результатов семантического моделирования с вариантами математической модели и задаёт структуру дальнейшего вычислительного эксперимента. Агент моделей реализует процедуры формирования и преобразования математического представления исследуемого варианта ТЭК, включая задание переменных, ограничений, уравнений и параметров модели. Тем самым обеспечивается переход от качественного описания исследуемой ситуации к её количественной постановке. Агент-решатель предназначен для проведения оптимизационных расчётов и нахождения допустимых и оптимальных состояний системы в рамках заданного сценария.

Завершающим компонентом архитектуры является агент отчётов, обеспечивающий представление результатов вычислительного эксперимента в аналитической форме. Данный агент формирует балансовые таблицы, графические и иные формы визуализации результатов, позволяющие интерпретировать полученные расчётные данные с точки зрения целей исследования. Тем самым он завершает вычислительный цикл и обеспечивает информационную поддержку анализа вариантов развития ТЭК.

Следует отметить, что взаимодействие между слоями архитектуры организовано через передачу моделей, сценариев, корректировок и результатов оптимизационных расчётов. Это позволяет реализовать последовательный переход от онтологического и когнитивного описания предметной области к построению вычислительного сценария, решению оптимизационной задачи и интерпретации результатов. Такая организация архитектуры обеспечивает методическую согласованность этапов исследования и соответствует задаче интеграции семантического и математического моделирования.

Таким образом, архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW» обеспечивает реализацию единой инструментальной среды для проведения прогнозных исследований направлений развития топливно-энергетического комплекса. Выделение пользовательского уровня, слоя семантического

моделирования, слоя оптимизационного моделирования и средств аналитического представления результатов обеспечивает модульность комплекса, разграничение функций между основными этапами исследования и возможность дальнейшего развития его функциональных средств.

В качестве расчетного ядра программного комплекса «ИНТЭК-SAW» используется Google OR-Tools Linear Solver. Выбор данного инструмента обусловлен тем, что комплекс разрабатывается на языке C#, а OR-Tools предоставляет .NET-интерфейс для задания переменных, ограничений, целевой функции и получения результатов решения оптимизационной задачи.

В качестве решателя в составе OR-Tools используется SCIP. Выбор SCIP обусловлен тем, что он поддерживает не только линейные, но и смешанные целочисленные постановки, что важно для последующего развития модели. В отличие от GLOP, ориентированного преимущественно на задачи линейного программирования, SCIP позволяет сохранять возможность введения дискретных условий, связанных с выбором мероприятий, фиксацией сценарных решений и учетом логических ограничений. Для ПК «ИНТЭК-SAW» это существенно, поскольку Модель решается как линейная задача территориально-отраслевого баланса ТЭК, однако архитектура комплекса должна допускать расширение расчетной схемы без замены оптимизационного ядра.

3.2. Реализация программного комплекса «ИНТЭК-SAW»

С технологической точки зрения программный комплекс «ИНТЭК-SAW» реализован как web-ориентированное клиент-серверное приложение на языке C#. Клиентская часть построена на платформе Blazor и обеспечивает работу исследователя через браузер, включая формирование моделей, сценариев и графических представлений. Серверная часть реализована в виде ASP.NET Core Web API и предназначена для обработки запросов, выполнения прикладной логики и взаимодействия с хранилищем данных. Обмен между клиентом и сервером

организован по HTTP/JSON, что обеспечивает разделение пользовательского интерфейса и вычислительного контура программного комплекса. Хранение моделей, сценариев, семантических структур и результатов вычислительных экспериментов осуществляется в централизованной базе данных.

Математическая оптимизация в составе комплекса реализована на основе библиотеки Google OR-Tools, интегрированной в .NET-среду. На её основе выполняется программное формирование переменных, ограничений и коэффициентных связей математической модели по данным, извлекаемым из реляционной структуры хранения. Для решения задач линейного и смешанного целочисленного программирования в архитектуре комплекса предусмотрено использование решателей, подключаемых через интерфейс OR-Tools Linear Solver, включая SCIP. Тем самым технологическая реализация комплекса объединяет язык C#, платформы Blazor и ASP.NET Core, реляционную SQL-базу данных и средства математической оптимизации в рамках единой инструментальной среды.

Архитектура агента семантического моделирования, представленная на Рисунке 3.3, построена по слоистому принципу и опирается на применение паттернов CQRS и Mediator. Такое построение обеспечивает разделение функций представления, прикладной логики и доступа к данным, снижает связанность компонентов и создает основу для расширения и сопровождения системы.

Внутренняя организация программного комплекса может быть рассмотрена на примере агента семантического моделирования. Клиентское приложение взаимодействует с API через контроллер, который передает запросы в прикладной слой с использованием MediatR. Прикладной слой включает специализированные обработчики, обеспечивающие создание и сохранение версий графа, получение актуального состояния диаграммы, поиск, восстановление и сохранение снимков графовых структур.

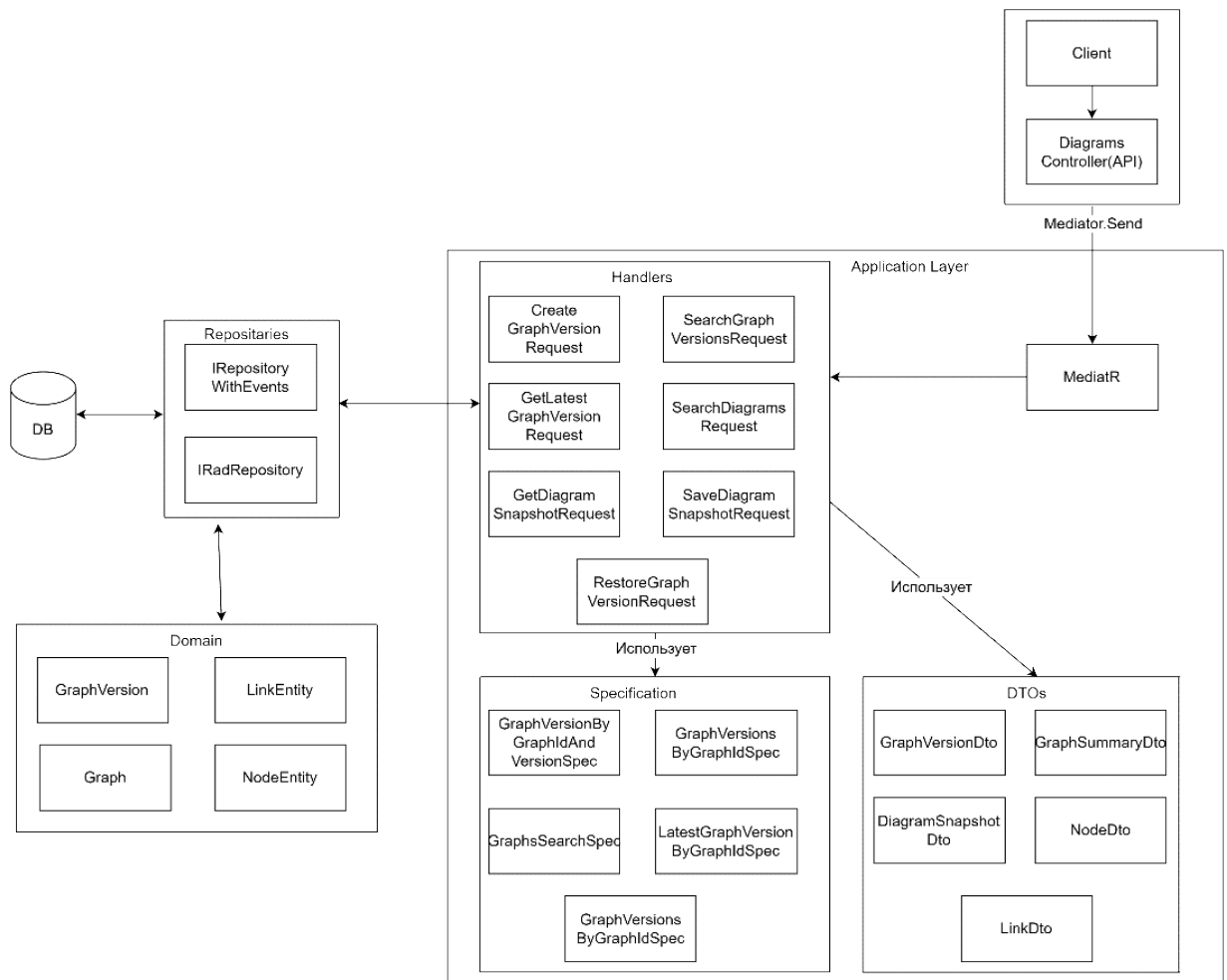


Рисунок 3.3 – Слоистая архитектура агента семантического моделирования на основе CQRS и MediatR

Для обмена данными между слоями используются объекты передачи данных, что обеспечивает унификацию интерфейсов и уменьшает связанность компонентов. Логика выборки и фильтрации инкапсулируется в спецификациях, задающих формализованные условия доступа к данным. Доменный уровень представлен сущностями графа, его версий, узлов и связей, тогда как взаимодействие с хранилищем данных реализуется через репозитории, скрывающие детали работы с базой данных. В результате формируется типовой контур обработки запроса: обращение клиента к API, маршрутизация запроса через MediatR, выполнение прикладной логики в обработчике, обращение к репозиторию и спецификациям, преобразование результата в DTO и возврат ответа клиенту.

Такое архитектурное решение обеспечивает модульность, расширяемость и технологическую устойчивость программного комплекса.

В процессе реализации программного комплекса «ИНТЭК-SAW» была разработана модель данных, обеспечивающая согласованное использование семантического и математического уровней моделирования [108] и ориентированная на хранение и обработку информации, используемой при формировании вычислительных сценариев, построении математических моделей и визуализации результатов исследования. Реализованная модель данных обеспечивает технологическую связанность этапов прогнозного исследования направлений развития топливно-энергетического комплекса и служит основой функционирования интегрированной инструментальной среды.

Фрагмент модели данных, относящийся к блоку оптимизационного моделирования, представлен на Рисунке 3.4. Данный фрагмент ориентирован на поддержку математического моделирования и сценарного анализа. Центральное место в нем занимают сущности сценария и модели, а также связывающие их таблицы, обеспечивающие включение нескольких моделей в состав одного сценария и возможность повторного использования моделей в различных вычислительных экспериментах. В реализованной структуре базы данных представлены сущности, предназначенные для хранения уравнений, переменных, коэффициентов и параметров ограничений. Такое построение схемы обеспечивает разделение описания математической модели как формализованной расчетной конструкции и ее использования в составе конкретного сценария, что создает основу для выполнения многовариантных расчетов. Связующая таблица сценариев и моделей позволяет включать в один вычислительный эксперимент несколько расчетных моделей и задавать порядок их выполнения. Это необходимо для представления сложных сценариев, в которых отдельные модели отражают разные этапы или аспекты анализа состояния ТЭК. Хранение уравнений, переменных и коэффициентов в отдельных сущностях обеспечивает возможность программного формирования оптимизационной задачи без изменения структуры приложения. За

счет этого одна и та же математическая модель может использоваться в различных сценариях с разными исходными условиями и ограничениями.

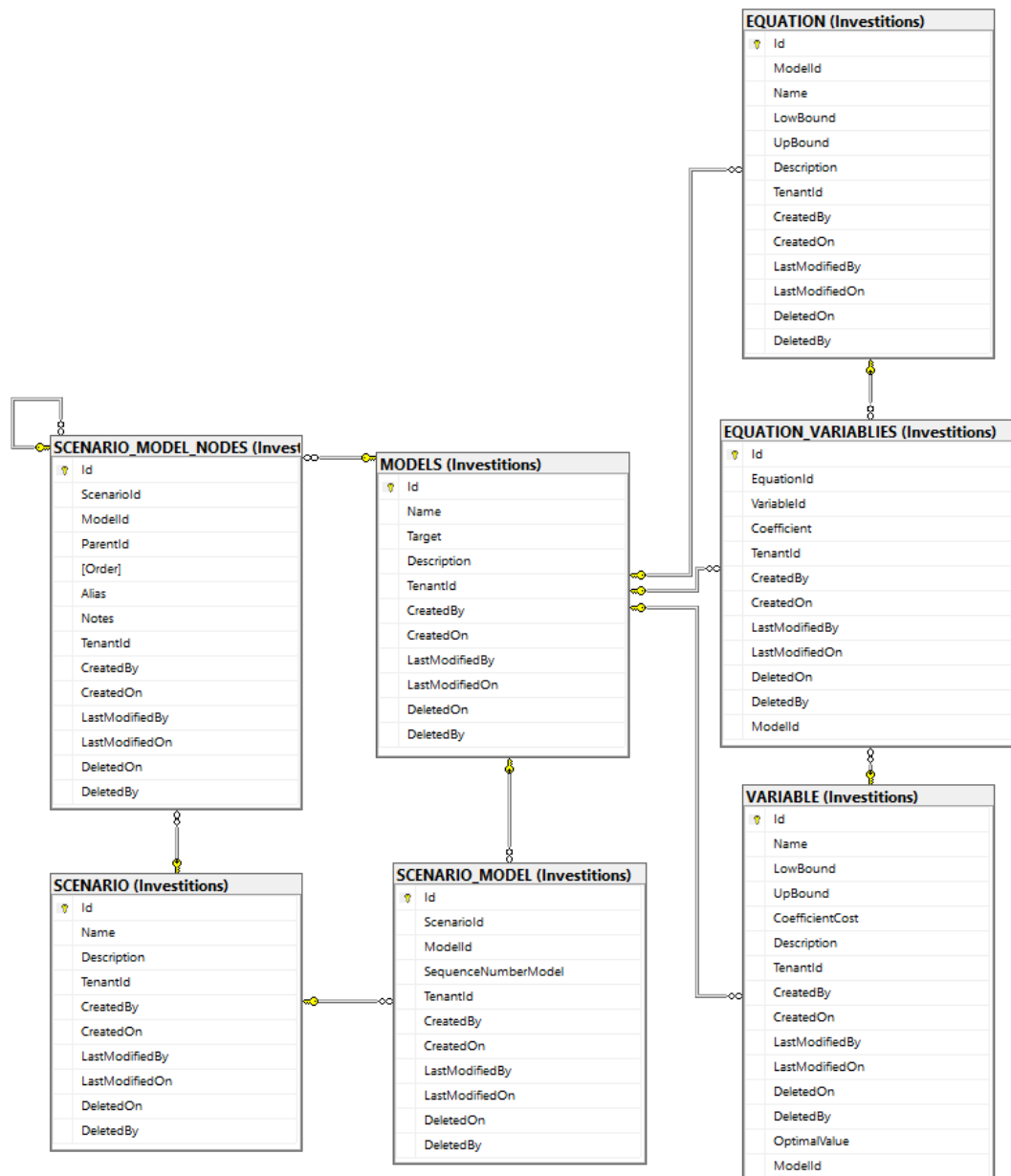


Рисунок 3.4 – Фрагмент модели данных блока оптимизационного моделирования

Фрагмент модели данных, относящийся к блоку семантического моделирования, представлен на Рисунке 3.5. Он предназначен для хранения данных графического и семантического уровней и обеспечивает функционирование подсистемы управления диаграммами. В отличие от предыдущего фрагмента, ориентированного на математическое описание, данная часть схемы предназначена

для хранения топологии графа, параметров узлов, связей между ними и характеристик визуального представления. Существенным элементом реализации является механизм версионирования, основанный на сохранении снимков состояния диаграммы в формате JSON. Это обеспечивает фиксацию изменений, восстановление предыдущих состояний и анализ истории модификации графических моделей. Связь между семантическим и математическим уровнями в программном комплексе обеспечивается на уровне метаданных и идентификаторов объектов, за счет чего графические элементы могут быть сопоставлены с сущностями сценария, переменными, ограничениями и другими компонентами математической модели.

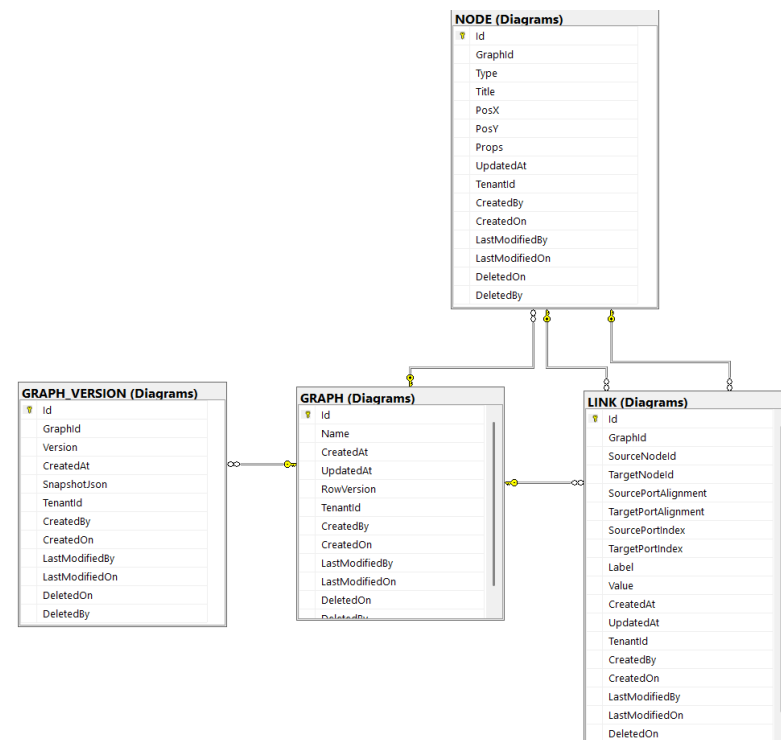


Рисунок 3.5 – Фрагмент модели данных блока семантического моделирования

Диаграмма классов доменной модели, представленная на Рисунке 3.6, отражает состав основных сущностей, используемых агентами программного комплекса «ИНТЭК-SAW» при формировании математических моделей и организации вычислительных сценариев. Центральное место в данной части доменной модели занимает сущность **Model**, задающая формализованное

представление исследуемого варианта математической модели. С ней связаны сущности Variable и Equation, предназначенные для описания соответственно переменных и ограничений математической постановки. Для представления коэффициентных связей между переменными и уравнениями используется сущность «EquationVariable», обеспечивающая их согласованное связывание в рамках конкретной модели. Такая структура данных используется агентом математического моделирования и обеспечивает явное представление состава модели, а также возможность ее модификации при проведении многовариантных вычислительных экспериментов.

Сценарный уровень доменной модели представлен сущностями Scenario, «ScenarioModel» и «ScenarioModelNode», используемыми агентами сценарного управления. Сущность Scenario задает вычислительный сценарий исследования, в рамках которого может использоваться одна или несколько математических моделей.

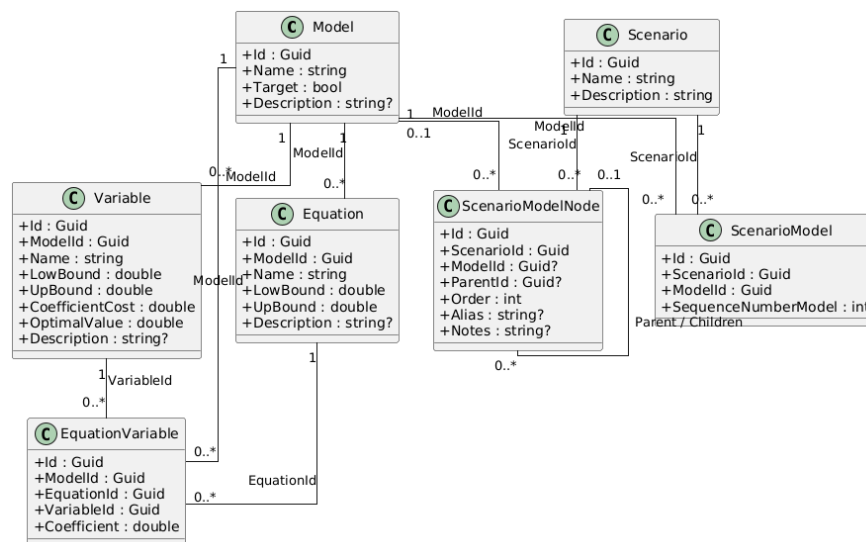


Рисунок 3.6 – Диаграмма классов доменной модели программного комплекса «ИНТЭК-SAW»

Сущность «ScenarioModel» обеспечивает связывание сценария с конкретной моделью и фиксирует последовательность ее использования в составе вычислительного эксперимента. Сущность «ScenarioModelNode» предназначена

для представления иерархической структуры сценария и задания отношений подчиненности между его элементами. Тем самым данная часть доменной модели обеспечивает согласованное взаимодействие агента математического моделирования и агентов сценарного управления, поддерживая совместное представление математической постановки задачи и структуры вычислительного сценария в рамках единой многоагентной программной среды.

Структура взаимодействия клиентской и серверной частей программного комплекса «ИНТЭК-SAW», представленная на Рисунке 3.7, определяет распределение функций между уровнем представления, уровнем прикладной обработки и внешними ресурсами хранения данных. Клиентская часть, реализованная на платформе Blazor WebAssembly, обеспечивает работу исследователя с системой, включая формирование запросов, использование пользовательских страниц и компонентов, а также визуализацию графовых моделей. В составе клиентского контура выделяются уровни Client, Client.Infrastructure, Shared и средства графической визуализации, используемые при работе с семантическими и графовыми представлениями. Передача данных между клиентским и серверным контурами осуществляется по интерфейсу HTTP/JSON API.

Серверный контур, реализованный в виде ASP.NET Core Web API, обеспечивает выполнение прикладной логики, обработку команд и запросов, функционирование доменной модели и доступ к инфраструктурным сервисам.

В его составе выделяются компоненты Host, Core, Infrastructure и Migrators. Компонент Core включает прикладной слой Application, предметный слой Domain и общие контракты Shared. Компонент Infrastructure предназначен для реализации механизмов хранения данных, выполнения инфраструктурных операций и формирования отчетных материалов. Через него обеспечивается взаимодействие с базой данных и файловыми ресурсами.

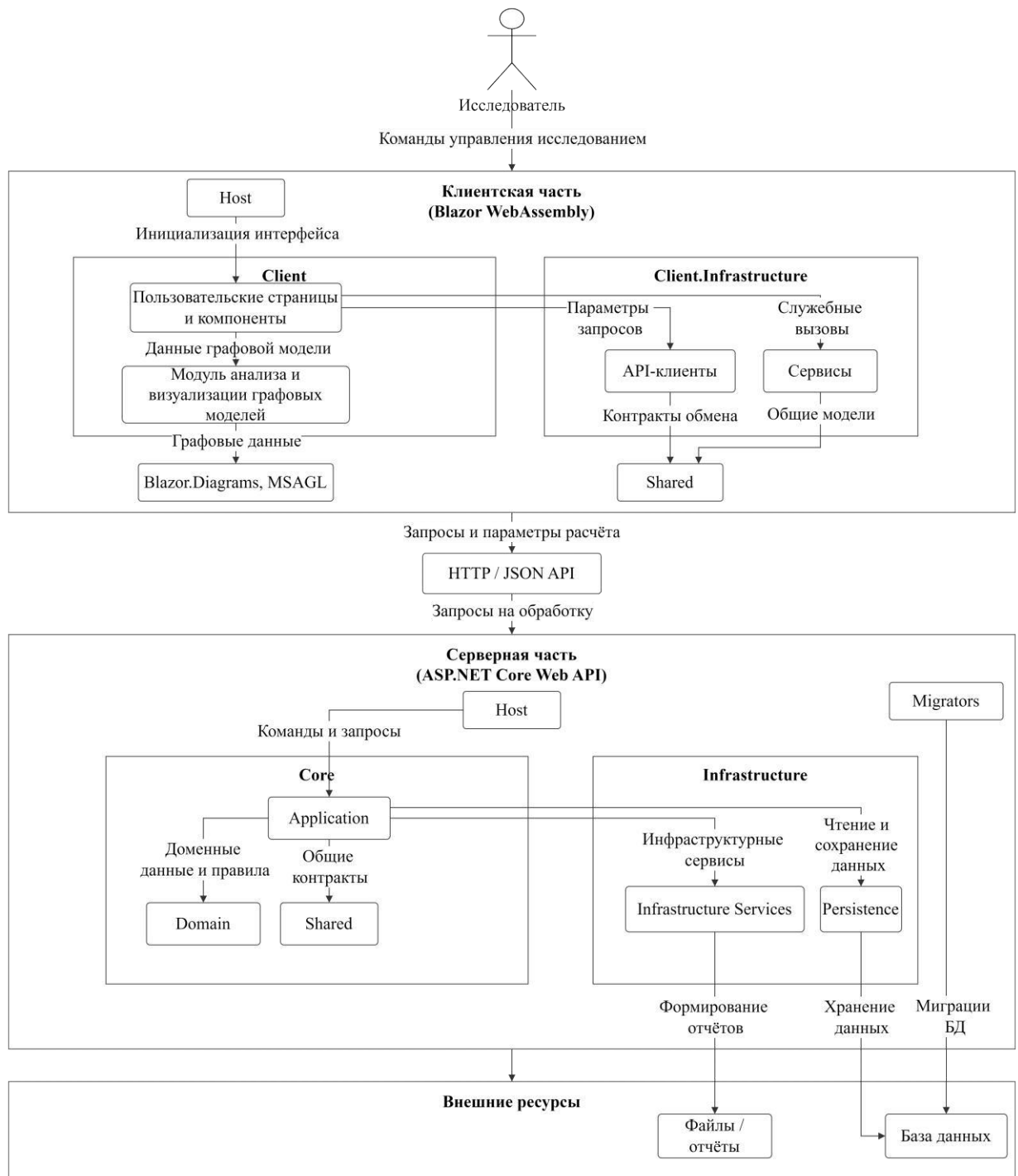


Рисунок 3.7 – Структура взаимодействия серверной и клиентской частей программного комплекса «ИНТЭК-SAW»

Таким образом, представленная структура взаимодействия обеспечивает функциональное разграничение уровней системы, поддерживает модульный принцип организации программных средств и соответствует архитектурным

решениям программного комплекса, ориентированного на совместное использование семантического и математического моделирования.

Таблица 3.1 отражает количественные характеристики основных подсистем программного комплекса «ИНТЭК-SAW». Приведенные данные позволяют оценить масштаб программной реализации комплекса и соотношение его основных функциональных контуров. Из Таблицы 3.1 следует, что существенная часть программной реализации сосредоточена в серверных подсистемах, обеспечивающих выполнение прикладной логики, обработку вычислительных сценариев, команд и запросов, а также доступ к данным. Наибольший объем программного кода приходится на подсистемы Application и Infrastructure, что определяется их ключевой ролью в реализации прикладных функций, механизмов хранения и инфраструктурных сервисов.

Клиентские подсистемы также характеризуются значительным объемом реализации. Подсистема Client охватывает страницы и компоненты пользовательского интерфейса, предназначенные для работы с моделями, сценариями и результатами вычислительных экспериментов. Подсистема «Client.Infrastructure» включает клиентские сервисы и API-клиенты, обеспечивающие обмен данными с серверной частью комплекса. В целом количественные характеристики, представленные в Таблице 3.1, подтверждают, что программный комплекс «ИНТЭК-SAW» реализован как многокомпонентная интегрированная система, объединяющая развитые средства серверной и клиентской обработки в рамках единой инструментальной среды.

Важной составляющей программного комплекса «ИНТЭК-SAW» являются пользовательские интерфейсы, обеспечивающие взаимодействие исследователя с его основными функциональными подсистемами. Интерфейсные средства комплекса формируют единую рабочую среду, ориентированную на последовательное выполнение этапов вычислительного эксперимента. В данной среде поддерживается работа с математическими моделями, вычислительными сценариями, когнитивными картами и результатами расчетов. Такая организация пользовательских интерфейсов обеспечивает согласованное использование средств

семантического и математического моделирования, способствует снижению трудоемкости подготовки вычислительных экспериментов и повышает наглядность представления результатов исследования.

Таблица 3.1 – Количественные характеристики основных подсистем программного комплекса «ИНТЭК-SAW»

Подсистема	Назначение	Количественная характеристика
API Application	сценарии, запросы, бизнес-логика	188 C# файлов, 89 Request/Command/Query
API Domain	доменные сущности	33 C# файла
API Infrastructure	доступ к данным и инфраструктурные сервисы	134 C# файла
API Host	REST API	19 контроллеров
UI Client	пользовательские страницы и компоненты	76 Razor, 58 C#
UI Client.Infrastructure	клиентские сервисы и API-клиенты	51 C# файл

Агент формирования моделей предназначен для поддержки этапа построения и редактирования математической модели топливно-энергетического комплекса и обеспечивает работу исследователя с переменными, уравнениями и связями между ними. Интерфейс, представленный на Рисунке 3.8, реализован как часть единой инструментальной среды программного комплекса «ИНТЭК-SAW» и представляет собой web-ориентированное рабочее место пользователя.

В левой части экрана расположена навигационная панель, обеспечивающая переход к основным разделам системы, включая управление моделями, когнитивное моделирование, сценарии и другие функциональные модули. В верхней части интерфейса размещены средства выбора текущей модели, а также элементы быстрого доступа к панелям переменных и уравнений. Выбор модели определяет контекст всей дальнейшей работы и инициирует загрузку её структуры.

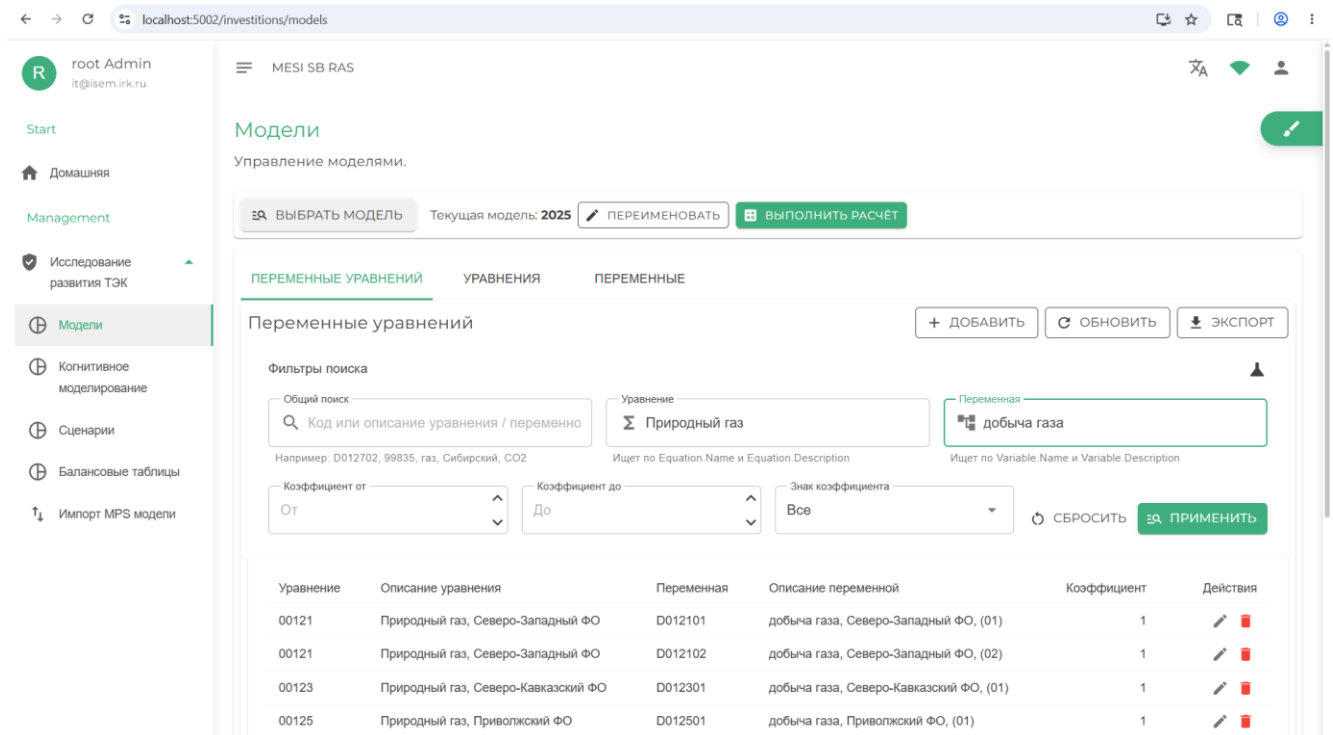


Рисунок 3.8 – Интерфейс агента формирования моделей ПК «ИНТЭК-SAW»

Основная рабочая область организована в виде системы вкладок, включающей разделы «Переменные уравнений», «Уравнения», «Переменные» и «Когнитивная карта». Такое построение позволяет рассматривать математическую модель в различных представлениях и обеспечивает согласованную работу с её формализованным описанием и семантической интерпретацией. Вкладка «Переменные уравнений» реализует табличное представление связей между уравнениями и переменными, соответствующее коэффициентной структуре математической модели.

Агент моделей в ПК «ИНТЭК-SAW» предназначен для координации работы пользователя с математическими моделями топливно-энергетического комплекса. Его основными функциями являются выбор активной модели, переключение между различными представлениями ее структуры, передача контекста выбранной модели в дочерние компоненты и инициирование отдельных вычислительных операций. Интерфейс агента реализован в виде страницы «/investitions/models». Доступ к странице ограничивается механизмом авторизации «MustHavePermission(FSHAction.View, FSHResource.Models)», где

«FSHAction.View» задает действие просмотра, а «FSHResource.Models» указывает на ресурс, связанный с математическими моделями.

На уровне внедрения зависимостей в агенте используются сервисы «IModelsClient», «ISnackbar» и «IStringLocalizer». Сервис «IModelsClient» обеспечивает взаимодействие клиентской части с серверным API при выполнении операций поиска, выбора и расчета моделей. Сервис «ISnackbar» используется для вывода пользовательских уведомлений о результатах выполненных операций. Сервис «IStringLocalizer» применяется для локализации элементов интерфейса, где тип «Models» задает область локализуемых строк, относящихся к странице работы с моделями. Тем самым агент моделей объединяет прикладную логику взаимодействия с серверной частью, средства информирования пользователя и механизм языковой адаптации интерфейса.

Загрузка перечня моделей выполняется методом «LoadModelsAsync(TableState state)». Входным параметром метода является объект «state» типа «TableState», содержащий текущее состояние таблицы, в том числе номер страницы, размер страницы и параметры пользовательского поиска. Внутри метода формируется запрос «searchModelRequest», в который передаются значения «PageNumber», «PageSize» и «Keyword». Параметр «PageNumber» задает номер загружаемой страницы, «PageSize» определяет количество записей на странице, а «Keyword» используется для фильтрации списка моделей по поисковой строке. После формирования запроса вызывается метод «ModelClient.SearchAsync(req)», где «req» представляет экземпляр «searchModelRequest». Результатом вызова является страница объектов «ModelDto», содержащая ограниченный набор моделей и сведения, необходимые для их отображения в таблице. Такая организация загрузки реализует серверную пагинацию и поиск, что позволяет работать с большим числом моделей без передачи полного набора данных на клиентскую сторону.

Выбор активной модели осуществляется методом «SelectModel(ModelPickItem model)». Входным параметром метода является объект «model» типа «ModelPickItem», содержащий идентификатор и наименование

выбранной модели. В результате выполнения метода устанавливаются значения внутренних полей «_selectedModelId» и «_selectedModelName», определяющих текущий модельный контекст. Одновременно сбрасываются фильтры «_filterEquationId» и «_filterVariableId», что исключает перенос состояния от ранее выбранной модели. После этого активируется рабочая область интерфейса путем установки значения «_panelVisible = true», задается стартовая вкладка «_activeTabIndex = 0», закрывается панель выбора модели посредством изменения состояния «_modelPickerOpen = false» и иницируется обновление интерфейса вызовом «StateHasChanged()». Таким образом, метод «SelectModel(ModelPickItem model)» реализует переход от режима поиска модели к режиму просмотра и редактирования ее внутренней структуры.

После выбора модели агент управляет отображением дочерних компонентов «EquationVariablesPanel», «EquationsPanel» и «VariablesPanel». В каждый из указанных компонентов передается идентификатор активной модели через параметр «ModelId». Компонент «EquationVariablesPanel» предназначен для отображения и редактирования коэффициентных связей между уравнениями и переменными. Компонент «EquationsPanel» обеспечивает работу со списком уравнений модели. Компонент «VariablesPanel» используется для работы с переменными модели. Для корректного обновления состояния дочерних компонентов применяется механизм ключей «@key», формируемых с учетом выбранной модели и действующих фильтров. Это позволяет исключить некорректное отображение данных при смене активного контекста и обеспечивает согласованность пользовательского интерфейса.

Переключение между основными представлениями модели реализовано методами «OpenVariablesForModel()» и «OpenEquationsForModel()». Данные методы не имеют входных параметров. Их назначение состоит в изменении значения поля «_activeTabIndex», отвечающего за номер активной вкладки. Метод «OpenVariablesForModel()» переводит интерфейс к представлению переменных модели. Метод «OpenEquationsForModel()» активирует представление уравнений. Такое решение обеспечивает разделение пользовательской навигации по

структурным элементам модели и позволяет сохранить единый контекст выбранной модели во всех вкладках.

Связанная навигация между уравнениями, переменными и коэффициентными зависимостями реализуется методами «OnEquationPicked(Guid eqId)» и «OnVariablePicked(Guid varId)». Метод «OnEquationPicked(Guid eqId)» принимает входной параметр «eqId» типа «Guid», содержащий идентификатор выбранного уравнения. В результате выполнения метода значение «eqId» сохраняется в поле «_filterEquationId», после чего интерфейс переключается на вкладку связей. Метод «OnVariablePicked(Guid varId)» принимает входной параметр «varId» типа «Guid», содержащий идентификатор выбранной переменной. Значение «varId» сохраняется в поле «_filterVariableId», что позволяет отобразить коэффициентные зависимости, связанные с выбранной переменной. В совокупности данные методы обеспечивают переход от просмотра отдельных элементов модели к анализу их участия в системе ограничений и коэффициентных связей.

Табличные компоненты агента моделей используют серверную загрузку данных. При изменении состояния таблицы формируются запросы, включающие параметры пагинации, поиска и фильтрации. Обработка таких запросов выполняется на стороне серверного API, а клиентская часть получает только тот фрагмент данных, который необходим для текущего отображения. Операции добавления, редактирования и удаления элементов модели инициируют вызовы соответствующих методов клиентских сервисов и завершаются обновлением данных в интерфейсе без полной перезагрузки страницы. Это обеспечивает интерактивный режим работы с моделью и снижает вычислительную и сетевую нагрузку на клиентскую часть программного комплекса.

С архитектурной точки зрения агент моделей представляет собой координирующий модуль, инкапсулирующий состояние текущего модельного контекста. Это состояние определяется совокупностью полей «_selectedModelId», «_selectedModelName», «_panelVisible», «_activeTabIndex», «_filterEquationId», «_filterVariableId», «_modelPickerOpen», «_modelSearchText»,

«_modelPickerPageSize» и «_modelPickerTable». Поля «_selectedModelId» и «_selectedModelName» задают идентификатор и наименование активной модели. Поле «_panelVisible» определяет видимость рабочей области. Поле «_activeTabIndex» фиксирует текущую вкладку интерфейса. Поля «_filterEquationId» и «_filterVariableId» используются для передачи фильтров в представление коэффициентных связей. Поле «_modelPickerOpen» управляет состоянием панели выбора модели. Поле «_modelSearchText» хранит поисковую строку. Поле «_modelPickerPageSize» задает размер страницы. Поле «_modelPickerTable» содержит ссылку на табличный компонент выбора моделей. Использование указанного набора параметров обеспечивает управление жизненным циклом интерфейса и синхронизацию данных между дочерними компонентами.

В программной реализации агента также предусмотрен метод «OnCalcAsync(ModelDto model)». Входным параметром метода является объект «model» типа «ModelDto», содержащий сведения о модели, для которой иницируется расчет. Внутри метода формируется запрос «CalcModelRequest». После этого вызывается серверный метод «ModelClient.CalcModelAsync(request)», где «request» представляет сформированный экземпляр запроса «CalcModelRequest». Данный метод связывает интерфейс управления структурой модели с вычислительным контуром программного комплекса. Несмотря на то что расчетная процедура не является основной функцией агента моделей, ее наличие показывает, что выбор и редактирование модели непосредственно связаны с последующим проведением вычислительного эксперимента.

Таким образом, агент моделей в ПК «ИНТЭК-SAW» реализует интерактивное средство работы с математической моделью, обеспечивающее выбор активной модели, управление ее структурными элементами, согласованную навигацию между уравнениями, переменными и коэффициентными зависимостями, а также передачу модельного контекста в вычислительные процедуры. Наличие методов «LoadModelsAsync(TableState state)», «SelectModel(ModelPickItem model)», «OpenVariablesForModel()»,

«OpenEquationsForModel()», «OnEquationPicked(Guid eqId)», «OnVariablePicked(Guid varId)» и «OnCalcAsync(ModelDto model)» подтверждает практическую реализованность соответствующего программного компонента и его ориентацию на работу с моделями значительной размерности.

Агент сценариев предназначен для поддержки этапа формирования вычислительных сценариев исследования развития топливно-энергетического комплекса и обеспечивает работу с вариантами модели, отражающими различные условия функционирования и развития ТЭК. Интерфейс, представленный на Рисунке 3.9, реализован в составе единой инструментальной среды программного комплекса «ИНТЭК-SAW» и представляет собой web-ориентированное рабочее место пользователя, предназначенное для выбора сценария, просмотра его древовидной структуры и работы с вложенными вариантами моделей.

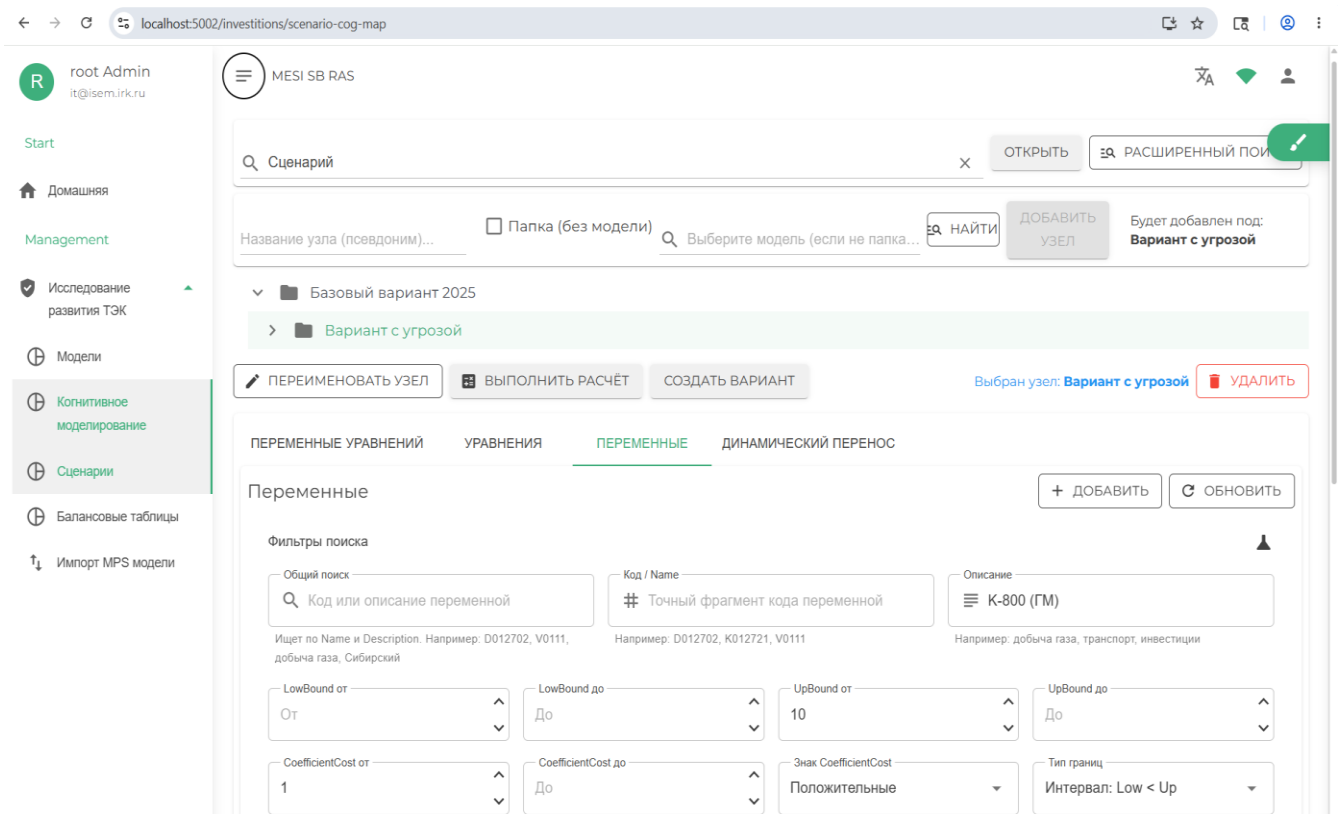


Рисунок 3.9 – Интерфейс агента сценариев ПК «ИНТЭК-SAW»

Агент сценариев в ПК «ИНТЭК-SAW» предназначен для организации работы пользователя со сценариями вычислительных экспериментов и их иерархической

структурой. В левой части пользовательского интерфейса расположена навигационная панель, обеспечивающая переход к основным разделам программного комплекса, включая модели, когнитивное моделирование, сценарии, балансовые таблицы и импорт MPS-модели. Верхняя часть интерфейса содержит средства поиска и выбора сценария, после чего выбранный сценарий может быть открыт в виде дерева вариантов.

Первичный выбор сценария реализуется с использованием компонента автодополнения, связанного с методом «SearchScenarios(string text)». Входным параметром метода является строка «text» типа «string», содержащая поисковый фрагмент, введенный пользователем. Внутри метода формируется объект «SearchScenariosRequest», в который передаются параметры «Keyword», «PageNumber» и «PageSize». Параметр «Keyword» содержит поисковое выражение, параметр «PageNumber» задает номер страницы результатов, а параметр «PageSize» определяет количество сценариев, возвращаемых одним запросом. После формирования запроса вызывается метод «ScenariosClient.SearchAsync(req)», где «req» представляет экземпляр «SearchScenariosRequest». Возвращаемые сервером объекты «ScenarioDto» преобразуются в облегченный тип «ScenarioItem», содержащий идентификатор и наименование сценария. Такая схема обеспечивает быстрый выбор сценария без загрузки полного перечня сценариев на клиентскую сторону.

После выбора сценария пользователь может открыть его структуру с помощью кнопки «Открыть». Данное действие инициирует вызов метода «LoadScenarioTreeAsync()». Метод не имеет входных параметров и является одним из центральных элементов логики агента сценариев, поскольку отвечает за загрузку древовидного представления выбранного сценария. Внутри метода состояние загрузки фиксируется переменной «_treeLoading», после чего очищается текущий набор корневых узлов «_roots». Далее вызывается вспомогательный метод «FetchTreeAsync(_selectedScenario.Id)», где «_selectedScenario.Id» представляет идентификатор выбранного сценария. Таким образом, метод

«LoadScenarioTreeAsync()» обеспечивает переход от выбранного сценария к его структурному представлению в интерфейсе.

Загрузка дерева сценария выполняется методом «FetchTreeAsync(Guid scenarioId)». Входным параметром метода является «scenarioId» типа «Guid», содержащий уникальный идентификатор сценария. Внутри метода выполняется обращение к серверному API дерева сценариев посредством вызова «ScenarioTreeClient.GetTreeAsync(scenarioId)». Полученные объекты «ScenarioModelNodeDto» сортируются по полям «Order» и «Id». Поле «Order» используется для задания пользовательского или логического порядка следования узлов, а поле «Id» обеспечивает устойчивое упорядочение элементов при совпадении значений порядка. После сортировки серверные объекты преобразуются в клиентскую древовидную модель «ScenarioNodeVm» посредством метода «MapNode(ScenarioModelNodeDto n)». Входным параметром метода «MapNode(ScenarioModelNodeDto n)» является объект «n» типа «ScenarioModelNodeDto», представляющий узел сценарного дерева, полученный от серверной части. В результате формируется клиентское представление узла, пригодное для отображения в интерфейсе. Такая организация позволяет агенту сценариев работать не с плоским списком вариантов, а с иерархической структурой, отражающей происхождение дочерних вариантов от родительских.

Древовидное представление сценария визуализируется компонентом «MudTreeView». В указанный компонент передается текущее выбранное значение «_selected» и обработчик выбора «OnSelected(ScenarioNodeVm? node)». Обозначение «ScenarioNodeVm?» указывает, что параметр «node» может содержать объект выбранного узла либо пустое значение, если выбор отсутствует. Формирование элементов дерева выполняется методом «BuildItem(ScenarioNodeVm n)». Входным параметром метода является «n» типа «ScenarioNodeVm», содержащий клиентское представление узла сценария. Метод рекурсивно строит элементы «MudTreeViewItem», где тип «ScenarioNodeVm» задает модель данных, связанную с каждым визуальным элементом дерева. Для каждого элемента задаются текстовое представление, иконка и дочерние узлы.

Такое решение обеспечивает корректное отображение как узлов, связанных с расчетной моделью, так и промежуточных папок сценария, не соответствующих отдельному варианту расчета.

Метод «OnSelected(ScenarioNodeVm? node)» реализует выбор узла сценарного дерева и передачу его контекста в рабочую область. Входным параметром метода является «node» типа «ScenarioNodeVm?», содержащий выбранный узел дерева либо пустое значение. При выборе узла ссылка на текущий элемент сохраняется в поле «_selected». Если выбранный узел связан с моделью, идентификатор этой модели записывается в поле «_modelIdBacking». Тем самым агент сценариев обеспечивает привязку выбранного элемента дерева к активной расчетной модели. Дополнительно, если пользователь еще не зафиксировал модель для виджетов, выполняется мягкая синхронизация через присваивание «_selectedModelId = mid», где «mid» представляет идентификатор модели, связанной с выбранным узлом. После изменения состояния вызывается метод «StateChanged()», обеспечивающий обновление пользовательского интерфейса.

Существенной особенностью агента сценариев является разделение двух модельных контекстов. Первый контекст определяется выбранным узлом сценарного дерева и используется в основной рабочей области. Второй контекст задается полем «_selectedModelId» и фиксируется отдельно с помощью кнопки «Выбрать модель». Данная логика реализована методом «PickModelForWidgets()». Метод не имеет входных параметров. Если текущий выбранный узел дерева связан с моделью, ее идентификатор сохраняется как текущая модель для дочерних виджетов. После этого пользователю отображается уведомление посредством вызова «Snackbar.Add(message, severity)», где «message» содержит текст уведомления, а «severity» задает тип сообщения, например информационное сообщение, предупреждение или сообщение об ошибке. Такое разделение позволяет пользователю, с одной стороны, перемещаться по дереву сценария, а с другой стороны, явно закреплять модель, контекст которой должен использоваться в подчиненных визуальных компонентах.

Рабочая область агента сценариев организована как контейнер, внутри которого размещается компонент «CognitiveMapPanel». В данный компонент передаются параметры «ModelId», «DiagramId», «ScenarioId» и «ParentNodeId». Параметр «ModelId» задает идентификатор расчетной модели, с которой должна быть связана когнитивная карта. Параметр «DiagramId» задает идентификатор диаграммы. Параметр «ScenarioId» содержит идентификатор выбранного сценария. Параметр «ParentNodeId» определяет родительский узел сценарного дерева, относительно которого может выполняться формирование нового варианта. Значение «ModelId» вычисляется через свойство «_currentModelId», которое формируется с учетом поля «_modelIdBacking», параметра запроса «ModelIdFromQuery» и параметра маршрута «Id». Значение «DiagramId» аналогично определяется через свойство «_currentDiagramId». Благодаря этому рабочая область агента сценариев поддерживает как прямую навигацию по URL, так и интерактивный выбор сценарного узла в пользовательском интерфейсе.

Передача значения «_selectedModelId» в компонент «CognitiveMapPanel» осуществляется через механизм «CascadingValue». Данный механизм позволяет передавать выбранную модель для дочерних виджетов в подчиненные компоненты без явного указания соответствующего параметра на каждом уровне компонентной иерархии. В результате сохраняется единый контекст выбранной модели при взаимодействии нескольких визуальных и расчетных компонентов.

Кроме базового выбора сценария, агент реализует расширенный поиск сценариев через правую выдвижную панель. В этой панели используется отдельная таблица «MudTable» с серверной загрузкой данных. Тип «ScenarioDto» задает структуру объекта сценария, получаемого от серверного API. Загрузка данных таблицы привязана к методу «LoadPickerData(TableState state)». Входным параметром метода является «state» типа «TableState», содержащий состояние таблицы, включая номер текущей страницы, размер страницы и параметры сортировки или поиска. Внутри метода формируется объект «SearchScenariosRequest», в который передаются строка поиска «PickerSearch», номер страницы «PageNumber» и размер страницы «PageSize». Далее вызывается

метод «ScenariosClient.SearchAsync(req)», где «req» является сформированным запросом поиска сценариев. Результат преобразуется в объект «TableData», содержащий список сценариев и общее число записей. Таким образом, расширенный поиск реализует серверный механизм поиска и навигации по сценариям с поддержкой постраничной загрузки.

Выбор сценария из правой панели реализован методом «OnPickFromDrawer(ScenarioDto dto)». Входным параметром метода является «dto» типа «ScenarioDto», содержащий данные выбранного сценария. Внутри метода выбранный сценарий преобразуется в объект «ScenarioItem», после чего панель поиска закрывается. Затем для выбранного сценария запускается метод «LoadScenarioTreeAsync()». За счет этого выбор сценария из расширенного поиска и выбор сценария из строки автодополнения приводят к единому результату, а именно к загрузке и отображению соответствующего дерева вариантов.

Отдельную часть логики агента сценариев составляют операции жизненного цикла сценария: создание, редактирование и удаление. Создание нового сценария реализовано методом «OpenScenarioCreateDialog()». Метод не имеет входных параметров и открывает диалог «ScenarioEditDialog» посредством вызова «DialogService.Show(title, parameters)», где «title» задает заголовок диалогового окна, а «parameters» содержит передаваемые в диалог параметры. После закрытия диалога выполняется извлечение данных из возвращенного словаря «Dictionary<string, object?>». В данном обозначении тип «string» задает имя возвращаемого параметра, тип «object?» указывает, что значение параметра может иметь произвольный объектный тип либо быть пустым. На основе полученных данных формируется запрос «CreateScenarioRequest». Далее вызывается метод «ScenariosClient.CreateAsync(request)», где «request» представляет сформированный объект создания сценария. При успешном завершении операции пользователю отображается уведомление, а таблица расширенного поиска обновляется вызовом «_pickerTable.ReloadServerData()».

Редактирование сценария реализовано методом «OpenScenarioEditDialog(ScenarioDto dto)». Входным параметром метода является

«dto» типа «ScenarioDto», содержащий текущие данные редактируемого сценария. В диалог передаются значения «Id», «Name» и «Description». Параметр «Id» задает идентификатор сценария, «Name» содержит его наименование, а «Description» содержит текстовое описание. После подтверждения изменений формируется объект «UpdateScenarioRequest», который передается в метод «ScenariosClient.UpdateAsync(id, request)». В данном вызове параметр «id» содержит идентификатор обновляемого сценария, а «request» содержит новые значения его атрибутов. Если обновляется сценарий, уже выбранный в верхней панели, то ссылка «_selectedScenario» также синхронизируется с новыми данными. Это обеспечивает согласованность интерфейса без повторной ручной загрузки сценария пользователем.

Удаление сценария реализовано методом «ConfirmDeleteScenarioAsync(ScenarioDto dto)». Входным параметром метода является «dto» типа «ScenarioDto», содержащий данные удаляемого сценария. Сначала отображается диалог подтверждения посредством вызова «DialogService.ShowDialog(title, message)», где «title» задает заголовок диалогового окна, а «message» содержит текст запроса на подтверждение удаления. При согласии пользователя выполняется вызов «ScenariosClient.DeleteAsync(dto.Id)», где «dto.Id» представляет идентификатор удаляемого сценария. После успешного удаления пользователю отображается уведомление. При необходимости сбрасывается выбранный сценарий «_selectedScenario», а список сценариев в панели поиска обновляется. Данная последовательность действий обеспечивает контролируемое удаление сценариев и предотвращает случайную потерю данных.

Связь агента сценариев с механизмом формирования новых вариантов модели реализуется через метод «HandleVariantCreated(Guid newModelId)». Входным параметром метода является «newModelId» типа «Guid», содержащий идентификатор новой модели, созданной в результате формирования сценарного варианта. Метод используется как обработчик события «OnVariantCreated», поступающего из компонента «CognitiveMapPanel». После создания нового варианта выполняется повторная загрузка дерева сценария методом

«LoadScenarioTreeAsync()», а пользователю выводится сообщение об обновлении дерева. Тем самым агент сценариев поддерживает не только просмотр ранее созданных вариантов, но и динамическое изменение сценарной структуры в ходе вычислительного эксперимента.

Таким образом, агент сценариев в ПК «ИНТЭК-SAW» реализует программный механизм выбора, отображения и сопровождения сценариев вычислительных экспериментов. Его функциональность включает поиск сценариев, загрузку иерархического дерева вариантов, выбор узлов сценарной структуры, передачу контекста расчетной модели в компонент когнитивного моделирования, управление жизненным циклом сценариев и обновление дерева после создания новых вариантов модели. Использование методов «SearchScenarios(string text)», «LoadScenarioTreeAsync()», «FetchTreeAsync(Guid scenarioId)», «MapNode(ScenarioModelNodeDto n)», «BuildItem(ScenarioNodeVm n)», «OnSelected(ScenarioNodeVm? node)», «PickModelForWidgets()», «LoadPickerData(TableState state)», «OnPickFromDrawer(ScenarioDto dto)», «OpenScenarioCreateDialog()», «OpenScenarioEditDialog(ScenarioDto dto)», «ConfirmDeleteScenarioAsync(ScenarioDto dto)» и «HandleVariantCreated(Guid newModelId)» подтверждает практическую реализованность агента сценариев как координирующего компонента, обеспечивающего согласованную работу сценарного, модельного и когнитивного контуров программного комплекса.

В агенте сценариев реализован механизм динамического переноса параметров между моделями разных расчетных периодов. Он предназначен для формирования новой модели периода $t + 1$ на основе результатов сопоставления базового и сценарного вариантов модели периода t . В пользовательском интерфейсе, представленном на Рисунке 3.10, для задания межпериодного переноса выбираются три модели: базовая модель периода t , сценарная модель периода t и базовая модель периода $t + 1$. Последняя используется как основа для создаваемой динамической модели.

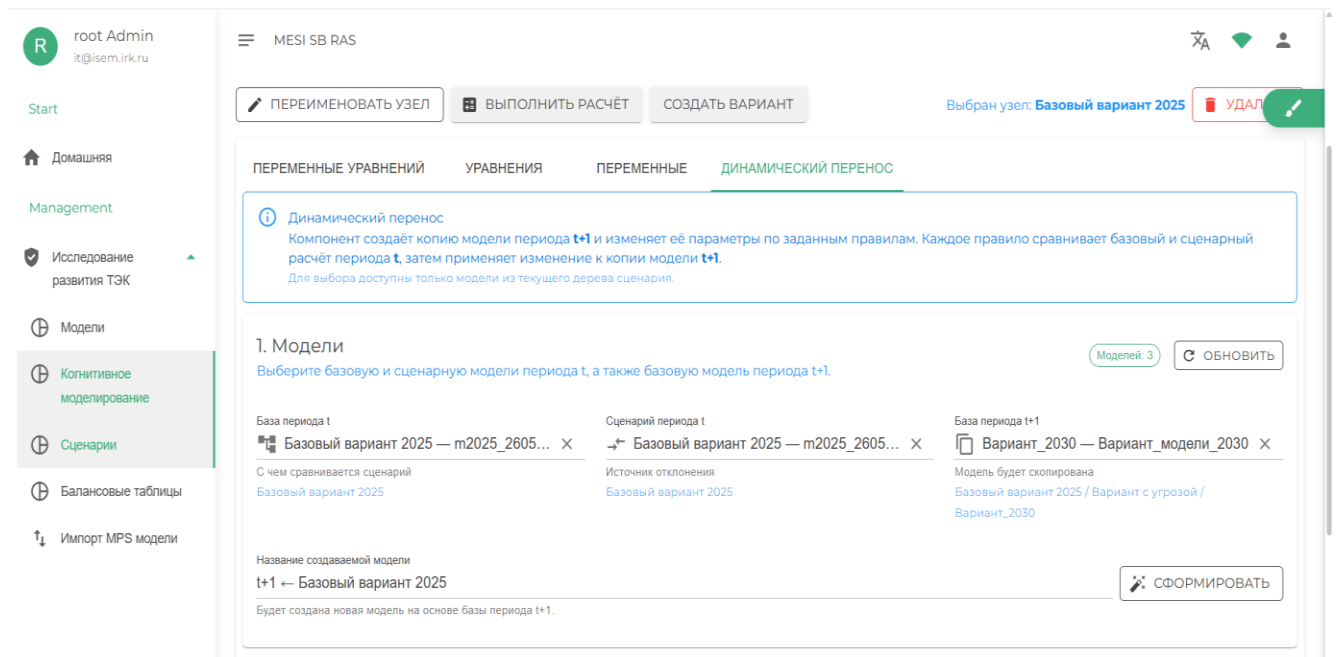


Рисунок 3.10 – Интерфейс выбора моделей для динамического переноса параметров

На следующем этапе в пользовательском интерфейсе, представленном на Рисунке 3.11, задаются правила межпериодного переноса параметров модели. Каждое правило определяет, какое расчетное значение используется как источник отклонения, каким способом рассчитывается отклонение и какой параметр должен быть изменен в модели периода $t + 1$.

В качестве источника может использоваться оптимальное значение переменной или значение выражения уравнения. Отклонение может определяться как величина снижения расчетного показателя относительно базового варианта, как полное направленное расхождение между базовым и сценарным расчетными значениями, как обратное направленное расхождение либо как модуль расхождения между ними.

Изменяемым параметром может быть нижняя или верхняя граница переменной, коэффициент целевой функции, а также нижняя или верхняя граница уравнения.

root Admin
it@isem.irk.ru

MESI SB RAS

Будет создана новая модель на основе базы периода $t+1$.

2. Правила переноса

Правило задаёт, что сравнить в периоде t и какой параметр изменить в копии модели $t+1$.

[Правило 1](#)

[+ ДОБАВИТЬ ПРАВИЛО](#) [X ОЧИСТИТЬ](#)

Имя	Источник	Код источника	Как считать отклонение	Что изменить	Код цели	Параметр	Действие
Правило 1	Значение переменной	D012702	Только снижение: $\max(0, \text{база} - \text{сценарий})$	Переменную	Если пусто — используется код источника	Верхняя граница	Уменьшить на $\alpha \times \text{отклонение}$

☒ Пересчитать модели периода t ☒ Рассчитать созданную модель

[▶ СОЗДАТЬ ДИНАМИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ](#)

переменная D012702: берётся только
● снижение; переменная D012702.верхняя
граница: уменьшить на $1,00 \times \text{отклонение}$.

Рисунок 3.11 – Интерфейс задания правил динамического переноса параметров

Программная реализация динамического переноса представлена запросом «CalcDynamicTransferModelRequest» и обработчиком «CalcDynamicTransferModelRequestHandler». В методе «Handle(CalcDynamicTransferModelRequest request, CancellationToken cancellationToken)» выполняется общая последовательность операций, где «request» содержит параметры переноса, а «cancellationToken» обеспечивает возможность прерывания асинхронного выполнения. При необходимости сначала пересчитываются базовая модель и вариант развития модели периода « t » методом «SolveAndPersistAsync(model, cancellationToken)». Затем методом «CloneNextModelAsync(request, cancellationToken)» создается копия базовой модели периода « $t+1$ ». После этого метод «ApplyDynamicTransferRulesAsync(request, targetModel, cancellationToken)» применяет заданные правила переноса к созданной модели, где «targetModel» обозначает модель периода « $t+1$ », изменяемую по результатам расчета предыдущего периода. Если в запросе включен расчет созданной модели, она также решается методом «SolveAndPersistAsync(model, cancellationToken)».

Внутри применения правил для каждого источника определяется базовое и сценарное значение методом «ComputeSourceValue(source, model,

cancellationToken)», где «source» задает источник величины, а «model» указывает модель, из которой извлекается значение. Затем отклонение рассчитывается методом «ComputeDelta(baseValue, scenarioValue, mode)», где «baseValue» соответствует базовому значению, «scenarioValue» соответствует сценарному значению, а «mode» задает способ вычисления отклонения. После этого операция переноса выполняется методом «ApplyTransferOperation(currentValue, delta, alpha, operation)». Она поддерживает три варианта изменения параметра: вычитание величины « $\alpha\Delta$ », добавление величины « $\alpha\Delta$ » или установку фиксированного значения. Здесь « α » обозначает коэффициент переноса, а « Δ » обозначает рассчитанное отклонение между базовым и сценарным значениями. Применение результата к модели выполняется методами «ApplyToVariable(rule, targetModel, value)» или «ApplyToEquation(rule, targetModel, value)» в зависимости от того, изменяется переменная или уравнение.

Таким образом, динамический перенос обеспечивает программную поддержку квазидинамической связи между расчетными периодами. Результаты расчета периода «t» используются для изменения ограничений или параметров модели периода «t+1», что позволяет учитывать межпериодные последствия сценарных воздействий без ручного редактирования экономико-математической модели.

С архитектурной точки зрения агент сценариев представляет собой координирующий модуль пользовательского уровня, инкапсулирующий состояние выбранного сценария, дерево его узлов, параметры текущей модели и состояние интерфейсных компонентов поиска. Его внутреннее состояние задается полями «_selectedScenario», «_roots», «_selected», «_treeLoading», «_pickerOpen», «_pickerTable», «_pickerSearch», «_pickerPageSize», «_modelIdBacking», «_diagramIdBacking» и «_selectedModelId». Поле «_selectedScenario» содержит выбранный сценарий, «_roots» хранит корневые узлы дерева, «_selected» фиксирует выбранный узел, «_treeLoading» отражает состояние загрузки, «_pickerOpen» управляет панелью поиска, «_pickerTable» содержит ссылку на таблицу, «_pickerSearch» хранит поисковую строку, «_pickerPageSize» задает

размер страницы, «_modelIdBacking» и «_diagramIdBacking» фиксируют текущие идентификаторы модели и диаграммы, а «_selectedModelId» задает модель, передаваемую в дочерние компоненты. Наличие этих полей показывает, что агент реализован как интерактивный модуль с собственным состоянием, поддерживающий согласованную работу нескольких взаимосвязанных режимов: выбора сценария, просмотра дерева, выбора модели и передачи контекста в рабочую область.

Таким образом, агент сценариев в ПК «ИНТЭК-SAW» реализует средства формирования, выбора и сопровождения вычислительных сценариев исследования развития ТЭК. Его программная реализация опирается на методы «SearchScenarios(string text)», «LoadScenarioTreeAsync()», «FetchTreeAsync(Guid scenarioId)», «MapNode(ScenarioModelNodeDto n)», «BuildItem(ScenarioNodeVm n)», «OnSelected(ScenarioNodeVm? node)», «PickModelForWidgets()», «LoadPickerData(TableState state)», «OnPickFromDrawer(ScenarioDto dto)», «OpenScenarioCreateDialog()», «OpenScenarioEditDialog(ScenarioDto dto)», «ConfirmDeleteScenarioAsync(ScenarioDto dto)» и «HandleVariantCreated(Guid newModelId)». Это подтверждает, что сценарный контур комплекса не является декларативным, а реализован как рабочий программный модуль, обеспечивающий управление структурой вариантов модели и их включение в вычислительный эксперимент.

Агент семантического моделирования предназначен для формирования качественного описания исследуемой предметной области и обеспечивает построение когнитивных моделей, отражающих факторы, угрозы, мероприятия и технологические элементы развития топливно-энергетического комплекса. Интерфейс, представленный на Рисунке 3.12, реализован как графическая рабочая среда в составе программного комплекса «ИНТЭК-SAW» и используется для построения, редактирования, сохранения и загрузки когнитивных карт, а также для формирования на их основе новых вариантов математической модели.

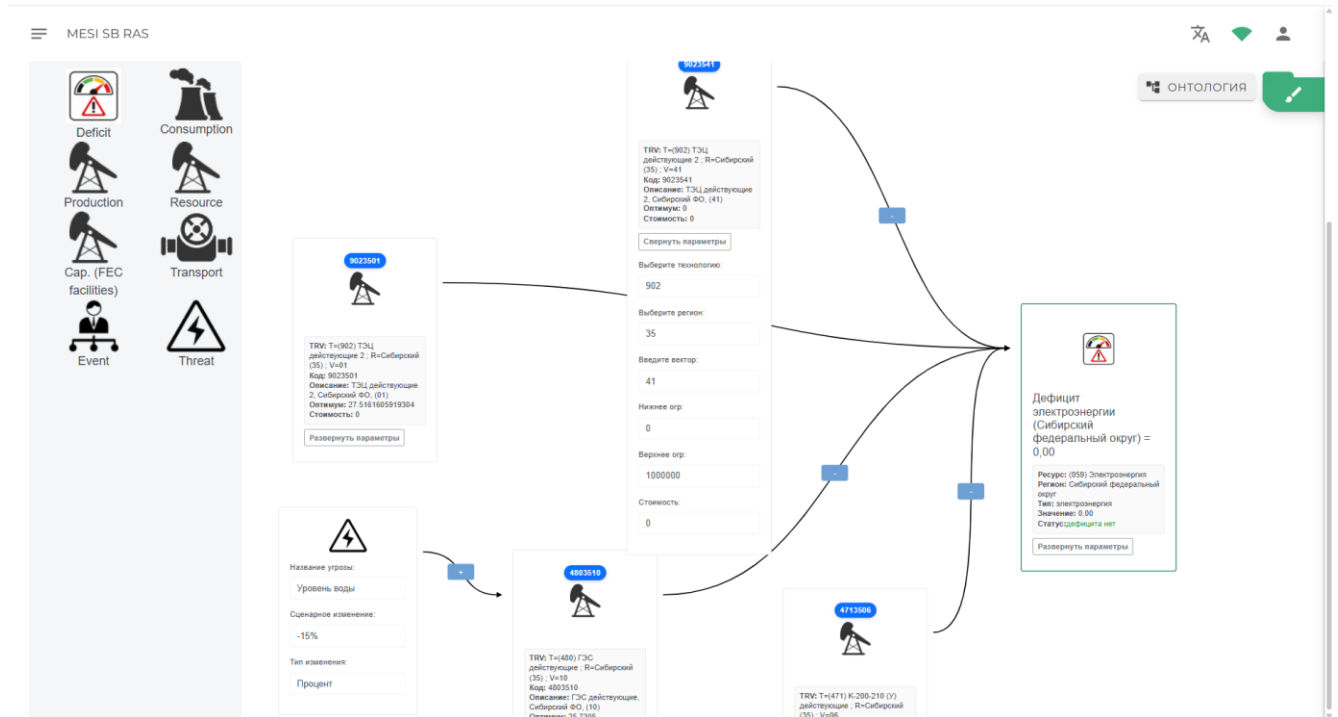


Рисунок 3.12 – Интерфейс агента семантического моделирования
ПК «ИНТЭК-SAW»

В центральной части интерфейса располагается рабочее поле, предназначенное для построения когнитивной карты. В левой части размещается панель типовых концептов, используемых при формировании модели. В текущей реализации в состав панели входят узлы типов «Consumption», «Production», «Resource», «Facilities», «Transport», «Event», «Threat», а также базовый узел «Default Node». Эти элементы визуализируются как отдельные типы графовых объектов и размещаются на рабочем поле с использованием механизма перетаскивания. Программно данная функция реализуется обработчиками «OnDragStart(int key)» и «OnDrop(DragEventArgs e)», где «key» задает тип выбранного концепта, а «e» содержит параметры события размещения элемента. При начале перетаскивания тип концепта сохраняется в переменной «_draggedType». При размещении на рабочем поле вычисляется относительная позиция курсора методом «_diagram.GetRelativeMousePoint(point)», после чего в методе «OnDrop(DragEventArgs e)» создается экземпляр соответствующего узла. Для каждого узла автоматически добавляются порты соединения по четырем

направлениям, что обеспечивает возможность последующего задания причинно-следственных связей.

Графическая модель внутри агента строится на основе объекта «BlazorDiagram _diagram», который является центральной структурой хранения узлов и связей. На этапе инициализации компонента в методе «OnInitializedAsync()» выполняется регистрация визуальных компонентов для различных типов узлов посредством вызовов «_diagram.RegisterComponent<TComponent, TModel>()», где «TComponent» обозначает визуальный компонент, а «TModel» задает соответствующий тип графового узла. В частности, регистрируются компоненты «DefaultWidget», «ConsumptionWidget», «ProductionWidget», «ResourceWidget», «FacilitiesWidget», «TransportWidget», «EventWidget», «ThreatWidget» и «JunctionWidget». Здесь же задается фабрика связей «_diagram.Options.Links.Factory», определяющая создание объектов типа «CustomLink» со стрелочным маркером на конце. Тем самым обеспечивается единый графический механизм задания ориентированных причинно-следственных связей между концептами.

Формирование связи между узлами сопровождается ее последующей настройкой. Для этого используются обработчики «OnLinkAdded(BaseLinkModel baseLink)» и «OnLinkRemoved(BaseLinkModel baseLink)», привязанные к событиям «_diagram.Links.Added» и «_diagram.Links.Removed». Параметр «baseLink» содержит объект добавляемой или удаляемой связи. При добавлении новой связи вызывается метод «EnsureLabelAndWire(LinkModel? link)», где «link» содержит связь, для которой требуется создать или обновить текстовую метку. Обозначение «LinkModel?» указывает, что параметр может иметь пустое значение. Метод создает метку «LinkLabelModel», если она еще отсутствует, и подключает ее к событиям изменения. Это позволяет пользователю задавать семантическую интерпретацию связи, включая текстовое название и значение влияния. Если выбрана конкретная связь, в правой части интерфейса открывается панель ее свойств, где редактируется текст метки через свойство «SelectedLinkLabelText» и числовое значение связи через поле «_selectedCustomLink.Value».

Важным элементом интерфейса является работа с параметрами узлов, связанными с математической моделью. Для технологических концептов «Production», «Transport», «Consumption», «Resource» и «Facilities» в составе узла поддерживаются поля «Code», «LowBound» и «UpBound». Поле «Code» используется для идентификации соответствующей переменной математической модели, а поля «LowBound» и «UpBound» задают нижнюю и верхнюю границы ее изменения. При сохранении когнитивной карты эти данные включаются в снимок состояния диаграммы. Для этого используется метод «BuildCurrentSnapshot()», формирующий объект «DiagramSnapshotDto», который содержит список узлов «NodeDto» и список связей «LinkDto». В описание каждого узла включаются его идентификатор, тип, заголовок, координаты и, при наличии, код переменной и параметры ограничений. Для связей сохраняются исходный и целевой узлы, используемые порты, текстовая метка и значение пользовательской связи. Таким образом, агент когнитивного моделирования выполняет не только функцию графического редактора, но и функцию структурированного хранения семантической информации.

Сохранение и загрузка когнитивных карт реализуются как операции взаимодействия с серверным API диаграмм. Метод «SaveAsync()» выполняет сохранение текущей карты по идентификатору «EffectiveDiagramId». Перед сохранением вызывается метод «CommitPendingEditsAsync()», завершающий редактирование активных элементов интерфейса. Затем формируется снимок состояния методом «BuildCurrentSnapshot()», после чего вызывается «DiagramsClient.SaveAsync(id, versionId, snap)», где «id» задает идентификатор диаграммы, «versionId» обозначает идентификатор версии при его наличии, а «snap» содержит сохраняемый снимок карты. Если диаграмма с указанным идентификатором отсутствует на сервере, агент пытается создать пустой граф методом «TryCreateGraphAsync(Guid id)». Загрузка когнитивной карты выполняется методом «LoadAsync(Guid id)», где «id» содержит идентификатор загружаемой диаграммы. Метод обращается к «DiagramsClient.GetAsync(id, versionId)», очищает текущее состояние диаграммы и заново формирует узлы и

связи в рабочем поле. Для восстановления узлов используется фабричный метод «NewNode(double x, double y, string type)», где «x» и «y» задают координаты узла, а «type» определяет его тип.

Дополнительно агент поддерживает операцию «SaveAsNewGraphAsync()», позволяющую сохранить текущую когнитивную карту как новый независимый граф с автоматически сгенерированным идентификатором. Это дает возможность формировать несколько вариантов когнитивных карт без потери ранее сохраненных результатов. Для выбора сохраненной карты используется правая выдвижная панель со списком когнитивных карт. В ней отображается таблица объектов «GraphSummaryDto», загружаемая методом «LoadMapsPickerData(TableState state)», где «state» содержит параметры состояния таблицы. Загрузка выполняется через вызов «DiagramsClient.SearchAsync(request)», где «request» задает параметры поиска и постраничной выдачи. Открытие выбранной карты реализуется методом «OnPickMapFromDrawer(GraphSummaryDto dto)», где «dto» содержит сведения о выбранной карте. В этом методе идентификатор карты сохраняется в поле «_pickedDiagramId», после чего запускается «LoadAsync(EffectiveDiagramId)».

Особое место в агенте когнитивного моделирования занимает функция формирования нового варианта математической модели на основе когнитивной карты. Эта задача реализуется методом «CreateVariantFromMapAsync()». На первом этапе метод создает полную копию исходной модели вызовом «CmapModelsClient.CopyFullModelAsync(request)», где «request» является объектом «CopyFullModelRequest» с идентификатором исходной модели «ModelId». Затем выполняется обход всех узлов диаграммы. Для каждого технологического узла извлекаются код переменной, нижняя и верхняя границы. Если для узла заданы корректировки, агент получает соответствующую переменную математической модели через вызов «CmapVariablesClient.Get2Async(code, newModelId)», где «code» содержит код переменной, а «newModelId» задает идентификатор созданной модели. После этого параметры переменной обновляются методом

«CmapVariabliesClient.UpdateAsync(variable.Id, request)», где «variable.Id» обозначает идентификатор изменяемой переменной, а «request» содержит новые значения ее параметров. Тем самым когнитивная карта используется не только как средство качественного описания сценария, но и как интерфейс задания параметрических изменений в формальной расчетной модели.

После формирования нового варианта модели агент пытается включить его в дерево сценария. Для этого проверяется наличие идентификатора сценария «ScenarioId», после чего формируется запрос «CreateScenarioModelNodeRequest», передаваемый в метод «CmapScenarioTreeClient.CreateAsync(req)». Параметр «req» содержит сведения о создаваемом узле сценарного дерева и связанной с ним модели. При успешном завершении операции вызывается событие «OnVariantCreated.InvokeAsync(newModelId)», где «newModelId» содержит идентификатор созданного варианта модели. Это позволяет внешнему агенту сценариев обновить свою структуру. За счет этого обеспечивается связь между когнитивной картой, вариантом математической модели и сценарием вычислительного эксперимента.

В агенте семантического моделирования реализована программная поддержка численного метода стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе когнитивных весов. Метод запускается из интерфейса когнитивной карты после задания узлов угроз и событий, целевых параметров модели и причинно-следственных связей между ними. Для каждой связи задаются вес влияния w , степень экспертной уверенности s , а также тип корректируемого параметра модели. В качестве таких параметров используются верхние и нижние границы переменных, коэффициенты целевой функции, а также верхние и нижние границы уравнений.

На программном уровне запуск метода связан с обработкой когнитивной карты и параметров расчетной модели. В запросе на выполнение расчета задаются идентификатор модели, идентификатор графа, число реализаций, параметры β и α , начальное значение генератора случайных чисел и перечень анализируемых федеральных округов. Эти данные используются для загрузки уравнений,

переменных, коэффициентов модели и сохраненного графа когнитивной карты. Затем выполняется выделение допустимых воздействий от узлов угроз и событий, сопоставление целевых концептов с переменными и уравнениями экономико-математической модели, а также формирование набора корректируемых параметров.

Для каждого корректируемого параметра рассчитываются агрегированный вес влияния W , агрегированная экспертная уверенность C , математическое ожидание смещения μ и среднее квадратическое отклонение σ . Далее выполняется базовый расчет и серия сценарных расчетов методом Монте-Карло. В каждой реализации значения параметров изменяются в соответствии с рассчитанными вероятностными характеристиками, после чего формируется и решается оптимизационная задача средствами Google OR-Tools Linear Solver. Результат каждой реализации включает значения целевых параметров, статус решения и данные балансовой интерпретации. На Рисунке 3.13 представлен фрагмент интерфейса выполнения численного метода.

The screenshot shows the MESI SB RAS software interface. On the left is a sidebar with icons for Threat, Event, and various parameters. The main area contains input fields for parameters like μ (0,035), σ (0,05), Random seed (42), and Regions (Напр.: 35 или 22,35. Пусто = все). A green button labeled 'ЗАПУСТИТЬ' (Run) is present. Below the button, the results section shows: Целевых параметров: 1, Расчетных точек: 11, Оптимальных решений: 11, and RunId: a44f04e5-e7f9-4b84-a07f-71fb2e5f17a7. At the bottom, there is a table titled 'КОГНИТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ' and 'БАЛАНСОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ'.

КОГНИТИВНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ **БАЛАНСОВАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ**

❗ Когнитивные воздействия показывают, как узлы Threat / Event изменяют параметры модели.
База — исходное значение параметра. **После Ψ** — значение после детерминированной когнитивной корректировки. **W** — агрегированный вес влияния. **C** — агрегированная уверенность. **μ** — среднее смещение. **σ** — стохастический разброс.

Источник	Код	Параметр	База	После Ψ	W	C	μ	σ
Уровень воды	4803510	Верхняя граница переменной	25,73	21,87	0,7	0,8	0,63	0,26

Рисунок 3.13 – Интерфейс представления когнитивных воздействий при выполнении численного метода

В верхней части формы задаются параметры расчета, включая число реализаций, значения β , α , начальное значение генератора случайных чисел и перечень федеральных округов. Во вкладке когнитивных воздействий отображаются источник воздействия, код целевого параметра модели, тип корректируемого параметра, базовое значение, значение после детерминированной когнитивной корректировки, агрегированный вес влияния, агрегированная уверенность, математическое ожидание смещения и среднеквадратическое отклонение.

По результатам серии расчетов формируются агрегированные балансовые показатели. Для каждого показателя сохраняются базовое значение, математическое ожидание по сценарным реализациям, отклонение от базового расчета, относительное отклонение, среднеквадратическое отклонение, минимальное и максимальное значения. В программной реализации предусмотрено сохранение расчетного запуска, состава целевых параметров, расчетных точек и агрегированных балансовых результатов. Это обеспечивает воспроизводимость вычислительного эксперимента и возможность последующего анализа полученных сценарных состояний.

Для последующей интерпретации результатов численного метода в программном комплексе реализовано табличное представление агрегированных балансовых показателей. Оно формируется после завершения серии сценарных реализаций и связывает результаты стохастической корректировки параметров экономико-математической модели с балансовыми характеристиками ТЭК. В данном представлении по каждому расчетному показателю фиксируются базовое детерминированное значение, среднее значение по множеству сценарных реализаций, абсолютное и относительное отклонения от базового состояния, среднеквадратическое отклонение, а также минимальное и максимальное значения. Такое представление позволяет оценивать не только направление и величину изменения показателей, но и устойчивость полученного результата относительно вариации сценарных воздействий. На Рисунке 3.14 приведен фрагмент балансовой интерпретации результатов численного метода.

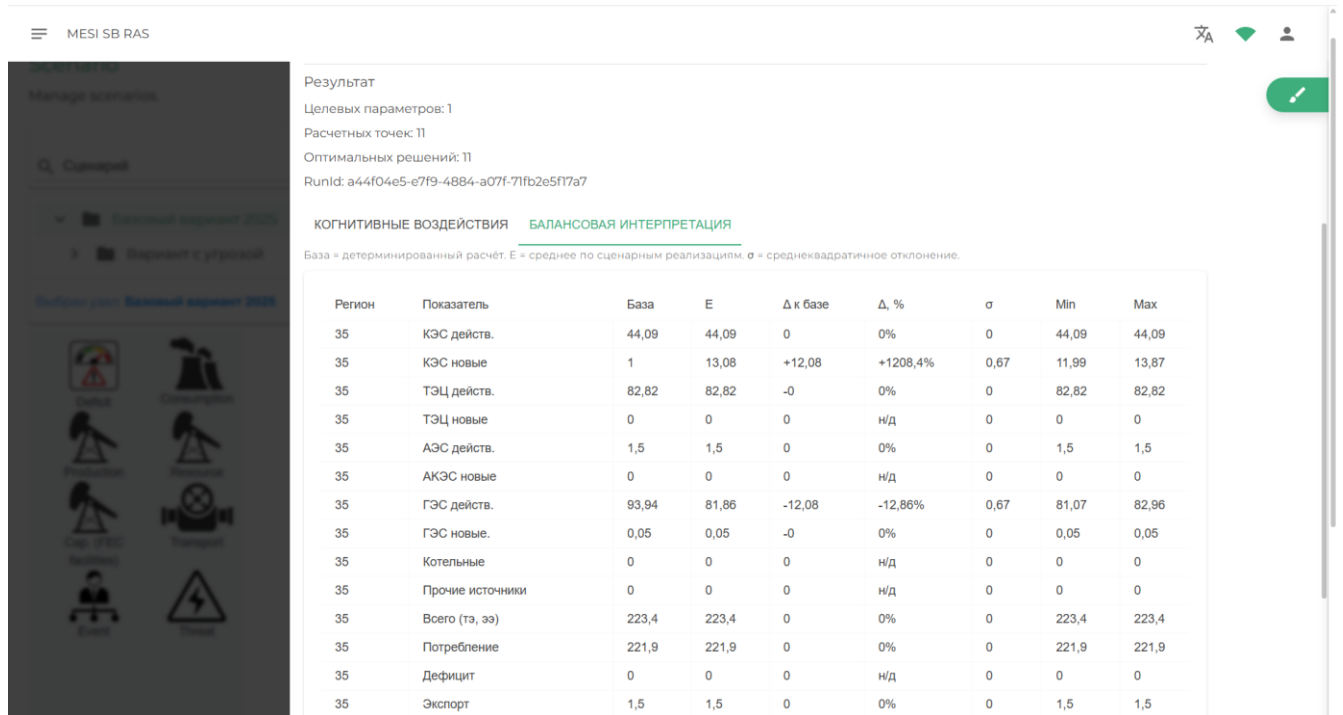


Рисунок 3.14 – Балансовая интерпретация результатов численного метода

Таблица отражает изменение расчетных показателей по выбранному федеральному округу и позволяет сопоставлять базовое состояние модели со средними значениями, полученными по множеству сценарных реализаций. Такое представление используется для оценки направления изменения расчетных показателей и устойчивости полученных результатов.

Таким образом, реализация численного метода в ПК «ИНТЭК-SAW» обеспечивает формализованный переход от экспертно заданных причинно-следственных связей когнитивной карты к количественной оценке сценарных состояний ТЭК. Связь между семантической моделью и расчетной постановкой задается через коды целевых параметров, веса влияния, экспертные уверенности и типы корректируемых ограничений. Результаты метода представляются в форме, пригодной для последующей интерпретации в составе вычислительного эксперимента.

Отдельный функциональный блок агента связан с автоматическим построением онтологии по выбранной отрасли и району. Данный режим запускается методом «RunOntologyGraphAsync()». Пользователь предварительно

задает тип ресурса и номер района через панель «MudPopover», после чего агент строит граф, используя уравнения и переменные математической модели. Внутри метода определяется спецификация «OntologyBuildSpec», задающая параметры построения онтологического графа. Затем вычисляются коды основных и дополнительных уравнений, загружаются связи между уравнениями и переменными методом «LoadEquationVariablesByEquationCodesAsync(equationCodes)», где «equation Codes» содержит набор кодов уравнений, подлежащих обработке. После этого автоматически создаются узлы и связи онтологического графа. Для формирования связей используются методы «AddRadialLink(source, target)» и «AddDeltaLink(source, target)», где «source» обозначает исходный узел, а «target» обозначает целевой узел. Пространственное размещение элементов выполняется алгоритмом «ApplyForceLayout(NodeModel? centerNode = null)», где «centerNode» задает центральный узел компоновки, а значение «null» означает отсутствие явно заданного центра. Тем самым агент семантического моделирования обеспечивает автоматизированный режим генерации содержательной структуры предметной области на основе параметров математической модели.

Важной особенностью реализации является поддержка модификации структуры связей путем вставки промежуточного узла в уже существующую связь. Для этого используется метод «InsertJunctionIntoSelectedLink()». Метод определяет середину выбранной связи и создает узел «JunctionNode», выполняющий функцию промежуточного элемента графа. Затем исходная связь удаляется, а вместо нее формируются две новые связи вызовом «CreateLinkBetween(source, target)», где «source» задает начальный узел связи, а «target» задает конечный узел. Такой механизм позволяет детализировать когнитивную карту и уточнять структуру причинно-следственных зависимостей без полного перестроения графа вручную.

С архитектурной точки зрения агент семантического моделирования представляет собой интерактивный графовый редактор с поддержкой прикладной логики. Его внутреннее состояние определяется полями «_diagram», «_selectedLink», «_selectedCustomLink», «_pickedDiagramId», «_mapsPickerOpen»,

«_mapsTable», «_mapsSearch», «_mapsPageSize», «_ontologyPopoverOpen», «_ontologyBuildInProgress», «_selectedSector», «_selectedRegion», а также рядом вспомогательных кэшей и служебных структур. Поле «_diagram» хранит объект графовой диаграммы, «_selectedLink» и «_selectedCustomLink» фиксируют выбранную связь, «_pickedDiagramId» содержит идентификатор выбранной карты, «_mapsPickerOpen» управляет состоянием панели выбора карт, «_mapsTable» содержит ссылку на таблицу карт, «_mapsSearch» хранит строку поиска, «_mapsPageSize» задает размер страницы, «_ontologyPopoverOpen» управляет панелью параметров построения онтологии, «_ontologyBuildInProgress» отражает состояние выполнения построения, «_selectedSector» и «_selectedRegion» задают выбранную отрасль и район.

На уровне внедрения зависимостей используются клиенты «IDiagramsClient», «IModelsClient», «IVariabliesClient», «IScenarioTreeClient», «IEquationVariabliesClient», а также сервисы «ISnackbar» и «IJSRuntime». Клиент «IDiagramsClient» обеспечивает взаимодействие с контуром хранения диаграмм, «IModelsClient» используется для работы с математическими моделями, «IVariabliesClient» обеспечивает доступ к переменным модели, «IScenarioTreeClient» используется для включения созданных вариантов в дерево сценария, а «IEquationVariabliesClient» обеспечивает получение связей между уравнениями и переменными. Сервисы «ISnackbar» и «IJSRuntime» применяются соответственно для пользовательских уведомлений и взаимодействия с функциями клиентской среды. Наличие этих компонентов показывает, что агент реализует не только графический интерфейс, но и взаимодействие с контуром хранения диаграмм, контуром математических моделей и контуром сценарного дерева.

Таким образом, агент семантического моделирования в ПК «ИНТЭК-SAW» реализует средства качественного описания исследуемой предметной области, построения и редактирования когнитивных карт, задания семантически интерпретируемых связей между концептами, сохранения и загрузки графовых структур, автоматизированного построения онтологического графа и формирования на основе когнитивной карты нового варианта математической

модели. Его программная реализация опирается на методы «OnDragStart(int key)», «OnDrop(DragEventArgs e)», «SaveAsync()», «SaveAsNewGraphAsync()», «LoadAsync(Guid id)», «BuildCurrentSnapshot()», «CreateVariantFromMapAsync()», «RunOntologyGraphAsync()», «InsertJunctionIntoSelectedLink()» и «ApplyForceLayout(NodeModel? centerNode = null)». Это подтверждает практическую реализованность данного агента как прикладного компонента, обеспечивающего согласование когнитивного, онтологического и расчетного представлений исследуемой системы.

Агент формирования отчётов предназначен для представления результатов вычислительных экспериментов и обеспечивает анализ полученных показателей развития топливно-энергетического комплекса в различных сценарных условиях. Данный агент реализует средства выбора сценария и модели, загрузки расчетных данных, их картографического отображения, а также представления результатов в форме детализированных балансовых таблиц. Тем самым обеспечивается переход от численных результатов расчета к их содержательной интерпретации и формируется инструментальная основа для анализа вариантов развития ТЭК и обоснования принимаемых решений.

Интерфейс агента федерального баланса реализован как отдельная веб-страница «/investitions/federal-balance». Доступ к странице разграничивается атрибутом «MustHavePermission(FSHAction.View, FSHResource.Models)», где «FSHAction.View» задает право просмотра, а «FSHResource.Models» указывает на ресурс, связанный с математическими моделями программного комплекса. Это обеспечивает ограничение доступа к балансовой информации в соответствии с правами пользователя.

На уровне внедрения зависимостей агент использует сервисы «IModelsClient», «IScenariosClient», «IScenarioTreeClient», «IEBTClient», «ISnackbar», «HttpClient» и «NavigationManager». Сервис «IModelsClient» применяется для получения сведений о математических моделях. Сервис «IScenariosClient» обеспечивает доступ к данным сценариев, а «IScenarioTreeClient» используется для работы со структурой сценарного дерева.

Сервис «IEBTCClient» предназначен для загрузки балансовых показателей с серверной стороны. Сервис «ISnackbar» обеспечивает вывод пользовательских уведомлений. Объект «HttpClient» используется для взаимодействия с внешними или внутренними HTTP-ресурсами, включая данные, необходимые картографическому компоненту. «NavigationManager» обеспечивает программную навигацию между страницами пользовательского интерфейса.

Такое сочетание зависимостей, представленное на Рисунке 3.15, отражает основную логику работы агента федерального баланса, включающую получение данных о сценариях и моделях, загрузку расчетных балансовых показателей, взаимодействие с картографическим компонентом и организацию пользовательской навигации.

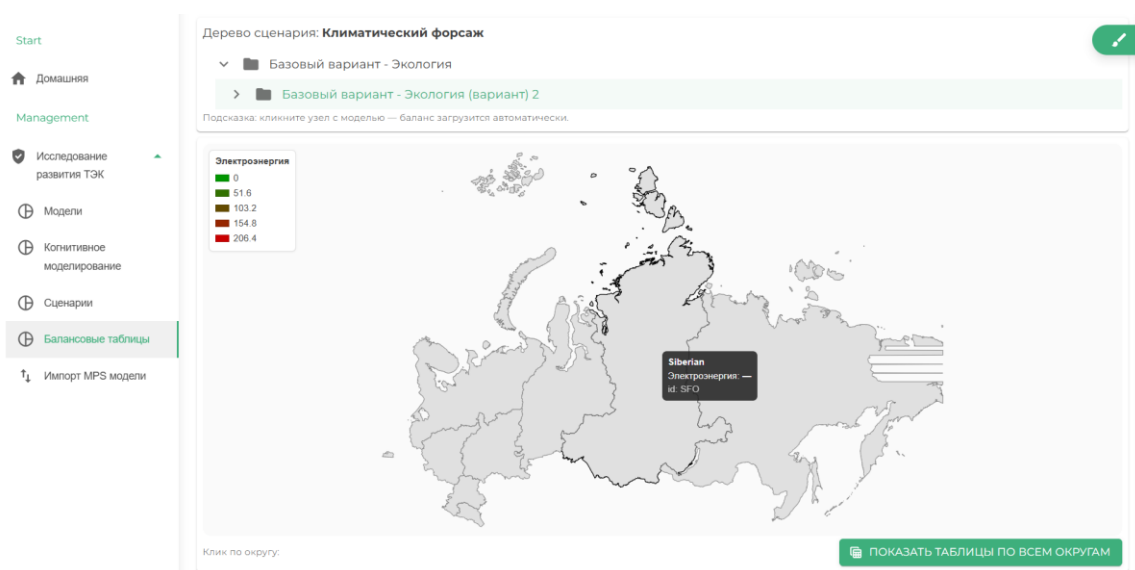


Рисунок 3.15 – Интерфейс агента формирования отчётов ПК «ИНТЭК-SAW»: выбор сценария, картографическое отображение балансовых показателей по федеральным округам и переход к детализированным таблицам

Верхняя часть интерфейса предназначена для выбора сценарного и модельного контекста. Пользователь может выбрать сценарий с последующим открытием дерева его вариантов либо выбрать модель напрямую. Поиск сценариев реализуется методом «SearchScenarios(string text)», где параметр «text» содержит введенный пользователем поисковый фрагмент. Метод формирует объект

«SearchScenariosRequest» и вызывает «ScenariosClient.SearchAsync(req)», где «req» представляет сформированный запрос поиска. Аналогично выбор модели реализуется методом «SearchModels(string text)», использующим объект «searchModelRequest» и вызов «ModelsClient.SearchAsync(req)». Для обоих режимов предусмотрены выдвижные панели расширенного поиска. Загрузка списка сценариев для панели выполняется методом «LoadScenarioPickerData(TableState state)», где «state» содержит текущее состояние таблицы, включая параметры постраничной выдачи. Загрузка списка моделей реализована методом «LoadModelsAsync(TableState state)» с аналогичным назначением входного параметра. Тем самым агент формирования отчетов поддерживает как быстрый интерактивный выбор сущностей, так и расширенный поиск с постраничной навигацией.

Если пользователь выбирает сценарий, далее активируется древовидное представление его структуры. Загрузка дерева выполняется методом «LoadScenarioTreeAsync()», внутри которого вызывается вспомогательный метод «FetchScenarioTreeAsync(Guid scenarioId)». Параметр «scenarioId» содержит идентификатор выбранного сценария, используемый при обращении к «ScenarioTreeClient.GetTreeAsync(scenarioId)». Полученные объекты «ScenarioModelNodeDto» преобразуются в древовидную структуру «ScenarioNodeVm» методом «MapNode(ScenarioModelNodeDto n)», где «n» обозначает узел сценарного дерева, полученный от серверной части. Визуализация дерева выполняется рекурсивным методом «BuildTreeItem(ScenarioNodeVm n)», формирующим визуальные элементы для узлов и их дочерних вариантов. При выборе узла дерева вызывается метод «OnScenarioNodeSelected(ScenarioNodeVm? node)». Обозначение «ScenarioNodeVm?» указывает, что параметр «node» может содержать выбранный узел либо пустое значение. Если узел связан с моделью, агент автоматически формирует объект «_selectedModel» и запускает загрузку балансов методом «LoadModelBalanceAsync()». Такое решение обеспечивает непосредственную связь между сценарием вычислительного эксперимента и системой аналитического представления результатов.

Центральным методом агента является «LoadModelBalanceAsync()». В нем выполняется загрузка агрегированных балансовых данных по федеральным округам для выбранной модели. Метод обращается к серверному API через вызов «EBTClient.GetFederalDistrictBalanceAsync(request)», где «request» представляет объект «GetFederalDistrictBalanceRequest» с идентификатором выбранной модели «_selectedModel.Id». Полученные данные используются в двух направлениях. Во-первых, на их основе формируется коллекция «_mapData», содержащая объекты «FederalDistrictChoropleth.DistrictBalance» с полями «Code», «Name», «Electricity» и «Heat». Поле «Code» задает код федерального округа, «Name» содержит его наименование, «Electricity» отражает показатель электрической энергии, а «Heat» содержит показатель тепловой энергии. Данная коллекция используется для картографической визуализации. Во-вторых, на основе тех же данных заполняется словарь «_emissionsByCode», содержащий показатели выбросов по каждому округу. В текущей реализации для каждого округа сохраняются значения «Co2Limit», «Co2Value», «PmLimit», «PmValue», «So2Limit», «So2Value», «NoxLimit» и «NoxValue». Эти поля отражают соответственно предельные и расчетные значения выбросов по выбросы CO₂, SO₂, NO_x и PM. Тем самым агент отчетности объединяет в одном интерфейсе энергетические и экологические характеристики расчетного варианта.

Картографическое представление результатов реализовано через компонент «FederalDistrictChoropleth». Этот компонент принимает на вход путь к географическим данным «GeoJsonUrl», набор значений «Data», режим отображения «Mode» и обратный вызов «OnDistrictClick». Параметр «GeoJsonUrl» задает расположение GeoJSON-файла, «Data» содержит балансовые значения по федеральным округам, «Mode» определяет отображаемый показатель, а «OnDistrictClick» используется для обработки выбора округа пользователем. Внутри компонента на этапе первого рендера выполняется загрузка GeoJSON-файла методом «Http.GetStringAsync(url)», где «url» содержит путь к файлу географических данных. Затем инициализируется JavaScript-компонент карты вызовом «JS.InvokeVoidAsync("fdMap.init", parameters)», где «parameters»

содержит данные, необходимые для построения карты. При последующих изменениях параметров вызывается «fdMap.update», что обеспечивает динамическое обновление карты без ее полной реконструкции. Таким образом, визуализация балансовых данных строится на сочетании серверной логики «Blazor» и клиентского JavaScript-слоя, отвечающего за отображение хлороплетной карты.

Выбор округа на карте инициирует вызов метода «DistrictClicked(string districtId)» в компоненте «FederalDistrictChoropleth», где «districtId» содержит идентификатор выбранного округа. После этого управление передается в родительский обработчик «OnDistrictClickAsync(string id)», где «id» содержит код выбранного округа. В этом методе определяется код округа, выбирается соответствующий объект «_selectedDistrict», извлекаются значения выбросов из словаря «_emissionsByCode», а затем запускается загрузка детализированных табличных данных. Для этого последовательно вызываются методы «LoadEbtDetailsAsync(code)» и «LoadRbtDetailsAsync(code)». Формирование детализированных балансовых таблиц, представленных на Рисунке 3.16, выполняется средствами программной реализации агента федерального баланса.

Метод `LoadEbtDetailsAsync(code)` обращается к `EBTClient.GetFederalDistrictEbtTableAsync(request)` и формирует набор строк `_districtRowsEbt`, содержащих показатели по электрической и тепловой энергии.

Метод `LoadRbtDetailsAsync(code)` использует `EBTClient.GetFederalDistrictRbtTableAsync(request)`, формирует набор `_districtRowsRbt` и передает его в процедуру `BuildRbtDetails()`, обеспечивающую преобразование исходных данных в структуру `RbtDetailRow` для последующего табличного представления. Тем самым агент обеспечивает переход от агрегированного картографического представления к детальному анализу по выбранному федеральному округу.

Показатель	Значение
КЭС действ.	34,16
КЭС новые	0,00
ТЭЦ действ.	77,46
ТЭЦ новые	0,00
АЭС действ.	1,50
АЭС новые	0,00
ГЭС действ.	93,28
ГЭС новые	0,00
Котельные	0,00
Прочие источники	0,00
Всего (тэ, ээ)	206,40
Потребление	204,10
Дефицит	0,00
Экспорт	1,00
Вывоз	1,30
Импорт	0,00
Ввоз	0,00
Заданная потребность	204,10
Избыток	0,00
Потребность в экспорте	1,00

Показатель	Значение
КЭС действ.	0,00
КЭС новые	0,00
ТЭЦ действ.	130,00
ТЭЦ новые	0,00
АЭС действ.	0,00
АЭС новые	0,00
ГЭС действ.	0,00
ГЭС новые	0,00
Котельные	97,00
Прочие источники	15,00
Всего (тэ, ээ)	242,00
Потребление	242,00
Дефицит	0,00
Экспорт	0,00
Вывоз	0,00
Импорт	0,00
Ввоз	0,00
Заданная потребность	242,00
Избыток	0,00
Потребность в экспорте	0,00

Рисунок 3.16 – Интерфейс агента формирования отчётов ПК «ИНТЭК-SAW»: представление результатов расчёта в виде таблиц по электроэнергии и теплоэнергии

Детальное табличное представление в агенте федерального баланса организовано в двух основных режимах. В первом режиме пользователь выбирает отдельный федеральный округ на карте и получает набор таблиц, относящихся только к выбранному округу. Во втором режиме пользователь может перейти к просмотру сводных таблиц по всем округам. Для этого используется кнопка «Показать таблицы по всем округам», нажатие которой приводит к вызову метода «ShowAllRegionsFromMapAsync()».

Метод «ShowAllRegionsFromMapAsync()» загружает все строки «EBT» и «RBT» для выбранной модели через методы «GetFederalDistrictEbtTableAsync(request)» и «GetFederalDistrictRbtTableAsync(request)», где «request» содержит идентификатор текущей модели. Полученные данные сохраняются в коллекциях «_allEbtRows» и «_allRbtRows». После этого формируется словарь «_rbtDetailsByRegion», в котором каждому федеральному округу ставится в соответствие набор детальных строк «RbtDetailRow». Такой режим имеет самостоятельное аналитическое значение, поскольку позволяет

сопоставлять округа в едином табличном формате без последовательного выбора каждого федерального округа на карте.

Формирование табличных структур внутри агента выполняется на основе внутренних вспомогательных моделей «DetailRow», «EbtRow», «RbtRow», «RbtDetailRow» и «EmissionsDto». Модель «DetailRow» используется для представления универсальной строки детализированной таблицы, «EbtRow» содержит данные по электро- и теплоэнергетическому балансу, «RbtRow» используется для строк ресурсного баланса, «RbtDetailRow» представляет итоговую строку детализированного ресурсного раздела, а «EmissionsDto» хранит показатели выбросов. Для упорядочивания энергетических показателей применяется массив «TableOrder» и словарь «TableOrderIndex». Они задают принятый порядок строк в таблицах и исключают произвольное расположение показателей при отображении результатов.

Для раздела «RBT» используется массив «_rbtDetailOrder», определяющий последовательность показателей ресурсного баланса. В него включаются такие позиции, как добыча, импорт, ввоз, распределение, действующие и новые мощности, суммарные показатели тепловых электростанций, котельных, энергопотребления, экспорта и дефицита. Метод «BuildRbtDetails()» преобразует исходные строки технологических данных в итоговые строки балансовой таблицы по каждому виду топлива. Метод «BuildRbtDetailsForRegion(List rows)» выполняет аналогичное преобразование для произвольного набора строк, где «rows» содержит строки ресурсного баланса выбранного федерального округа или группы федеральных округов. Именно этот метод используется при построении таблиц в режиме показа всех округов.

Таким образом, агент федерального баланса реализует не простую выдачу данных, полученных от серверной части, а их последующее структурирование в формах, пригодных для содержательного анализа. Пользователь получает возможность переходить от агрегированной карты к детальным таблицам по отдельному федеральному округу, а также просматривать сводный набор таблиц

по федеральным округам для сравнительной оценки результатов вычислительного эксперимента, как показано на Рисунке 3.17.

Показатель	Газ природный	Угли прочие	Уголь Донецкий	Уголь кузнецкий	Уголь экибаз	Уголь к/а	Уголь всего	Мазут
Добыча	6,10	23,60	0,00	86,60	0,00	24,30	134,50	0,00
Импорт	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Ввоз	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,58
Распределение	6,70	23,60	0,00	86,60	0,00	24,30	134,50	9,58
КЭС действ.	0,00	0,58	0,00	7,64	0,00	5,32	13,54	0,34
КЭС новые	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ТЭЦ действ.	0,00	19,14	0,00	22,64	0,00	1,91	43,69	1,02
ТЭЦ новые	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Всего ТЭС	0,00	19,72	0,00	30,28	0,00	7,23	57,23	1,36
Котельные	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Всего на энергетику (КПТ)	0,00	19,72	0,00	30,28	0,00	7,23	57,23	1,36
Потребление (факт)	6,70	0,00	0,00	9,00	0,00	3,00	12,00	2,70
Дефицит	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Экспорт (факт)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,20
Вывоз	0,00	3,88	0,00	47,32	0,00	14,07	65,27	1,32
Заданная потребность	6,70	0,00	0,00	9,00	0,00	3,00	12,00	2,70
Избыток	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Потребность в экспорте	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,20

Рисунок 3.17 – Интерфейс агента формирования отчётов ПК «ИНТЭК-SAW»: табличное представление балансовых показателей по котельно-печному топливу

Следует отметить, что агент формирования отчетов поддерживает не только табличное представление, но и переключение между различными аналитическими срезами. Переменная «_mode» управляет картографическим отображением и определяет, какой показатель используется для окраски карты: электрическая энергия или тепловая энергия. Переменные «_activeTab» и «_bottomTab» задают состояние вкладок в нижней части интерфейса, где размещаются таблицы «EBT» и «RBT». За счет этого пользователь может анализировать расчетные результаты в нескольких представлениях в пределах одного рабочего пространства.

С архитектурной точки зрения агент формирования отчетов представляет собой аналитический модуль пользовательского уровня. Он объединяет сценарный контекст, модельный контекст, картографическую визуализацию и табличную детализацию расчетных результатов. Его внутреннее состояние задается полями «_selectedScenario», «_scenarioRoots», «_selectedScenarioNode», «_selectedModel», «_mapData», «_selectedDistrict», «_districtRowsEbt», «_districtRowsRbt», «_rbtDetailRows», «_allEbtRows», «_allRbtRows», «_rbtDetailsByRegion»,

«_emissionsByCode», «_selectedEmissions», «_mode», «_showAllFromMap», а также служебными переменными, отвечающими за состояние интерфейса и загрузки данных. Поля «_selectedScenario», «_scenarioRoots» и «_selectedScenarioNode» используются для работы со сценарным деревом, «_selectedModel» задает текущую расчетную модель, «_mapData» содержит данные для картографического отображения, а «_selectedDistrict» фиксирует выбранный федеральный округ. Коллекции «_districtRowsEbt», «_districtRowsRbt» и «_rbtDetailRows» используются для детальных таблиц по отдельному округу. Коллекции «_allEbtRows», «_allRbtRows» и словарь «_rbtDetailsByRegion» обеспечивают режим просмотра данных по всем округам. Словарь «_emissionsByCode» и объект «_selectedEmissions» используются для отображения экологических показателей. Наличие этих структур показывает, что агент реализует прикладную логику анализа результатов, а не только визуальное отображение заранее подготовленных данных.

Таким образом, агент формирования отчетов в ПК «ИНТЭК-SAW» реализует средства представления и интерпретации результатов вычислительного эксперимента. Он обеспечивает выбор сценария и модели, загрузку агрегированных балансовых показателей, их картографическую визуализацию, детальный анализ по федеральным округам и формирование табличных представлений по электрической энергии, тепловой энергии и котельно-печному топливу. Его программная реализация опирается на методы «SearchScenarios(string text)», «LoadScenarioTreeAsync()», «OnScenarioNodeSelected(ScenarioNodeVm? node)», «SearchModels(string text)», «LoadModelBalanceAsync()», «OnDistrictClickAsync(string id)», «LoadEbtDetailsAsync(string code)», «LoadRbtDetailsAsync(string code)», «BuildRbtDetails()», «ShowAllRegionsFromMapAsync()» и «BuildRbtDetailsForRegion(List rows)». Это подтверждает практическую реализованность аналитического контура программного комплекса.

Агент-решатель предназначен для выполнения оптимизационных расчетов по сформированным вариантам экономико-математической модели ТЭК и

реализует внутренний вычислительный контур программного комплекса «ИНТЭК-SAW». В отличие от агентов, ориентированных на непосредственное взаимодействие с пользователем, данный агент не имеет собственного пользовательского интерфейса и функционирует как внутренний сервисный компонент, вызываемый из других модулей системы при необходимости проведения расчета. Его назначение состоит в автоматизированном преобразовании формализованного представления математической модели, включающего переменные, уравнения и коэффициентные связи между ними, в задачу линейного программирования, ее решении и сохранении полученных результатов в базе данных.

Программная реализация агента-решателя построена в рамках архитектурных подходов «CQRS» и «Mediator» и представлена обработчиком «CalcModelRequestHandler», принимающим запрос типа «CalcModelRequest». Входным параметром данного запроса является идентификатор модели «Id», по которому инициируется полный цикл вычислительной обработки. В состав внедряемых зависимостей входят репозитории «IRepositoryWithEvents», «IRepositoryWithEvents», «IRepositoryWithEvents», а также инфраструктурные компоненты прикладного слоя. Основная вычислительная логика сосредоточена в методе «Handle(CalcModelRequest request, CancellationToken ct)», где «request» содержит параметры расчета, а «ct» используется для прерывания асинхронной операции при отмене выполнения. В этом методе последовательно реализуются этапы загрузки структуры модели, построения расчетного представления, решения задачи и сохранения найденных значений переменных.

На первом этапе агент-решатель выполняет загрузку ограничений, переменных и коэффициентных связей модели. Для этого используются вызовы «ListAsync(new ListEquationsByModelIdRequestSpec(request.Id), ct)», «ListAsync(new ListVariablesByModelIdRequestSpec(request.Id), ct)» и «ListAsync(new ListEquationVariablesByModelIdRequestSpec(request.Id), ct)». В данных вызовах «request.Id» задает идентификатор рассчитываемой модели, а «ct» передает сигнал отмены операции. В результате из базы данных извлекается

реляционное описание модели, достаточное для последующего преобразования в задачу линейного программирования. Далее выполняется индексация данных: формируются словари «varById», «varByName», а также структура «eqVarsByEqId», группирующая коэффициентные связи по идентификаторам уравнений. Такая организация обеспечивает быстрый доступ к элементам модели при формировании ограничений и целевой функции.

Вычислительное ядро агента основано на библиотеке «Google OR-Tools», предназначенной для решения задач исследования операций и математической оптимизации. В составе библиотеки используется интерфейс «MPSolver», поддерживающий решение линейных и смешанных целочисленных задач. Выбор данной библиотеки в ПК «ИНТЭК-SAW» обусловлен ее соответствием структуре используемой экономико-математической модели ТЭК: модель представляется через переменные, ограничения, коэффициенты и целевую функцию. Кроме того, «OR-Tools» имеет .NET-интерфейс, что позволяет интегрировать вычислительный модуль в программную реализацию комплекса на языке «C#».

В текущей реализации агент-решатель использует решатель «SCIP», подключаемый через библиотеку «OR-Tools». Выбор «SCIP» обусловлен его ориентацией на задачи линейного и смешанного целочисленного программирования, а также возможностью последующего расширения расчетной постановки без изменения общей схемы вычислений. После создания объекта решателя агент формирует переменные. Для каждой переменной предметной модели вызывается «solver.MakeNumVar(lb, ub, v.Name)», где «lb» и «ub» задают нижнюю и верхнюю границы, полученные из значений «v.LowBound» и «v.UpBound», а «v.Name» задает имя переменной. Созданные переменные аккумулируются в словаре «sVarByName».

Далее в цикле по ограничениям создаются объекты «constraint = solver.MakeConstraint(lb, ub, eq.Name ?? string.Empty)». Здесь «lb» и «ub» обозначают нижнюю и верхнюю границы ограничения, «eq.Name» задает имя уравнения, а выражение «string.Empty» используется при отсутствии имени. Для каждого коэффициентного члена вызывается

«constraint.SetCoefficient(sVarByName[v.Name], ev.Coefficient)», где «sVarByName[v.Name]» указывает переменную решателя, а «ev.Coefficient» задает коэффициент ее участия в соответствующем ограничении. Тем самым агент автоматически преобразует реляционное описание модели в стандартное представление линейной задачи в терминах переменных и ограничений «OR-Tools».

Целевая функция формируется посредством объекта «objective = solver.Objective()». Для каждой переменной задается коэффициент стоимости вызовом «objective.SetCoefficient(sVar, coeff)», где «sVar» представляет переменную решателя, а «coeff = varByName[name].CoefficientCost» содержит коэффициент целевой функции, извлеченный из предметной модели. После задания всех коэффициентов вызывается «objective.SetMinimization()». Тем самым агент-решатель реализует задачу минимизации суммарных приведенных затрат, соответствующую исходной постановке экономико-математической модели.

После задания целевой функции и системы ограничений запускается решение задачи методом «solver.Solve()». Дополнительно в реализации задано ограничение на время расчета через вызов «solver.SetTimeLimit(300_000)», где значение «300_000» соответствует предельному времени работы решателя в миллисекундах. Корректным результатом считается только статус «OPTIMAL», обозначающий найденное оптимальное решение. При получении иного статуса формируется исключение, что предотвращает сохранение неполных или неустойчивых вычислительных результатов.

После получения оптимального решения агент выполняет обратное отображение результатов в структуру предметной модели. Для каждой переменной извлекается значение «sVarByName[v.Name].SolutionValue()», после чего вызывается метод «v.Update(value)», записывающий найденный результат в доменную сущность. Завершается процедура пакетным обновлением базы данных через «_repositoryVar.UpdateRangeAsync(variables, ct)», где «variables» содержит набор обновленных переменных, а «ct» передает сигнал отмены асинхронной операции. Тем самым агент-решатель реализует полный вычислительный цикл: от

извлечения формализованных данных модели до сохранения результатов расчета, которые далее могут использоваться агентами сценариев, семантического моделирования и формирования отчетов.

С архитектурной точки зрения агент-решатель представляет собой внутренний вычислительный модуль, не зависящий от интерфейсного уровня и функционирующий как сервисная подсистема программного комплекса. Его вызов осуществляется из других компонентов, в частности из агента формирования моделей, где предусмотрен метод «OnCalcAsync(ModelDto model)». Данный метод формирует запрос «CalcModelRequest» и передает его серверному API. Такое разделение позволяет разграничить функции подготовки модели, задания сценария, проведения расчета и интерпретации результатов, что соответствует модульной организации ПК «ИНТЭК-SAW».

Преимуществами использования библиотеки «OR-Tools» в составе агента-решателя являются поддержка стандартного аппарата линейной оптимизации, наличие .NET-обертки для интеграции с «С#»-приложением, модульность, переносимость и возможность расширения вычислительного контура при переходе к более сложным постановкам задач. Кроме того, библиотека предоставляет единый программный интерфейс для различных классов оптимизационных задач и решателей, что создает основу для последующего развития комплекса без изменения общей архитектуры вычислительного модуля.

Таким образом, агент-решатель в ПК «ИНТЭК-SAW» реализует программно завершенный механизм автоматизированного выполнения оптимизационных расчетов по экономико-математической модели ТЭК. Его реализация опирается на обработчик «CalcModelRequestHandler», метод «Handle(CalcModelRequest request, CancellationToken ct)», структуры индексации «varById», «varByName», «eqVarsByEqId», создание решателя «Solver.CreateSolver("SCIP")», формирование переменных через «MakeNumVar», ограничений через «MakeConstraint» и «SetCoefficient», целевой функции через «Objective» и «SetMinimization», запуск решения через «Solve», а также сохранение результатов через «Update» и «UpdateRangeAsync». Отсутствие собственного пользовательского интерфейса в

данном случае является следствием специализированной роли данного компонента как внутреннего вычислительного агента, обеспечивающего выполнение ключевой расчетной процедуры в составе единой интеллектуальной среды прогнозных исследований ТЭК.

3.3. Технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК, интегрирующая семантическое и математическое моделирование

Для поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК разработана технология, которая реализует алгоритм предлагаемых методик с использованием разработанного интеллектуального программного комплекса. Интеграция этапов технологии и компонентов интеллектуального программного комплекса представлена в Таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Этапы технологии исследования направления развития ТЭК, интегрирующей семантическое и математическое моделирование

№	Этапы технологии	Инструментальные средства	Результаты этапа
1	Построение экономико-математической модели	Агент построения моделей	Модель состояния ТЭК
2	Построение онтологии	Агент семантического моделирования	Онтологическая модель состояния ТЭК
3	Формирование когнитивной карты	Агент семантического моделирования	Когнитивная карта исследования
4	Формирование вычислительного сценария	Агент формирования сценариев; Агент формирования информационных моделей; Агент семантического моделирования	Вычислительный сценарий; Когнитивные карта развития ТЭК в условиях возмущений и управлений
5	Поиск оптимального решения	Агент «Решатель»	Оптимальные значения переменных вариантов моделей сценария
6	Интерпретация результатов	Агент формирования отчётов/агент семантического моделирования	Балансовые таблицы/когнитивные карты с числовыми значениями

В основу технологии положен последовательный переход от построения расчетной модели ТЭК к формированию семантических моделей, заданию вычислительного сценария и последующей оптимизации. Такое построение обеспечивает согласование экспертного описания предметной области с параметрами экономико-математической модели. Результаты расчета возвращаются в форму балансовых таблиц и когнитивных карт с числовыми значениями, что обеспечивает их содержательную интерпретацию. Тем самым технология обеспечивает согласование этапов качественного анализа, количественного расчета и представления результатов.

Предлагаемая технология рассчитана на следующие группы пользователей:

- инженер по знаниям в энергетике (эксперт), например эксперт в области энергетической безопасности;
- аналитик, в качестве которого может выступать инженер по знаниям;

На Рисунке 3.18 представлена модель бизнес-процесса технологии поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с использованием математических и семантических моделей в нотации BPMN.

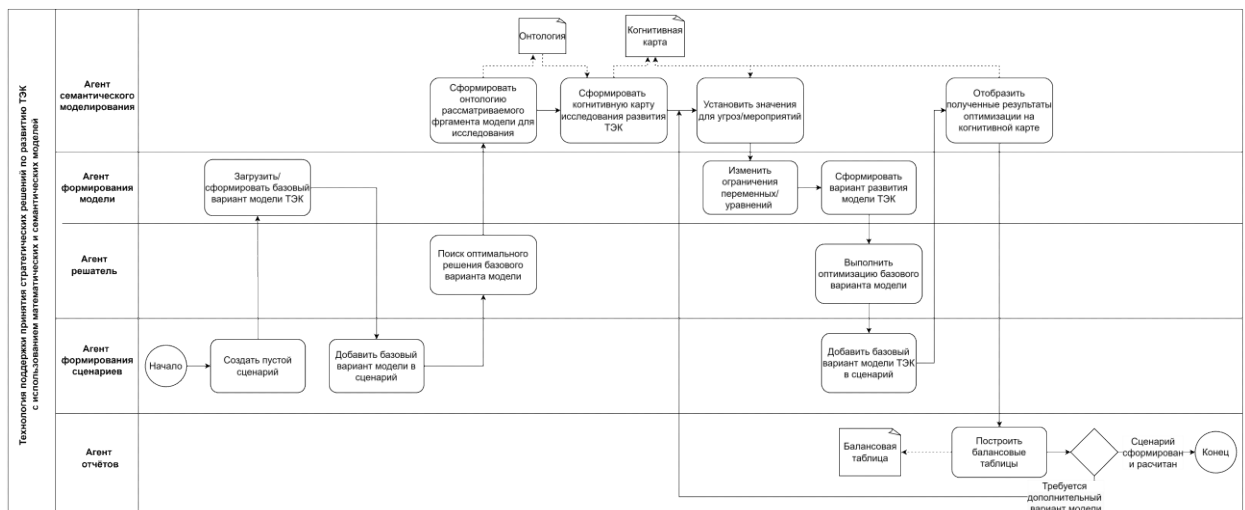


Рисунок 3.18 – Моделирование бизнес-процесса технологии поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с использованием математических и семантических моделей в нотации BPMN

Технология включает в себя 6 основных этапов, которые представлены ниже.

Этап 1. На первом этапе осуществляется выбор паттерна модели, предназначенного для проведения исследования, а также формирование технологических словарей. Далее определяется состав переменных и выполняется построение системы уравнений, определяется тип целевой функции и устанавливается её тип (минимизация либо максимизация). Результатом данного этапа является сформированная экономико-математическая модель топливно-энергетического комплекса.

Этап 2. На втором этапе эксперт-исследователь выполняет структурирование знаний об отношениях между элементами модели, полученной на предыдущем этапе, в виде графовой структуры, где вершины соответствуют факторам модели, а рёбра отражают отношения между ними. Итогом этапа является онтологическая модель ТЭК, которая в дальнейшем используется при построении когнитивных карт.

Этап 3. На третьем этапе осуществляется построение когнитивной модели, базирующейся на онтологической модели ТЭК, сформированной на этапе 2. Исследователь посредством интерфейса отбирает вершины онтологической модели и переносит их в рабочую область, после чего дополняет модель новыми вершинами, описывающими факторы, влияющие на развитие ТЭК, но не входящими непосредственно в исходную модель. Между добавленными вершинами и множеством вершин модели ТЭК (ограничениями, уравнениями и/или переменными) устанавливаются причинно-следственные связи, значения которых могут задаваться знаками, функциональными зависимостями или весовыми коэффициентами. Результатом этапа является когнитивная модель развития ТЭК.

Этап 4. На четвёртом этапе на основе полученной когнитивной модели формируется упорядоченная последовательность вариантов модели ТЭК с использованием когнитивных карт. Исследователь задаёт исходные значения вершинам когнитивной карты, характеризующим факторы влияния на развитие ТЭК, формируя тем самым базовый вариант модели. Последующее изменение

значений указанных факторов приводит к перерасчёту ограничений, уравнений и переменных модели в соответствии с заданными функциональными зависимостями. Результатом этапа является вычислительный сценарий развития ТЭК.

Этап 5. На пятом этапе выполняется оптимизация сформированного вычислительного сценария. Итогом является оптимизированный расчётный сценарий развития ТЭК.

Этап 6. Заключительный этап включает построение балансовых таблиц по топливно-энергетическим ресурсам (ТЭР) для каждого варианта модели, а также формирование когнитивных карт, в вершинах которых представлены числовые значения показателей, характеризующих ТЭР.

3.4. Апробация разработанного методического и программного обеспечения

В данном разделе представлена апробация разработанного программного комплекса «ИНТЭК-SAW», предложенного численного метода стохастической корректировки параметров экономико-математической модели, а также технологии проведения вычислительных экспериментов, основанной на согласованном использовании семантического и математического моделирования при исследовании развития ТЭК с позиции обеспечения ЭБ.

Апробация проводится на серии вычислительных экспериментов, отражающих различные типы угроз энергетической безопасности, включая экологические, природные и техногенные воздействия. Рассматриваемые эксперименты ориентированы на анализ изменений структуры энергетического баланса, перераспределения нагрузки между видами генерации, а также возможной корректировки параметров развития топливно-энергетического комплекса в условиях действия возмущающих факторов различной природы.

Проведение вычислительных экспериментов на основе множества сценарных расчетов позволяет оценить не только изменение отдельных балансовых

показателей, но и вариативность возможных состояний ТЭК, обусловленную неопределенностью внешних условий и экспертных оценок. Это обеспечивает переход от анализа единичного детерминированного варианта к исследованию множества допустимых состояний ТЭК и позволяет выявить особенности ее реакции на рассматриваемые угрозы.

Полученные результаты позволяют оценить работоспособность предложенных методических и программных решений при исследовании влияния различных угроз на развитие ТЭК.

3.4.1. Вычислительный эксперимент с угрозой «Выбросы CO₂»

Для апробации предложенной технологии и разработанного численного метода проведен вычислительный эксперимент по исследованию влияния ужесточения ограничения по выбросам CO₂ на параметры топливно-энергетического баланса. Основным расчетным районом являлся Сибирский федеральный округ. Дополнительно анализировался Центральный федеральный округ для изучения межрегиональных эффектов и перераспределения ресурсов.

Исходное состояние фиксировалось по базовым балансовым таблицам. В Таблице 3.3 представлены показатели генерации электро- и теплоэнергии до и после детерминированного расчета с ужесточением ограничения по выбросам CO₂. Для Сибирского федерального округа показатели электроэнергии (Всего) составили 206,5 млрд кВт·ч в базовом варианте и 204,9 млрд кВт·ч в варианте развития. Потребление электроэнергии составило 204,1 млрд кВт·ч в обоих вариантах, дефицит увеличился с 0,0 до 0,2 млрд кВт·ч, экспорт снизился с 1,0 до 0,8 млрд кВт·ч. По теплоэнергии (Всего) значения остались на уровне 242,0 млн Гкал, дефицит отсутствовал.

Таблица 3.3 – Показатели баланса электро- и теплоэнергии по федеральным округам до и после ужесточения ограничения по выбросам CO₂ в Сибирском федеральном округе

Регион	Показатель	Базовый вариант	Вариант с угрозой
Сибирский ФО	Электроэнергия (Всего)	206,5	204,9
Сибирский ФО	Электроэнергия (Потребление)	204,1	204,1
Сибирский ФО	Электроэнергия (Дефицит)	0,0	0,2
Сибирский ФО	Электроэнергия (Экспорт)	1,0	0,8
Сибирский ФО	Теплоэнергия (Всего)	242,0	242,0
Сибирский ФО	Теплоэнергия (Потребление)	242,0	242,0
Центральный ФО	Электроэнергия (Всего)	194,2	194,2
Центральный ФО	Электроэнергия (Потребление)	183,0	183,0
Центральный ФО	Электроэнергия (Дефицит)	0,0	0,0
Центральный ФО	Электроэнергия (Экспорт)	7,5	7,5
Центральный ФО	Теплоэнергия (Всего)	323,0	323,0
Центральный ФО	Теплоэнергия (Потребление)	323,0	323,0

В Таблице 3.4 представлены изменения использования котельно-печного топлива. Использование угля всего снизилось с 57,2 до 12,7 млн т у.т., использование природного газа увеличилось с 0,0 до 25,9 млн т у.т., использование мазута увеличилось с 1,4 до 22,0 млн т у.т.

Таблица 3.4 – Использование котельно-печного топлива и природного газа по федеральным округам до и после снижения CO₂ по Сибирскому ФО

Регион	Показатель	Базовый вариант	Вариант с угрозой
Сибирский ФО	Газ природный (Всего на энергетику)	0,0	25,9
Сибирский ФО	Уголь всего (Всего на энергетику)	57,2	12,7
Сибирский ФО	Мазут (Всего на энергетику)	1,4	22,0

Продолжение таблицы 3.4

Центральный ФО	Газ природный (Всего на энергетику)	68,2	46,9
Центральный ФО	Уголь всего (Всего на энергетику)	5,2	27,3
Центральный ФО	Мазут (Всего на энергетику)	0,1	0,0

Для Центрального федерального округа показатели электроэнергии (Всего) остались на уровне 194,2 млрд кВт·ч, потребление 183,0 млрд кВт·ч, дефицит отсутствовал, экспорт 7,5 млрд кВт·ч. Теплоэнергия (Всего) составила 323,0 млн Гкал при полном покрытии потребности. В Таблице 3.4 использование природного газа в Центральном федеральном округе снизилось с 68,2 до 46,9 млн т у.т., использование угля всего увеличилось с 5,2 до 27,3 млн т у.т., использование мазута снизилось с 0,1 до 0,0 млн т у.т.

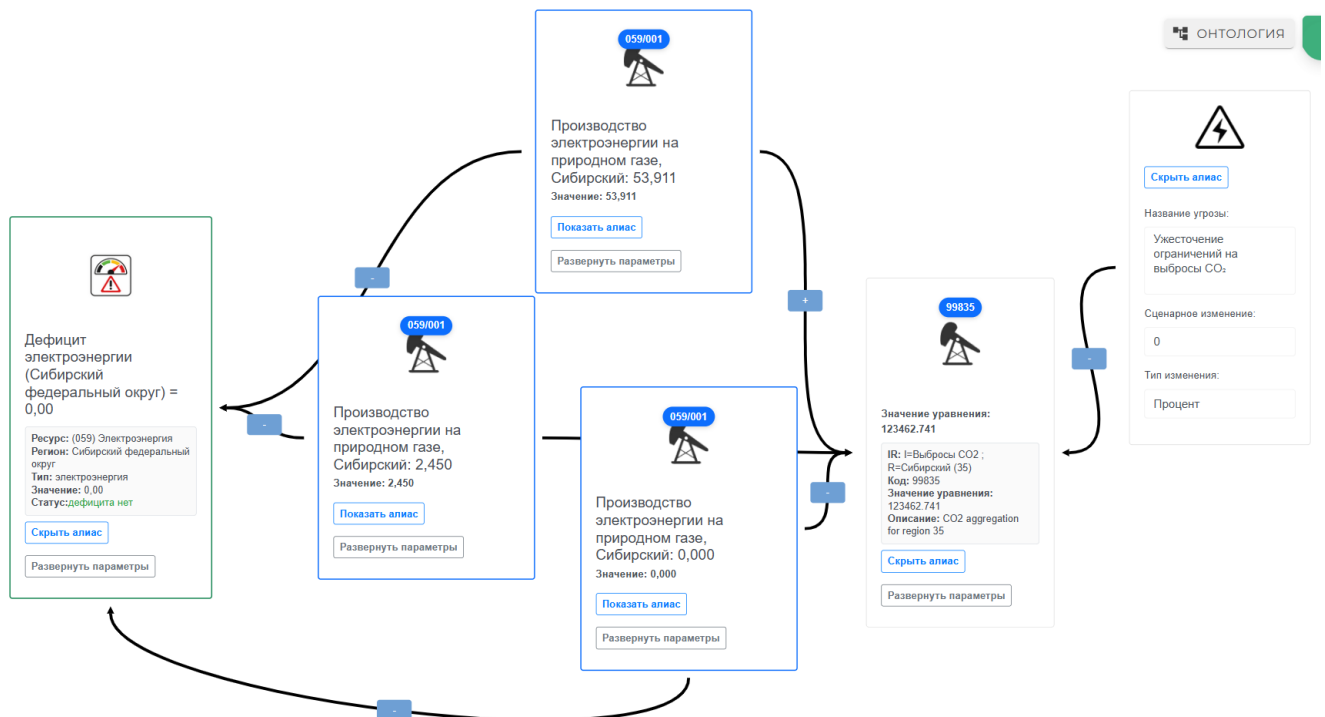


Рисунок 3.19 – Когнитивная карта вычислительного эксперимента по ограничению выбросов CO₂ в Сибирском федеральном округе, базовый вариант

В базовом варианте когнитивная карта отражает исходное состояние расчетной схемы до реализации сценарного воздействия. Ограничение по

выбросам CO₂ не изменено, дефицит электроэнергии в Сибирском федеральном округе отсутствует. Связанные показатели производства электроэнергии на природном газе и прочих источниках представлены как элементы, влияющие на состояние электроэнергетического баланса округа.

После задания сценарного воздействия выполняется корректировка ограничения по выбросам CO₂ в Сибирском федеральном округе на 3,6 %. На когнитивной карте показано изменение значения соответствующего параметра и возникновение ненулевого дефицита электроэнергии. Это отражает переход от исходного состояния к варианту развития, в котором ужесточение экологического ограничения влияет на электроэнергетический баланс округа.

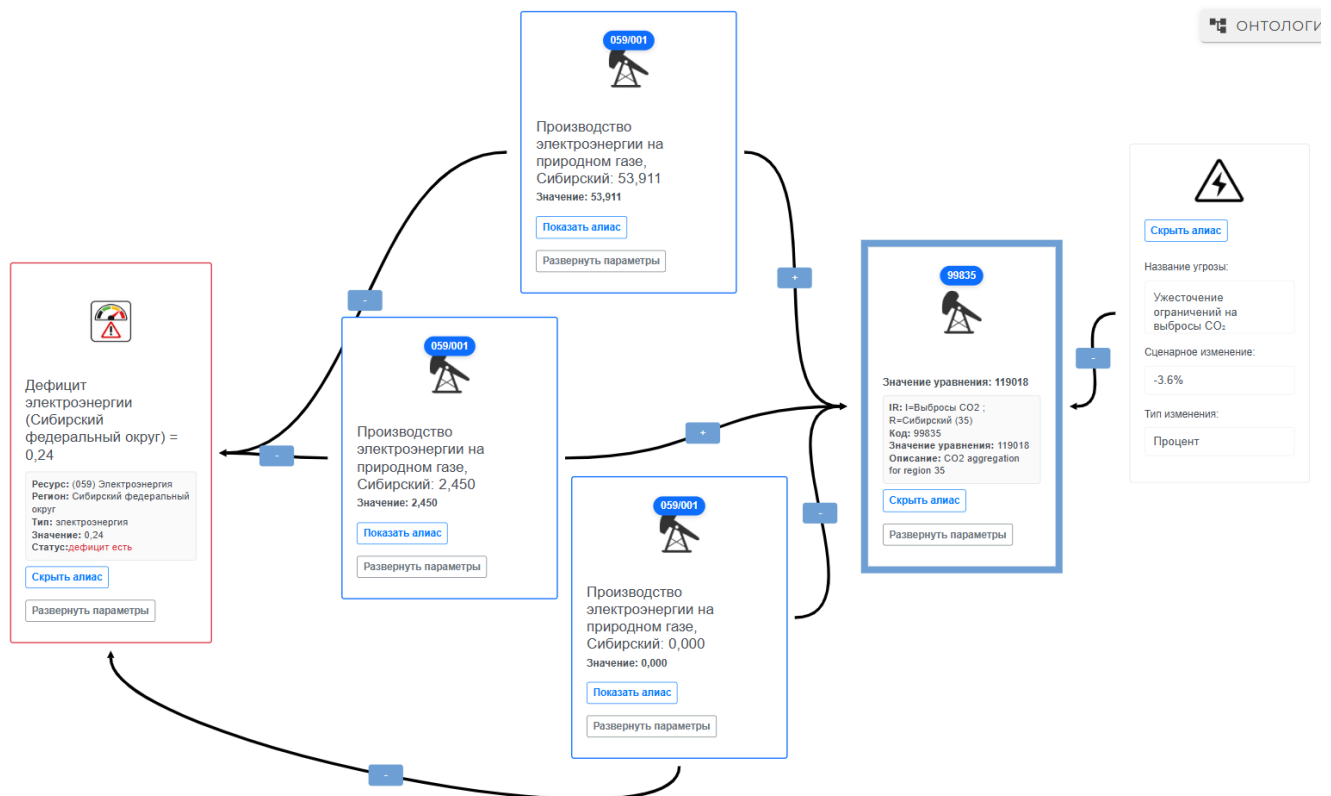


Рисунок 3.20 – Когнитивная карта вычислительного эксперимента по ограничению выбросов CO₂ в Сибирском федеральном округе, вариант развития

Результаты детерминированного расчета использовались для последующего формирования множества стохастических реализаций. Для вычислительного экс-

перимента с ужесточением ограничения по выбросам CO_2 было сформировано множество из 100 расчетных реализаций. В расчетах использовались следующие параметры стохастической корректировки: коэффициент масштаба $\beta = 0,035$, коэффициент неопределенности $\alpha = 0,06$, вес воздействия $W = 0,7$, степень уверенности $C = 0,8$. При снижении допустимого уровня выбросов CO_2 на 3,6 % расчетный объем выбросов в Сибирском федеральном округе составил 119 018,0 тыс. т CO_2 . Для данного варианта расчета общее производство электроэнергии в Сибирском федеральном округе составило 204,9 млрд кВт·ч, дефицит электроэнергии составил 0,2 млрд кВт·ч, экспорт электроэнергии составил 0,8 млрд кВт·ч. Потребность в теплоэнергии была покрыта полностью, общий объем производства теплоэнергии составил 242,0 млн Гкал. Для Сибирского федерального округа применение численного метода стохастической корректировки позволило оценить распределение показателей использования котельно-печного топлива при варьировании экологического ограничения. Статистические характеристики расчетных реализаций приведены в Таблице 3.5. По показателю «Всего на энергетику (КПТ)» для продукта «Уголь всего» математическое ожидание составило 53,0 млн т у.т., среднеквадратичное отклонение 10,1 млн т у.т., диапазон расчетных значений составил от 12,6 до 59,4 млн т у.т.

Таблица 3.5 – Статистические характеристики изменения использования котельно-печного топлива в Сибирском федеральном округе при варьировании ограничения по выбросам CO_2

Продукт	Показатель	Мат. ожидание	Дисперсия	Мин.	Макс.
Всего углей	Всего на энергетику (КПТ)	53,0	10,1	12,6	59,4
Уголь Кузнецкий	Всего на энергетику (КПТ)	27,1	6,6	8,1	32,5
Уголь Кузнецкий	Вывоз	50,6	6,6	45,1	69,5
Природный газ	Всего на энергетику (КПТ)	4,0	7,9	0,0	25,9

Для продукта «Уголь кузнецкий» оценка математического ожидания составила 27,1 млн т у.т., среднеквадратичное отклонение 6,6 млн т у.т., диапазон значений от 8,1 до 32,5 млн т у.т. По строке «Вывоз» кузнецкого угля математическое ожидание составило 50,6 млн т у.т. Использование природного газа и мазута увеличилось. По строке «Всего на энергетику (КПТ)», продукт «Газ природный», математическое ожидание составило 4,0 млн т у.т., среднеквадратичное отклонение 7,9 млн т у.т., диапазон от 0,0 до 25,9 млн т у.т. Для продукта «Мазут» оценка математического ожидания составила 2,2 млн т у.т., среднеквадратичное отклонение 4,1 млн т у.т., диапазон значений от 0,9 до 22,0 млн т у.т.

На Рисунке 3.21 показано изменение структуры потребления котельно-печного топлива в Сибирском федеральном округе при варьировании ограничения по выбросам CO₂.

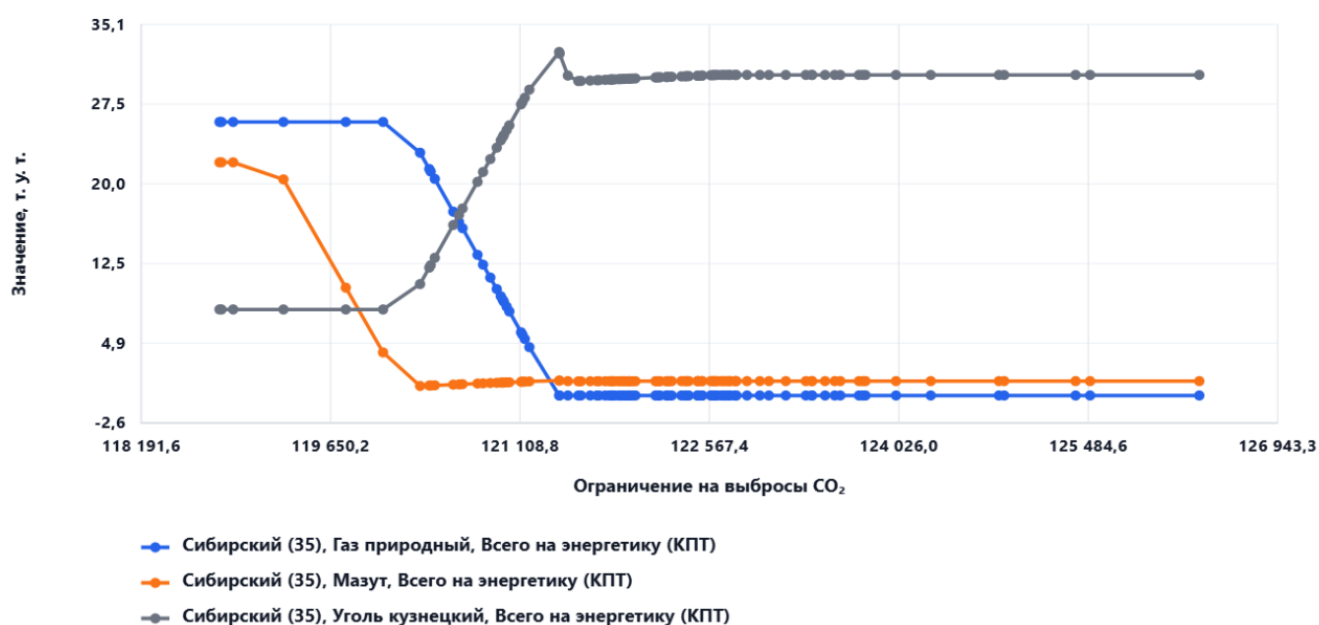


Рисунок 3.21 – Изменение структуры потребления котельно-печного топлива в Сибирском федеральном округе

Для Центрального федерального округа численный метод показал перераспределение топливных ресурсов. В Таблице 3.6, строка «Всего на

энергетику (КПТ)», продукт «Газ природный», математическое ожидание составило 65,4 млн т у.т., среднеквадратичное отклонение 6,3 млн т у.т., диапазон от 47,0 до 71,3 млн т у.т. Продукт «Уголь всего» имел математическое ожидание 8,4 млн т у.т., среднеквадратичное отклонение 6,6 млн т у.т., диапазон от 3,0 до 27,3 млн т у.т. Аналогичное распределение наблюдается для «Уголь кузнецкий».

Таблица 3.6 – Статистические характеристики изменения использования котельно-печного топлива в Центральном ФО при варьировании ограничения по выбросам CO₂

Продукт	Показатель	Мат. ожидание	Дисперсия	Мин.	Макс.
Природный газ	Всего на энергетику (КПТ)	65,4	6,3	47,0	71,3
Уголь, всего	Всего на энергетику (КПТ)	8,4	6,6	3,0	27,3
Уголь Кузнецкий	Всего на энергетику (КПТ)	8,4	6,6	3,0	27,3

На Рисунке 3.22 показано изменение использования основных видов котельно-печного топлива в Центральном федеральном округе при варьировании ограничения по выбросам CO₂. Полученные зависимости отражают перераспределение топливной структуры, при котором использование природного газа возрастает и после достижения определенного уровня стабилизируется, тогда как использование кузнецкого угля существенно снижается. Использование мазута во всех расчетных реализациях остается на низком уровне и не оказывает существенного влияния на структуру топливного баланса. Для Центрального федерального округа это указывает на выраженный эффект замещения угольного топлива природным газом как один из механизмов адаптации топливно-энергетического баланса к изменению экологического ограничения. Таким образом, численный метод позволяет оценить диапазон возможных состояний топливно-энергетического баланса, математическое ожидание и вариацию ключевых показателей по Сибирскому и Центральному федеральным

округам, демонстрируя адаптацию структуры топлива и перераспределение ресурсов между округами.

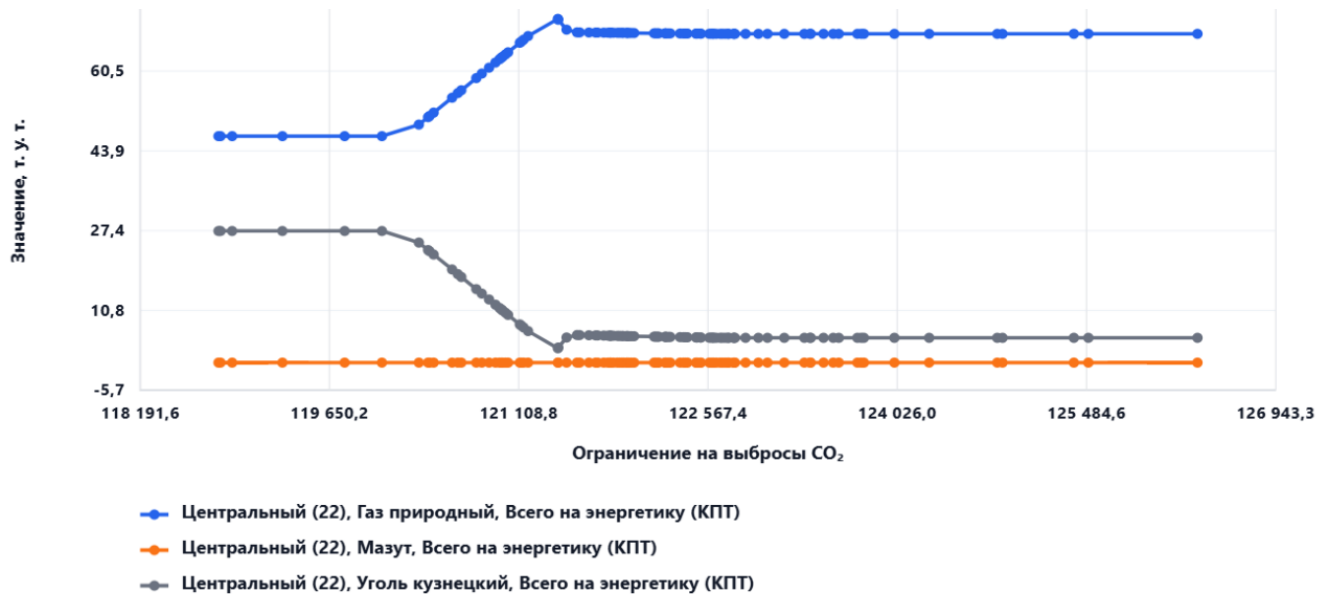


Рисунок 3.22 – Изменение структуры потребления котельно-печного топлива в Центральном федеральном округе

3.4.2. Вычислительный эксперимент с природной угрозой «Маловодье» в Сибирском ФО

Для апробации предложенной технологии и разработанного численного метода проведен вычислительный эксперимент по исследованию влияния природной угрозы маловодья на параметры топливно-энергетического баланса Сибирского федерального округа. Возмущающее воздействие задавалось снижением доступности гидроэнергетических ресурсов на 15 %, что в расчетной модели отражалось уменьшением выработки действующих гидроэлектростанций.

Исходное состояние фиксировалось по базовым балансовым таблицам. В Таблице 3.7 и Таблице 3.8 представлены показатели базового варианта и варианта развития после детерминированного расчета с учетом снижения гидрогенерации. В Таблице 3.7 для Сибирского федерального округа значение показателя

«Электроэнергия (ГЭС действующие)» снизилось с 93,9 до 79,9 млрд кВт·ч. Одновременно значение показателя «Электроэнергия (КЭС новые)» увеличилось с 1,0 до 15,1 млрд кВт·ч. Это показывает, что выпадающая выработка действующих ГЭС компенсируется вводом и загрузкой новых конденсационных электростанций.

Таблица 3.7 – Изменение выработки электроэнергии при снижении гидрогенерации в Сибирском ФО

Регион	Показатель	Базовый вариант	Вариант с угрозой
Сибирский ФО	Электроэнергия (ГЭС действующие)	93,94	79,85
Сибирский ФО	Электроэнергия (КЭС новые)	1,00	15,09

Изменение структуры производства электроэнергии сопровождалось изменением топливного баланса. По Таблице 3.8 использование канско-ачинского угля на новых КЭС увеличилось с 0,3 до 4,5 млн т у.т. Аналогичное изменение зафиксировано по показателю «Уголь всего (КЭС новые)», значение которого также увеличилось с 0,3 до 4,5 млн т у.т. Это отражает рост топливного обеспечения новых тепловых мощностей. По действующим ТЭЦ наблюдается перераспределение структуры угольного топлива. Использование кузнецкого угля увеличилось с 41,3 до 45,5 млн т у.т., тогда как использование канско-ачинского угля снизилось с 9,6 до 5,4 млн т у.т. В целом по энергетике Сибирского федерального округа использование угля всего увеличилось с 69,0 до 73,2 млн т у.т., а использование кузнецкого угля с 49,6 до 53,8 млн т у.т. Одновременно снижение доступности гидроэнергетических ресурсов привело к сокращению вывоза угля. По показателю «Уголь всего (Вывоз)» значение уменьшилось с 82,5 до 78,3 млн т у.т., а по показателю «Уголь кузнецкий (Вывоз)» с 43,3 до 39,1 млн т у.т. Это указывает на перераспределение части угольных ресурсов в пользу внутреннего энергетического потребления округа.

Таблица 3.8 – Изменение использования котельно-печного топлива при снижении гидрогенерации в Сибирском ФО

Регион	Показатель	Базовый вариант	Вариант с угрозой
Сибирский ФО	Уголь к/а (КЭС новые)	0,30	4,48
Сибирский ФО	Уголь всего (КЭС новые)	0,30	4,48
Сибирский ФО	Уголь кузнецкий (ТЭЦ действующие)	41,27	45,45
Сибирский ФО	Уголь к/а (ТЭЦ действующие)	9,58	5,40
Сибирский ФО	Уголь всего (Всего на энергетику)	69,01	73,19
Сибирский ФО	Уголь кузнецкий (Всего на энергетику)	49,64	53,82
Сибирский ФО	Уголь всего (Вывоз)	82,49	78,31
Сибирский ФО	Уголь кузнецкий (Вывоз)	43,26	39,08

На Рисунке 3.23 показано исходное состояние энергетической системы Сибирского федерального округа до реализации сценарного воздействия маловодья.

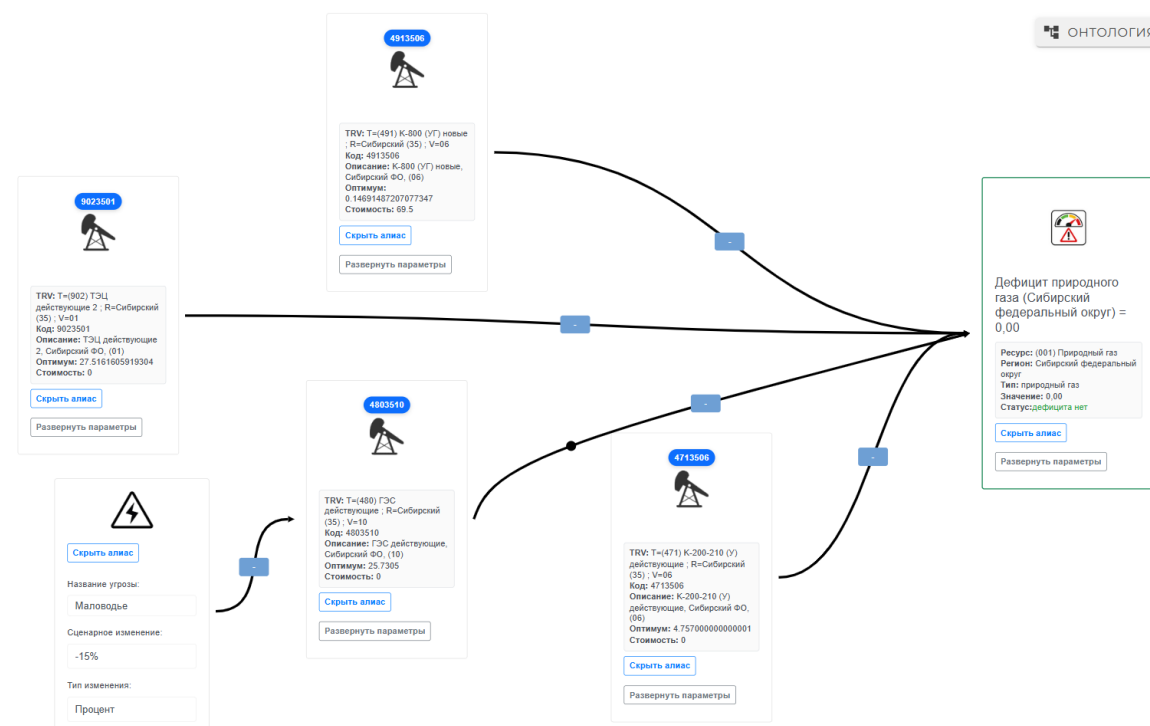


Рисунок 3.23 – Когнитивная карта эксперимента «Маловодье» в Сибирском федеральном округе до снижения гидрогенерации

На Рисунке 3.24 показано состояние энергетической системы Сибирского федерального округа после снижения гидрогенерации на 15 %. Видно, как уменьшается производство электроэнергии на ГЭС и частично компенсируется увеличением загрузки КЭС, а также формируется дефицит электроэнергии на отдельных узлах.

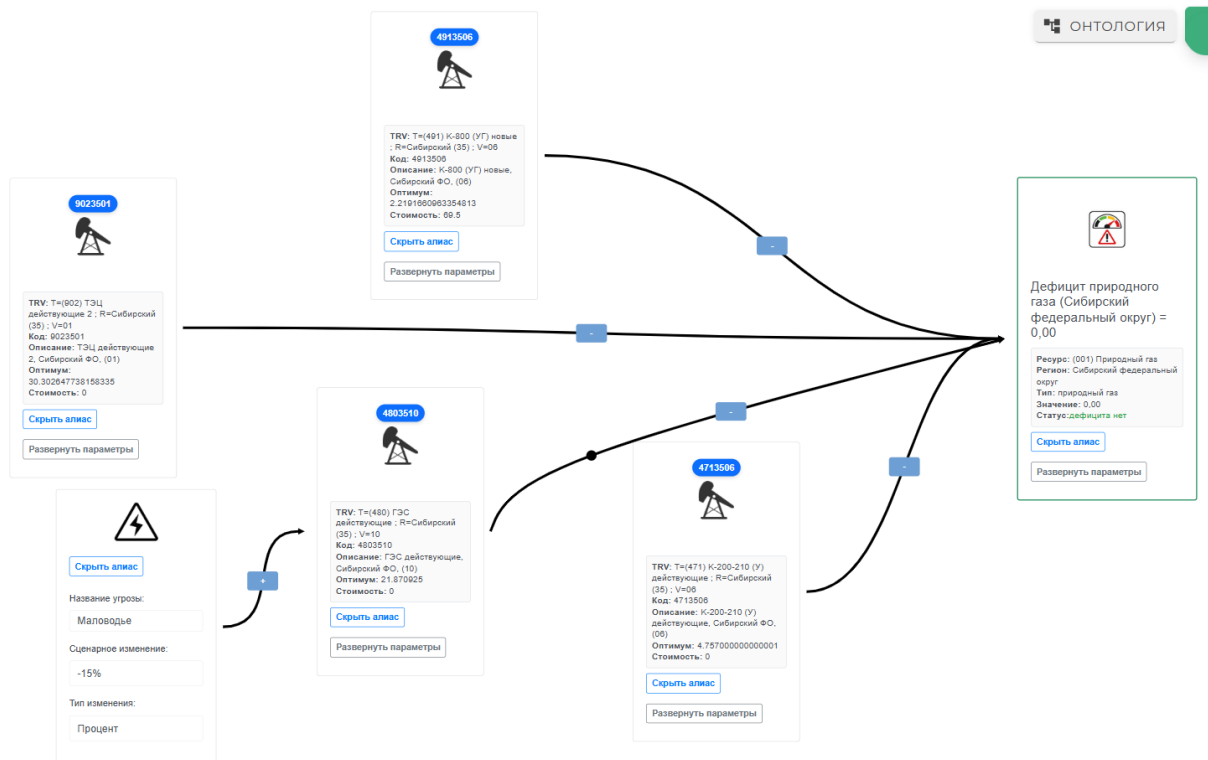


Рисунок 3.24 – Когнитивная карта вычислительного эксперимента природной угрозы «Маловодье» в Сибирском федеральном округе, вариант развития (после снижения гидрогенерации на 15 %)

Таким образом, детерминированный расчет показал, что снижение гидрогенерации в Сибирском федеральном округе компенсируется за счет увеличения выработки новых КЭС и роста использования угольных ресурсов в энергетике. Основным эффектом эксперимента состоит в структурной перестройке электроэнергетического баланса, при которой уменьшается роль действующих ГЭС и возрастает роль тепловой генерации на основе угольного топлива.

Для учета неопределенности воздействия угрозы маловодья была сформирована серия из 100 расчетных реализаций с параметрами стохастической корректировки: вес воздействия $W = 0,7$, степень уверенности $C = 0,8$, коэффициент масштаба $\beta = 0,035$ и коэффициент неопределенности $\alpha = 0,05$. Для Сибирского федерального округа численный метод стохастической корректировки показал распределение ключевых показателей электроэнергетического баланса при варьировании доступности гидроэнергетических ресурсов. По показателю в Таблице 3.9 «ГЭС действующие» оценка математического ожидания составила 82,2 млрд кВт·ч при среднеквадратичном отклонении 0,9 млрд кВт·ч. Диапазон значений по расчетным реализациям составил от 80,1 до 84,9 млрд кВт·ч. Это показывает, что при реализации угрозы маловодья выработка действующих гидроэлектростанций устойчиво снижается относительно базового уровня.

Таблица 3.9 – Генерация электроэнергии по федеральным округам при реализации угрозы маловодья по Сибирскому ФО

Показатель	Продукт	Мат. ожидание	Дисперсия	Мин.	Макс.
ГЭС действующие	Электроэнергия	82,18	0,85	80,09	84,88
КЭС новые	Электроэнергия	12,76	0,85	10,06	14,85

Компенсация снижения гидрогенерации обеспечивается за счет увеличения выработки новых КЭС. По показателю «КЭС новые» оценка математического ожидания составила 12,8 млрд кВт·ч при среднеквадратичном отклонении 0,9 млрд кВт·ч. Минимальное значение по расчетным реализациям составило 10,1 млрд кВт·ч, максимальное значение 14,9 млрд кВт·ч. Полученные значения указывают на устойчивое включение новых конденсационных электростанций в покрытие выпадающей гидрогенерации. На Рисунке 3.25 представлена зависимость выработки новых КЭС от сценарного значения выработки действующих ГЭС в Сибирском федеральном округе. Полученная зависимость показывает, что при увеличении доступной гидрогенерации потребность в выработке новых КЭС снижается. Следовательно, новые конденсационные электростанции выступают

компенсирующим источником при сокращении выработки гидроэлектростанций в условиях маловодья.

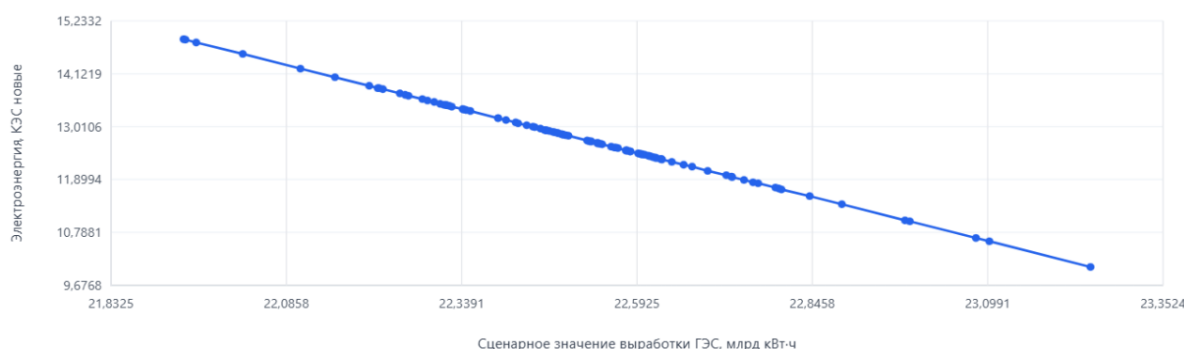


Рисунок 3.25 – Влияние выработки гидроэлектростанций на загрузку новых КЭС в Сибирском федеральном округе

3.4.3. Вычислительный эксперимент с техногенной угрозой «Повреждение Уральского газотранспортного коридора»

В рамках вычислительного эксперимента рассматривается угроза нарушения газоснабжения, связанная со снижением подачи природного газа с разработанных месторождений. Исследуемая ситуация относится к Уральскому газотранспортному коридору, через который обеспечивается распределение природного газа из Уральского федерального округа в другие федеральные округа, прежде всего в Приволжский, Центральный, Северо-Западный и Сибирский федеральные округа. Возмущающее воздействие задается как снижение доступного объема природного газа на 10 % по разработанным месторождениям. Месторождения, находящиеся на стадии разработки, в данном эксперименте не затрагиваются. Такое воздействие интерпретируется как ограничение добычи и последующей подачи газа в газотранспортную систему. Цель эксперимента состоит в оценке влияния снижения подачи природного газа с разработанных месторождений на состояние топливно-энергетического баланса федеральных округов. Особое внимание уделяется тому, за счет каких изменений в

распределении газовых потоков и использовании замещающих видов топлива может обеспечиваться сохранение энергетического баланса при ограничении газоснабжения. В Таблице 3.10 показано, что в Уральском федеральном округе снижение добычи газа на 10 % отражено в строке «Газ природный (Добыча)». Значение уменьшилось с 667,5 до 620,9 млн т у.т. Также изменение видно в строке «Газ природный (Вывоз)», где значение снизилось с 563,8 до 517,3 млн т у.т. Внутреннее использование газа на энергетику, строка «Газ природный (Всего на энергетику)», почти не изменилось. При этом наблюдается рост использования мазута, строка «Мазут (Всего на энергетику)», с 0,3 до 0,6 млн т у.т., что обеспечивает частичную компенсацию выпадающего газа.

Таблица 3.10 – Изменение показателей топливного баланса при повреждении Уральского газотранспортного коридора

Регион	Показатель	Базовый вариант	Вариант с угрозой
Уральский ФО	Газ природный (Добыча)	667,5	620,9
Уральский ФО	Газ природный (Распределение)	667,5	620,9
Уральский ФО	Газ природный (Вывоз)	563,8	517,3
Уральский ФО	Мазут (Ввоз)	0,8	1,1
Уральский ФО	Мазут (КЭС действующие)	0,3	0,6
Уральский ФО	Мазут (Всего на энергетику)	0,3	0,6
Приволжский ФО	Газ природный (Ввоз)	422,7	376,2
Приволжский ФО	Газ природный (Всего на энергетику)	86,0	81,2
Приволжский ФО	Мазут (Всего на энергетику)	0,0	4,8
Центральный ФО	Газ природный (Всего на энергетику)	56,0	52,8
Центральный ФО	Уголь кузнецкий (Всего на энергетику)	18,8	21,6
Сибирский ФО	Газ природный (Всего на энергетику)	1,5	3,7
Сибирский ФО	Уголь всего (Всего на энергетику)	54,6	51,9
Сибирский ФО	Уголь кузнецкий (Вывоз)	37,5	40,3

В Приволжском федеральном округе сокращение объема газа видно по строкам «Газ природный (Ввоз)» и «Газ природный (Всего на энергетику)». По первой строке значение снизилось с 422,7 до 376,2 млн т у.т., по второй с 86,0 до 81,2 млн т у.т. Основная компенсация выполнена за счет мазута. По строке «Мазут (Всего на энергетику)» значение увеличилось с 0,0 до 4,8 млн т у.т. В Центральном федеральном округе перераспределение газа и угля отражено по строкам «Газ

природный (Всего на энергетику)» и «Уголь кузнецкий (Всего на энергетику)». Использование природного газа снизилось с 56,0 до 52,8 млн т у.т., а использование кузнецкого угля увеличилось с 18,8 до 21,6 млн т у.т. В Сибирском федеральном округе использование газа на энергетику увеличилось. По строке «Газ природный (Всего на энергетику)» значение возросло с 1,5 до 3,7 млн т у.т. Одновременно использование угля всего уменьшилось. По строке «Уголь всего (Всего на энергетику)» значение снизилось с 54,6 до 51,9 млн т у.т. Кроме того, вывоз кузнецкого угля увеличился. По строке «Уголь кузнецкий (Вывоз)» значение возросло с 37,5 до 40,3 млн т у.т., что отражает межрегиональное перераспределение топлива. Полученные изменения показывают, что компенсация выпадающего газа обеспечивается за счет сокращения вывоза газа из Уральского федерального округа, роста использования мазута в Приволжском федеральном округе, частичного замещения газа углем в Центральном федеральном округе и межрегионального перераспределения топливных ресурсов.

На Рисунке 3.26 представлена когнитивная карта базового варианта модели. Она отражает взаимосвязи добычи природного газа в Уральском федеральном округе, его транспортировки в Приволжский федеральный округ и производства электроэнергии на природном газе и мазуте.

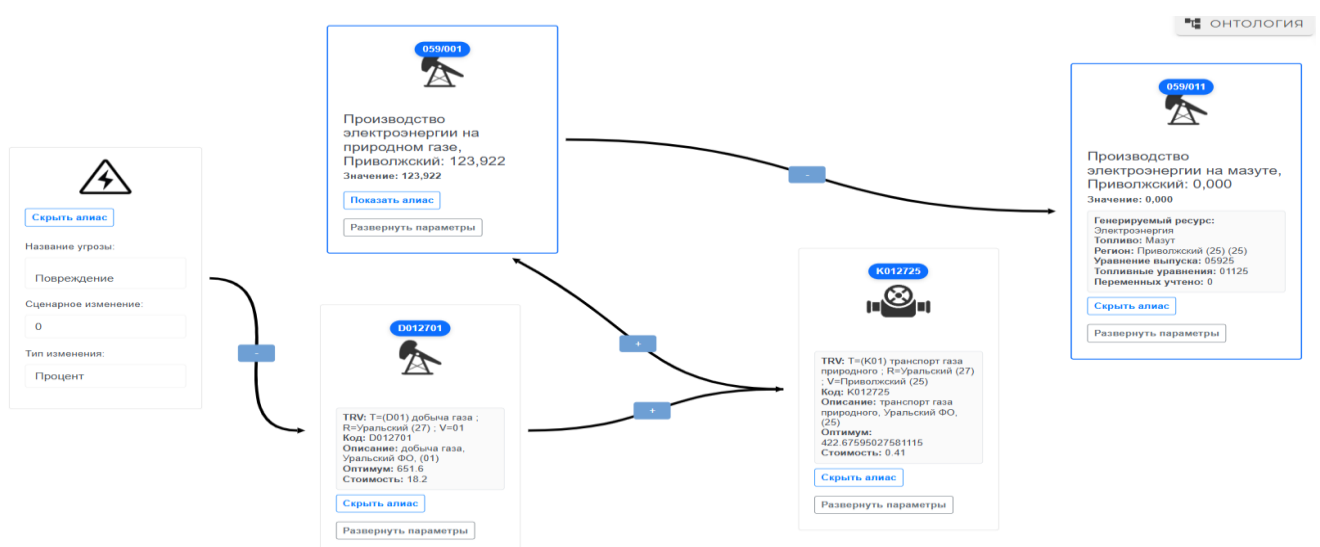


Рисунок 3.26 – Когнитивная карта базового варианта модели газоснабжения Приволжского федерального округа

На Рисунке 3.27 представлена когнитивная карта варианта модели с реализацией техногенной угрозы «Повреждение Уральского газотранспортного коридора». Реализация угрозы приводит к снижению доступности природного газа, что отражается уменьшением производства электроэнергии на природном газе в Приволжском федеральном округе. Частично выпадающий газовый ресурс компенсируется увеличением производства электроэнергии на мазуте. Карта демонстрирует перераспределение топливных потоков и изменение структуры обеспечения электроэнергетики в условиях ограничения газового ресурса.

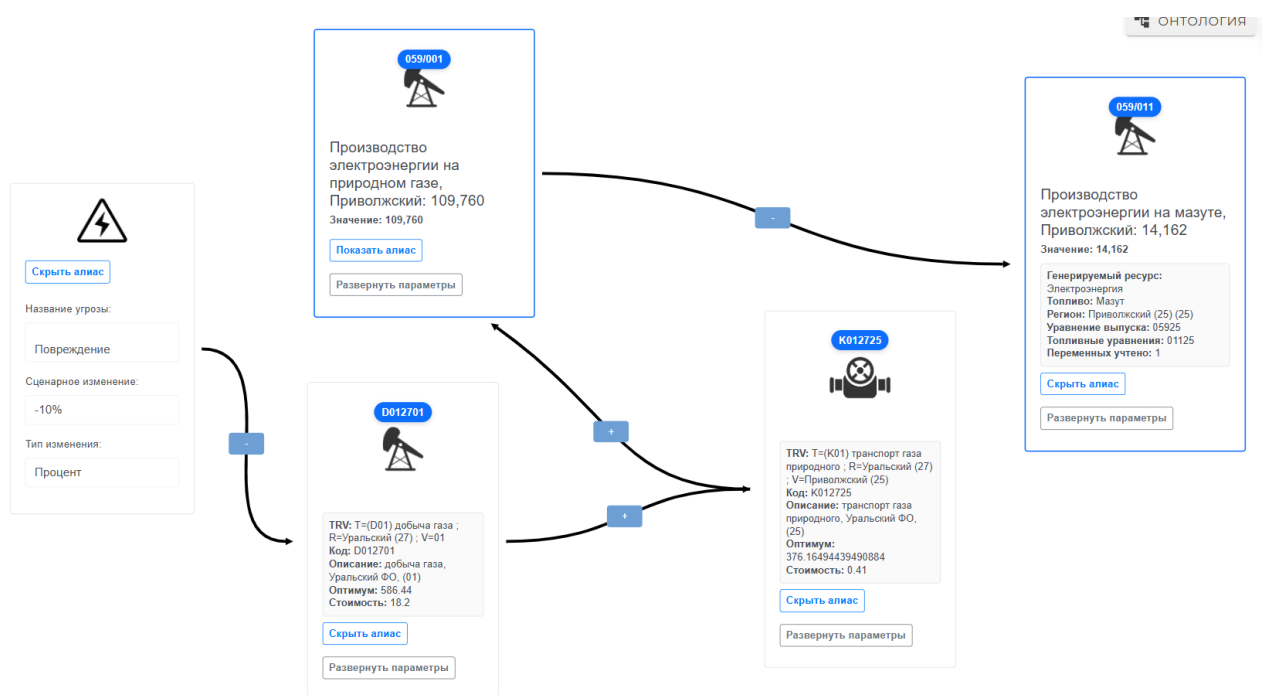


Рисунок 3.27 – Когнитивная карта варианта модели газоснабжения Приволжского федерального округа при реализации техногенной угрозы «Повреждение Уральского газотранспортного коридора»

Для учета неопределенности воздействия сценарного изменения добычи газа была сформирована серия из 100 расчетных реализаций с параметрами стохастической корректировки: вес воздействия $W = 0,7$, степень уверенности $C = 0,8$, коэффициент масштаба $\beta = 0,035$ и коэффициент неопределенности $\alpha = 0,07$. Для Приволжского федерального округа численный метод стохастической

корректировки показал распределение ключевых показателей баланса котельно-печного топлива при варьировании добычи газа в Уральском федеральном округе.

На Рисунке 3.28 показана зависимость потребления природного газа и мазута в Приволжском федеральном округе от добычи газа в Уральском федеральном округе. Видно, что при увеличении добычи газа возрастает использование природного газа на энергетику, а потребление мазута снижается. Это показывает перераспределение структуры котельно-печного топлива в пользу природного газа.

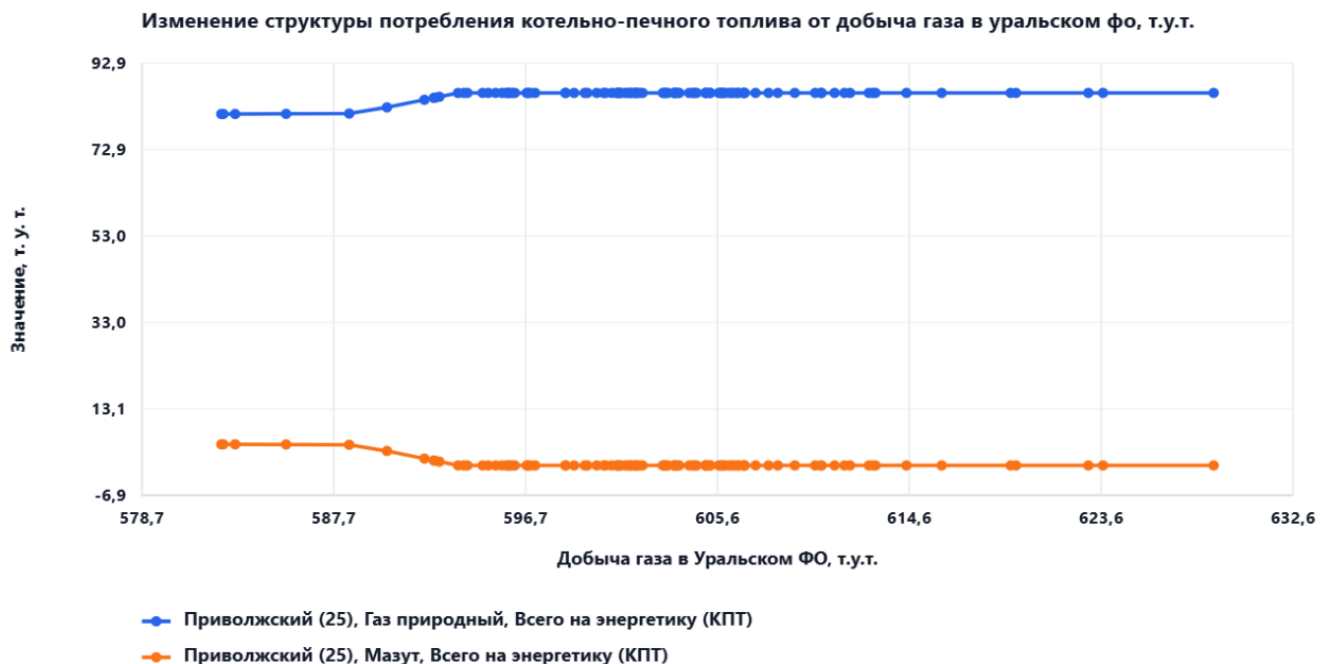


Рисунок 3.28 – Изменение структуры потребления котельно-печного топлива в Приволжском федеральном округе в зависимости от добычи газа в Уральском федеральном округе, т. у. т.

В Таблице 3.11 приведены показатели, отражающие изменение поступления и использования природного газа и мазута в Приволжском федеральном округе. По показателю «Ввоз» для природного газа математическое ожидание составило 392,33 т. у. т. при дисперсии 67,40. Диапазон значений по расчетным реализациям составил от 372,53 до 418,50 т. у. т. По показателю «Всего на энергетику (КПТ)» для природного газа математическое ожидание составило 85,67 т. у. т., для мазута 0,32 т. у. т. Полученные значения показывают, что изменение добычи газа в

Уральском федеральном округе влияет на поступление природного газа в Приволжский федеральный округ и на структуру использования топлива в энергетике. При снижении доступности природного газа в расчетных реализациях появляется использование мазута на действующих КЭС. Это отражает компенсирующее включение мазута при изменении условий газоснабжения.

Таблица 3.11 – Распределение показателей использования природного газа и мазута в Приволжском федеральном округе при изменении добычи газа в Уральском федеральном округе

Показатель	Продукт	Мат. ожидание	Дисперсия	Мин.	Макс.
Ввоз	Газ природный	392,33	67,40	372,53	418,50
Всего на энергетику (КПТ)	Газ природный	85,67	1,25	81,12	85,99
КЭС действующие	Газ природный	14,80	1,25	10,25	15,12
Всего на энергетику (КПТ)	Мазут	0,32	1,25	0,00	4,87
КЭС действующие	Мазут	0,32	1,25	0,00	4,87

Результаты эксперимента показывают, что изменение добычи газа в Уральском федеральном округе влияет на структуру потребления котельно-печного топлива в Приволжском федеральном округе, приводя к изменению использования природного газа и компенсирующему включению мазута в энергетике.

3.4.4. Вычислительный эксперимент «Дефицит инвестиций в развитие газовой отрасли 2025–2030 гг.»

Для апробации квазидинамических уравнений межпериодного переноса был проведен вычислительный эксперимент, направленный на оценку последствий

дефицита инвестиций в развитие газовой отрасли. В отличие от экспериментов, основанных на стохастической корректировке параметров, данный эксперимент имеет детерминированный характер. Его назначение состоит в проверке возможности учета последствий расчетного сценария 2025 г. при формировании условий модели 2030 г.

В качестве исходных расчетных состояний использовались четыре варианта модели: базовый вариант 2025 г., сценарный вариант 2025 г. с угрозой недостатка инвестиций в развитие газовой отрасли на 50%, базовый вариант 2030 г. и квазидинамический вариант 2030 г., сформированный с учетом последствий сценарного расчета 2025 г. Сопоставление базового и сценарного вариантов 2025 г. позволило определить отклонения по переменным газовой отрасли. Далее эти отклонения использовались для корректировки ограничений модели 2030 г.

Вычислительная схема эксперимента включала следующие этапы. На первом этапе был рассчитан базовый вариант 2025 г. На втором этапе был сформирован и рассчитан сценарный вариант 2025 г., отражающий угрозу недостатка инвестиций. На третьем этапе был рассчитан базовый вариант 2030 г., не учитывающий межпериодные последствия сценария 2025 г. На четвертом этапе на основе квазидинамического переноса была сформирована модель 2030 г. с измененными ограничениями по переменным, связанным с газовой отраслью, после чего был выполнен ее расчет.

В расчетах использовалось правило квазидинамического переноса, при котором для переменных газовой отрасли сопоставлялись значения базового варианта 2025 г. и варианта 2025 г. с угрозой недостатка инвестиций. Если в варианте с угрозой значение переменной было ниже, чем в базовом варианте 2025 г., полученная разность рассматривалась как межпериодное отклонение. Если снижение отсутствовало, отклонение принималось равным нулю. Полученные отклонения далее использовались при формировании варианта развития 2030 г. Для соответствующих переменных газовой отрасли уменьшались верхние границы допустимых значений. Это позволяло учесть последствия угрозы, реализованной в расчетном варианте 2025 г., при построении условий модели 2030 г.

В данном эксперименте коэффициент переноса был принят равным 1. Это означает, что снижение значения переменной в варианте 2025 г. с угрозой полностью переносилось в виде ограничения на соответствующую переменную варианта развития 2030 г.

Результаты расчета 2025 г. показывают, что угроза недостатка инвестиций приводит прежде всего к ухудшению балансовых условий в газовой отрасли. В Таблице 3.12 показано, что наиболее выраженное снижение наблюдается в Уральском федеральном округе, где добыча природного газа уменьшается с 678,5 до 541,7 млн т у. т., а вывоз газа снижается с 566,2 до 401,2 млн т у. т. В Приволжском федеральном округе ввоз природного газа уменьшается с 423,9 до 288,6 млн т у. т., а использование газа на энергетику снижается с 90,4 до 37,9 млн т у. т. В Центральном федеральном округе ввоз природного газа снижается с 342,3 до 296,2 млн т у. т., при этом возникает дефицит газа 28,8 млн т у. т. В Сибирском федеральном округе формируется дефицит природного газа 12,1 млн т у. т. и дефицит мазута 7,5 млн т у. т.

Таблица 3.12 – Основные изменения в расчетном варианте 2025 г. при угрозе недостатка инвестиций

Федеральный округ	Показатель	Базовый вариант 2025 г.	Сценарный вариант 2025 г.	Отклонение
Уральский	Добыча газа	678,5	541,7	-136,8
Уральский	Вывоз газа	566,2	401,2	-165,0
Приволжский	Ввоз газа	423,9	288,6	-135,3
Приволжский	Газ на энергетику	90,4	37,9	-52,5
Центральный	Ввоз газа	342,3	296,2	-46,1
Центральный	Дефицит газа	0,0	28,8	+28,8
Сибирский	Дефицит газа	0,0	12,1	+12,1
Дальний Восток	Дефицит газа	2,3	10,3	+8,1

Содержательно данные изменения отражают снижение возможностей газовой отрасли по обеспечению межрайонных поставок и внутреннего потребления. В результате часть нагрузки перераспределяется на другие виды топлива. Так, в Приволжском федеральном округе использование мазута на

энергетику возрастает с 0,0 до 14,6 млн т у. т., в Центральном федеральном округе с 0,0 до 6,5 млн т у. т., в Северо-Западном федеральном округе с 0,01 до 2,8 млн т у. т. Одновременно в отдельных районах возрастает использование угля, что указывает на компенсирующую роль топливной структуры при ограничении развития газовой отрасли.

После формирования квазидинамического варианта 2030 г. были сопоставлены результаты базового варианта 2030 г. и варианта 2030 г. с учетом межпериодного переноса. В отличие от базового варианта 2030 г., квазидинамический вариант отражает не только условия самого расчетного периода, но и последствия сценарного состояния 2025 г., перенесенные на ограничения модели следующего периода.

В Таблице 3.13 показано, что наиболее существенное влияние межпериодного переноса проявилось в газовых балансах Уральского, Приволжского, Центрального, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов.

Таблица 3.13 – Основные изменения в расчетном варианте 2030 г. после квазидинамического переноса

Федеральный округ	Показатель	Базовый вариант 2030 г.	2030 г. с учетом динамики	Отклонение
Уральский	Добыча газа	678,5	541,7	-136,8
Уральский	Вывоз газа	560,2	453,0	-107,2
Приволжский	Ввоз газа	417,9	341,0	-76,9
Приволжский	Газ на энергетику	95,3	58,3	-37,0
Центральный	Ввоз газа	337,8	310,5	-27,2
Центральный	Газ на энергетику	62,6	39,5	-23,1
Центральный	Дефицит газа	0,0	4,1	+4,1
Сибирский	Дефицит газа	0,0	15,2	+15,2

В Уральском федеральном округе добыча природного газа в 2030 г. снижается с 678,5 до 541,7 млн т у. т., а вывоз газа уменьшается с 560,2 до 453,0 млн т у. т. В Приволжском федеральном округе ввоз природного газа уменьшается с 417,9 до 341,0 млн т у. т., а использование газа на энергетику снижается с 95,3 до

58,3 млн т у. т. В Центральном федеральном округе ввоз газа сокращается с 337,8 до 310,5 млн т у. т., а использование газа на энергетику снижается с 62,6 до 39,5 млн т у. т. При этом возникает дефицит природного газа 4,1 млн т у. т. В Сибирском федеральном округе формируется дефицит природного газа 15,2 млн т у. т. и дефицит мазута 7,1 млн т у. т. В Дальневосточном федеральном округе дефицит природного газа возрастает с 8,2 до 26,6 млн т у. т.

В электроэнергетическом балансе последствия межпериодного переноса выражаются не столько в изменении общего объема производства электроэнергии, сколько в изменении структуры генерации. В ряде федеральных округов сокращается использование действующих КЭС и возрастает ввод или загрузка новых КЭС. В Таблице 3.14 показано, что в Уральском федеральном округе производство электроэнергии на действующих КЭС снижается с 87,1 до 0,0 млрд кВт·ч, а производство на новых КЭС возрастает с 22,1 до 95,0 млрд кВт·ч. При этом общий выпуск электроэнергии снижается с 160,1 до 145,1 млрд кВт·ч, а недостающий объем покрывается за счет ввоза электроэнергии 15,0 млрд кВт·ч. В Сибирском федеральном округе производство на действующих КЭС снижается с 44,1 до 0,0 млрд кВт·ч, а производство на новых КЭС возрастает с 11,1 до 70,1 млрд кВт·ч. Общий выпуск электроэнергии увеличивается с 240,6 до 255,6 млрд кВт·ч, что сопровождается появлением вывоза электроэнергии 15,0 млрд кВт·ч.

Таблица 3.14 – Изменение структуры производства электроэнергии в 2030 г. после межпериодного переноса

Федеральный округ	Показатель	Базовый вариант 2030 г.	2030 г. с учетом динамики	Отклонение
Уральский	КЭС действующие	87,1	0,0	-87,1
Уральский	КЭС новые	22,1	95,0	+72,9
Уральский	Ввоз электроэнергии	0,0	15,0	+15,0
Сибирский	КЭС действующие	44,1	0,0	-44,1
Сибирский	КЭС новые	11,1	70,1	+59,1
Сибирский	Вывоз электроэнергии	0,0	15,0	+15,0

Продолжение таблицы 3.14

Приволжский	КЭС действующие	47,3	0,0	-47,3
Приволжский	КЭС новые	0,0	43,5	+43,5
Северо-Западный	КЭС действующие	10,1	0,0	-10,1
Северо-Западный	КЭС новые	28,0	38,1	+10,1

Компенсация ограничений по газовой отрасли сопровождается ростом использования других видов топлива. В Приволжском федеральном округе использование мазута на энергетику увеличивается с 0,0 до 11,4 млн т у. т., а использование кузнецкого угля в котельных возрастает с 0,0 до 22,1 млн т у. т. В Центральном федеральном округе использование мазута на энергетику возрастает с 0,0 до 5,2 млн т у. т., а использование кузнецкого угля в котельных увеличивается с 24,3 до 31,4 млн т у. т. В Северо-Западном федеральном округе использование угля на энергетику возрастает с 8,4 до 35,7 млн т у. т., а использование мазута на энергетику увеличивается с 0,01 до 2,1 млн т у. т. В Южном федеральном округе использование мазута на энергетику возрастает с 0,1 до 3,0 млн т у. т., при этом появляется дефицит угля в размере 1,0 млн т у. т.

Полученные результаты показывают, что учет межпериодных последствий угрозы существенно меняет расчетное состояние модели 2030 г. Базовый вариант 2030 г. без межпериодного переноса не отражает последствий инвестиционного дефицита, проявившихся в 2025 г. После применения квазидинамического переноса в модели 2030 г. формируются ограничения по газовой отрасли, приводящие к снижению добычи и вывоза природного газа в Уральском федеральном округе, сокращению ввоза газа в Приволжском, Центральном, Северо-Западном и Южном федеральных округах, появлению или росту дефицита газа в Центральном, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах.

Таким образом, вычислительный эксперимент подтвердил возможность использования квазидинамических уравнений межпериодного переноса для учета последствий сценарных решений одного расчетного периода при формировании условий последующего периода. На примере угрозы недостатка инвестиций в

развитие газовой отрасли показано, что последствия сценарного состояния 2025 г. сохраняются в модели 2030 г. и изменяют не только газовые балансы, но и структуру топливоснабжения, межрайонные потоки, использование резервных видов топлива и структуру производства электроэнергии.

3.5. Выводы по главе

В третьей главе выполнена реализация предложенного в диссертации подхода к интеграции семантического и математического моделирования в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса. Показано, что программный комплекс «ИНТЭК-SAW» обеспечивает переход от семантического моделирования исследуемой ситуации к формированию вычислительных сценариев, проведению расчетов и представлению результатов исследования. Тем самым подтверждена возможность программной реализации разработанных методических положений в рамках единой инструментальной среды.

Разработана архитектура программного комплекса «ИНТЭК-SAW», основанная на агентно-сервисном подходе и включающая агент формирования моделей, агент сценариев, агент семантического моделирования, агент-решатель и агент формирования отчетов. Показано, что выделение указанных агентов обеспечивает разграничение функций между основными этапами исследования, модульность программного комплекса и поддержку полного цикла вычислительного эксперимента. В главе раскрыта реализация основных агентов комплекса и представлена технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК, интегрирующая этапы построения модели, формирования семантического описания, задания сценарных воздействий, проведения расчета и анализа результатов.

Апробация разработанного методического и программного обеспечения проведена на серии вычислительных экспериментов. Полученные результаты подтвердили работоспособность предложенных архитектурных, программных и

технологических решений и показали возможность применения комплекса «ИНТЭК-SAW» для поддержки прогнозных исследований топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы достигнута поставленная цель: разработаны методы, модели и инструментальные средства для интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса, обеспечивающие интеграцию семантического и математического моделирования. Разработанный подход ориентирован на формализованный переход от качественного анализа исследуемой ситуации к построению вычислительных сценариев и количественной оценке состояний ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

В ходе работы автором получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ предметной области, существующих технологий и инструментальных средств проведения прогнозных исследований ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.
2. Разработана методика интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.
3. Модифицирована экономико-математическая модель ТЭК путем введения дополнительных уравнений, отражающих экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК, и разработана формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся совместным представлением математических и семантических моделей.
4. Разработан численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов.
5. Реализован многоагентный программный комплекс ИНТЭК-SAW, поддерживающий предложенную методику, и модифицирована существующая

технология поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности на основе разработанного ПК.

Результаты диссертационной работы переданы для использования в научно-исследовательской деятельности Института энергетики Национальной академии наук Беларуси; программный комплекс «ИНТЭК-SAW» передан в НИИ информационных технологий Ханты-Мансийского автономного округа (Югры), а также результаты работы применяются в учебном процессе Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского государственного университета.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

БД – база данных;

ГРЭС – государственная районная электростанция;

ГЭС – гидроэлектростанция;

ИНЭИ РАН – Институт энергетических исследований Российской академии наук;

ИСЭМ СО РАН – Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук;

ИТ – информационные технологии;

КС – критическая ситуация;

ЛПР – лицо, принимающее решения;

ПК – программный комплекс;

ПО – программное обеспечение;

РАН – Российская академия наук;

РНФ – Российский научный фонд;

РФ – Российская Федерация;

РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований;

СО РАН – Сибирское отделение Российской академии наук;

СУБД – система управления базами данных;

ТЭК – топливно-энергетический комплекс;

ТЭР – топливно-энергетические ресурсы;

ТЭС – тепловая электростанция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ФО – федеральный округ;

ЧС – чрезвычайная ситуация;

ЭБ – энергетическая безопасность;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

API – интерфейс программирования приложений;

ASP.NET Core – платформа для разработки серверных web-приложений на .NET;

CO₂ – диоксид углерода;

CQRS – разделение операций чтения и изменения данных;

DTO – объект передачи данных;

HTTP – протокол передачи гипертекста;

IDEF0 – нотация функционального моделирования;

JSON – формат обмена данными JavaScript Object Notation;

OR-Tools – библиотека математической оптимизации Google Operations Research Tools;

REST API – интерфейс прикладного программирования, реализованный в соответствии с архитектурным стилем REST;

SCIP – решатель задач линейного и смешанного целочисленного программирования;

SQL – язык структурированных запросов;

UI – пользовательский интерфейс;

Web API – программный интерфейс веб-приложения;

WebAssembly – технология выполнения клиентского кода в браузере.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cherp, A. The concept of energy security: Beyond the four As / A. Cherp, J. Jewell // *Energy Policy*. – 2014. – Vol. 75. – P. 415–421.
2. Sovacool, B.K. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach / B.K. Sovacool, I. Mukherjee // *Energy*. – 2011. – Vol. 36. – No. 8. – P. 5343–5355.
3. Jewell, J. Energy security under de-carbonization scenarios: An assessment framework and evaluation under different technology and policy choices / J. Jewell, A. Cherp, K. Riahi // *Energy Policy*. – 2014. – Vol. 65. – P. 743–760.
4. Anderson, K.H. Integrating the Value of Electricity Resilience in Energy Planning and Operations Decisions / K.H. Anderson, X. Li, S. Dalvi, S.J. Ericson, C.P. Barrows, C. Murphy, E.L. Hotchkiss // *IEEE Systems Journal*. – 2021. – Vol. 15. – No. 1. – P. 204–214.
5. Schmitz, R. Energy security and resilience: Revisiting concepts and advancing planning perspectives for transforming integrated energy systems / R. Schmitz, F. Flachsbarth, L.S. Plaga, M. Braun, P. Härtel // *Energy Policy*. – 2025. – Vol. 207. – P. 114796.
6. Авдеева, З.К. Когнитивный подход в управлении / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко, В.И. Максимов // *Проблемы управления*. – 2007. – № 3. – С. 2–8.
7. Авдеева, З.К. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями) / З.К. Авдеева, С.В. Коврига, Д.И. Макаренко // *Управление большими системами*. – 2007. – № 16.
8. Макаров, А.А. Стратегические перспективы развития энергетического комплекса России / А.А. Макаров, Т.А. Митрова // *Проблемы прогнозирования*. – 2018. – № 5. – С. 81–96.
9. Massel, L.V. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике / L.V. Massel, T.N. Vorozhtsova, N.I. Pyatkova // *Онтология проектирования*. – 2017. – Т. 7. – № 1. – С. 66–76.

10. Массель, А.Г. Применение когнитивного моделирования для ситуационного анализа проблемы энергетической безопасности / А.Г. Массель, Л.В. Аршинский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № спец. вып. – С. 75–80.

11. Массель, А.Г. Интеграция математического и когнитивного моделирования в исследованиях направлений развития ТЭК с позиции энергетической безопасности / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 3(39). – С. 61–71.

12. Ansari, D. Anticipating global energy, climate and policy in 2055: Constructing qualitative and quantitative narratives / D. Ansari, F. Holz // Energy Research & Social Science. – 2019. – Vol. 58. – P. 101250.

13. Copeland, C. In Search of Complementarity: Insights from an Exercise in Quantifying Qualitative Energy Futures / C. Copeland, B. Turner, G. Powells, K. Wilson // Energies. – 2022. – Vol. 15. – No. 15. – P. 5340.

14. Gruber, T.R. A translation approach to portable ontology specifications / T.R. Gruber // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5. – No. 2. – P. 199–220.

15. Загорюлько, Г.Б. Разработка онтологии для интернет-ресурса поддержки принятия решений в слабоформализованных областях / Г.Б. Загорюлько // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6. – № 4 (22). – С. 485–500.

16. Черняховская, Л.Р. Разработка моделей и методов интеллектуальной поддержки принятия решений на основе онтологии организационного управления программными проектами / Л.Р. Черняховская, А.И. Малахова // Онтология проектирования. – 2013. – № 4 (10). – С. 42–52.

17. Массель, Л.В. Оценка устойчивости энергетических систем с применением методов машинного обучения / Л.В. Массель, А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов, Д.А. Гаськова, А.Р. Цыбиков, Н.И. Щукин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 248–261.

18. Массель, Л.В. Сервисы для обработки данных и знаний в экосистеме знаний в энергетике / Л.В. Массель, А.Г. Массель, В.Р. Кузьмин, Т.Г. Мамедов, Д.А.

Гаськова // Двадцать вторая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием, КИИ-2025, Санкт-Петербург, 6–10 октября 2025 г. : труды конференции : в 3 т. – Санкт-Петербург : Изд-во СПб ФИЦ РАН, 2025. – Т. 3. – С. 217–227.

19. Хлопов, О.А. Международная энергетическая безопасность: проблемы и угрозы / О.А. Хлопов // Вестник РГГУ. Серия «Международные отношения. Регионоведение». – 2014. – № 7 (129). – С. 62–73.

20. Школлер, Р.А. Различные подходы к анализу энергетической безопасности и ее универсальных характеристик / Р.А. Школлер // Вестник Академии экономической безопасности МВД России. – 2009. – № 9. – С. 135–138.

21. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации. – URL: <https://minenergo.gov.ru> (дата обращения: 25.05.2025).

22. Сендеров, С.М. Методика мониторинга состояния энергетической безопасности России на региональном уровне / С.М. Сендеров, Н.И. Пяткова, В.И. Рабчук, Г.Б. Славин, С.В. Воробьев, Е.М. Смирнова. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2014.

23. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации : Президент Российской Федерации. – Москва, 2019.

24. Воропай, Н.И. Энергетическая безопасность: сущность, основные проблемы, методы и результаты исследований / Н.И. Воропай, С.М. Сендеров. – Москва : Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, 2011.

25. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 09.06.2020 № 1523-р. – Москва : Правительство Российской Федерации, 2020.

26. Сендеров, С.М. О ключевом элементе понятия энергетической безопасности и трансформации модельного аппарата для его исследования / С.М. Сендеров, Н.И. Пяткова // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2026. – № 1. – С. 5–22.

27. Пяткова, Н.И. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Н.И. Пяткова, Н.И. Воропай, М.Б. Чельцов. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2011.

28. Бушуев, В.В. Энергетическая безопасность России / В.В. Бушуев, Н.И. Воропай, А.М. Мастепанов, Ю.К. Шафраник. – Новосибирск : Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 1998.

29. Сендеров, С.М. Надежность топливо- и энергоснабжения потребителей с позиций обеспечения энергетической безопасности / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Д.С. Крупенев, Н.И. Пяткова, С.В. Воробьев, Н.М. Береснева. – Новосибирск : СО РАН, 2022.

30. Пяткова, Н.И. Методические особенности исследования проблем энергетической безопасности на современном этапе / Н.И. Пяткова, С.М. Сендеров, Е.В. Пяткова // Известия РАН. Энергетика. – 2014. – № 2. – С. 81–87.

31. Пяткова, Н.И. Методы ситуационного управления в исследованиях проблем энергетической безопасности / Н.И. Пяткова, Л.В. Массель, А.Г. Массель // Известия РАН. Энергетика. – 2016. – № 4. – С. 156–163.

32. Сендеров, С.М. Старые и новые угрозы энергетической безопасности России в сфере газа / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук // Энергетическая политика. – 2020. – № 11. – С. 84–95.

33. Сендеров, С.М. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Н.И. Пяткова, С.В. Воробьев. – Новосибирск : Наука, 2017.

34. Массель, Л.В. Применение онтологического, когнитивного и событийного моделирования для анализа чрезвычайных ситуаций в энергетике / Л.В. Массель // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2010. – № 2. – С. 34–43.

35. Массель, Л.В. Адаптация методов ситуационного управления для решения задач оценки влияния угроз на состояние энергетической безопасности / Л.В. Массель, Н.И. Пяткова, А.Г. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2016. – № 1. – С. 28–38.

36. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : Федеральный закон № 68-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1994. – № 35. – Ст. 3648.

37. Санеев, Б.Г. Системные исследования проблем энергетики / Б.Г. Санеев, С.П. Филиппов. – Новосибирск : Наука. Издательская фирма РАН, 2000.

38. Воропай, Н.И. Методы анализа и обоснования решений по повышению надежности и безопасности в энергетике / Н.И. Воропай, А.Н. Голомолзин, Б.М. Каганович // Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях. – 1995. – С. 64–125.

39. Воропай, Н.И. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Н.И. Воропай. – Москва, 2005.

40. Сендеров, С.М. Методы поиска критически важных объектов газотранспортной сети России с позиций работоспособности отрасли / С.М. Сендеров, А.В. Еделев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2016. – № 2 (18). – С. 278–289.

41. Сендеров, С.М. Особенности формирования перечня критически важных объектов газотранспортной сети России с учетом требований энергетической безопасности и возможные меры минимизации негативных последствий от чрезвычайных ситуаций на таких объектах / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, А.В. Еделев // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2016. – № 1. – С. 70–78.

42. Сендеров, С.М. Методический подход к оценке уровня значимости критически важных объектов энергетики при взаимосвязанной работе энергетических отраслей / С.М. Сендеров, Д.С. Крупенев, С.В. Воробьев, Н.М. Береснева, Д.А. Бояркин // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2023. – № 2. – С. 31–45.

43. Сендеров, С.М. Старые и новые угрозы энергетической безопасности России в сфере газа / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук // Энергетическая политика. – 2020. – № 11. – С. 84–95.

44. Energy Security: Ensuring the uninterrupted availability of energy sources / International Energy Agency. – Paris, 2021.
45. Пяткова, Н.И. Особенности исследования влияния угроз энергетической безопасности на надёжность энергоснабжения потребителей в современных условиях / Н.И. Пяткова, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2025. – № 4(40). – С. 128–137.
46. World Energy Outlook 2023 / International Energy Agency. – Paris, 2023.
47. Доклад о состоянии и перспективах развития электроэнергетики Российской Федерации / Министерство энергетики Российской Федерации. – Москва, 2023.
48. Анализ инвестиционной активности в отраслях топливно-энергетического комплекса / Счетная палата Российской Федерации. – Москва, 2024.
49. Генеральная схема развития газовой отрасли Российской Федерации на период до 2035 года (актуализированная редакция) / Министерство энергетики Российской Федерации. – Москва, 2023.
50. Энергетическая безопасность России (введение в проблему) / СЭИ СО РАН; рук. Н.И. Воропай, С.М. Клименко, Л.Д. Криворучский, Л.В. Массель. – Иркутск, 1997.
51. Массель, А.Г. Технология вычислительного эксперимента в исследованиях работы энергетических отраслей при реализации угроз энергетической безопасности / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов, Н.И. Пяткова // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 3(23). – С. 62–73.
52. Славин, Г.Б. Энергетическая безопасность. Термины и определения / Г.Б. Славин, М.Б. Чельцов. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 1999.
53. Массель, Л.В. Интеграция методов ситуационного анализа и математического моделирования в интеллектуальной системе ИРИС / Л.В. Массель, А.Ю. Горнов, С.В. Бахвалов // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – № спец. выпуск 1. – С. 43–49.

54. Макагонова, Н.Н. Возможности применения ситуационного анализа при исследовании проблемы энергетической безопасности / Н.Н. Макагонова, А.Г. Массель // Информационные и математические технологии в науке и управлении : труды XIII Байкальской Всероссийской конференции. – 2008. – Т. 2. – С. 236–240.

55. Массель, Л.В. Интеграция семантического и математического моделирования в исследованиях проблем энергетической безопасности / Л.В. Массель // Труды Международной конференции «Моделирование-2012». – Киев : ИПМЭ НАН Украины, 2012. – С. 270–273.

56. Массель, Л.В. Построение интеллектуальных систем для исследований энергетики на основе алгебраических сетей и онтологий: подход и реализация / Л.В. Массель, А.Н. Копайгородский, В.Л. Аршинский // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – № спец. вып. 1. – С. 50–58.

57. Ворожцова, Т.Н. Применение онтологий для моделирования ИТ-инфраструктуры и описания систем энергетики / Т.Н. Ворожцова, Н.Н. Макагонова, С.К. Скрипкин, А.П. Костюченко // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – № спец. вып. 1. – С. 4–10.

58. Ворожцова, Т.Н. Использование онтологий при моделировании программного комплекса / Т.Н. Ворожцова, С.К. Скрипкин // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – № спец. вып. 1. – С. 376–381.

59. Трахтенгерц, Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений: научно-практическое издание. Серия «Информатизация России на пороге XXI века» / Э.А. Трахтенгерц. – Москва : СИНТЕГ, 1998. – 376 с.

60. Массель, Л.В. Интеллектуальные информационные технологии поддержки принятия решений в исследованиях и обеспечении энергетической безопасности / Л.В. Массель, А.Г. Массель, В.Л. Аршинский // Труды Международной конференции «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного эксперимента». – Евпатория, 2010. – С. 192–196.

61. Массель, Л.В. Элементы теории алгебраических сетей / Л.В. Массель, П.А. Старостин, А.С. Липовецкий // Моделирование и обработка информации : сборник научных трудов. – Москва : МФТИ, 2008. – С. 139–147.
62. Аршинский, В.Л. Моделирование ситуаций с использованием когнитивных карт и Joiner-сетей / В.Л. Аршинский, Д.А. Фартышев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2008. – № спец. вып. – С. 148–151.
63. Heckerman, D. A Tutorial on Learning with Bayesian Networks / D. Heckerman. – Microsoft Research, 1995. – 57 p.
64. Тулупьев, А.Л. Байесовские сети: логико-вероятностный подход / А.Л. Тулупьев, С.И. Николенко, А.В. Сироткин. – Санкт-Петербург : Наука, 2006. – С. 341–342.
65. Массель, А.Г. Интеллектуальные информационные технологии для исследований проблем энергетической безопасности / А.Г. Массель, Е.В. Пяткова // Труды Всероссийского семинара с международным участием «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». Вып. 64. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2014. – С. 472–483.
66. Массель, А.Г. Интеллектуальная поддержка исследований проблемы энергетической безопасности. Системные исследования в энергетике / А.Г. Массель // Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН. – 2010. – Т. 40. – С. 227–234.
67. Копайгородский, А.Н. Разработка и интеграция основных компонентов информационной инфраструктуры научных исследований / А.Н. Копайгородский, Л.В. Массель // Вестник ИрГТУ. – 2006. – Т. 3. – № 2 (26). – С. 23–29.
68. Массель, А.Г. Интеллектуальная ИТ-среда для исследований проблемы энергетической безопасности / А.Г. Массель // Труды Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации и бизнесе». – Гурзуф, 2010. – С. 306–309.
69. Массель, Л.В. Интеллектуальная поддержка принятия решений при определении стратегии развития энергетики России и Беларуси с позиций энергетиче-

ской безопасности / Л.В. Массель, А.А. Михалевич, А.Г. Массель, Д.В. Римко, В.А. Рак // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 1 (72).

70. Ringkjøb, H.-K. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewables / H.-K. Ringkjøb, P.M. Haugan, I.M. Solbrekke // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 96. – P. 440–459.

71. Fattahi, A. A systemic approach to analyze integrated energy system modeling tools: A review of national models / A. Fattahi, J. Sijm, A. Faaij // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2020. – Vol. 133. – P. 110195.

72. Howells, M. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development / M. Howells, H. Rogner, N. Strachan, C. Heaps, H. Huntington, S. Kypreos, A. Hughes, S. Silveira, J. DeCarolis, M. Bazillian, A. Roehrl // Energy Policy. – 2011. – Vol. 39. – No.10. – P. 5850–5870.

73. Huppmann, D. The MESSAGEix Integrated Assessment Model and the ix modeling platform (ixmp): An open framework for integrated and cross-cutting analysis of energy, climate, the environment, and sustainable development / D. Huppmann, M. Gidden, O. Fricko, P. Kolp, C. Orthofer, M. Pimmer, N. Kushin, A. Vinca, A. Mastrucci, K. Riahi, V. Krey // Environmental Modelling & Software. – 2019. – Vol. 112. – P. 143–156.

74. Hunter, K. Modeling for insight using Tools for Energy Model Optimization and Analysis (Temoa) / K. Hunter, S. Sreepathi, J.F. DeCarolis // Energy Economics. – 2013. – Vol. 40. – P. 339–349.

75. Wiese, F. Balmorel open source energy system model / F. Wiese, R. Bramstoft, H. Koduvere, A. Pizarro Alonso, O. Balyk, J.G. Kirkerud, Å.G. Tveten, T.F. Bolkesjø, M. Münster, H. Ravn // Energy Strategy Reviews. – 2018. – Vol. 20. – P. 26–34.

76. Lund, H. EnergyPLAN – Advanced analysis of smart energy systems / H. Lund, J.Z. Thellufsen, P.A. Østergaard, P. Sorknæs, I.R. Skov, B.V. Mathiesen // Smart Energy. – 2021. – Vol. 1. – P. 100007.

77. SCANNER: модельно-информационный комплекс / под ред. А.А. Макарова. – Москва : ИНЭИ РАН, 2011.

78. Воропай, Н.И. Методические основы стратегического планирования развития энергетики / Н.И. Воропай, А.М. Клер, Ю.Д. Кононов // Энергетическая политика. – 2018. – № 3. – С. 35–44.

79. Еделев, А.В. Инструментарий для исследования энергетической безопасности федеральных округов России / А.В. Еделев, Н.М. Береснева // Вестник ИрГТУ. – 2011.

80. Массель, Л.В. Методы и технологии создания ИТ-инфраструктуры научных исследований / Л.В. Массель // Информационные и математические технологии в науке, технике и образовании. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2005. – Т. 1. – С. 65–72.

81. Массель, Л.В. ИТ-инфраструктура научных исследований: методический подход и реализация / Л.В. Массель, Е.А. Болдырев, Н.Н. Макагонова, А.Н. Копайгородский, А.В. Черноусов // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – С. 59–67.

82. Массель, Л.В. Компонентный подход к разработке ИТ-инфраструктуры системных исследований в энергетике / Л.В. Массель, А.Н. Копайгородский, А.В. Черноусов // Информационные технологии в науке, социологии, экономике и бизнесе. – Москва : МГАПИ, 2007. – С. 131–134.

83. Санеев, Б.Г. Методы и модели разработки региональных энергетических программ / Б.Г. Санеев, А.Д. Соколов, Г.В. Агафонов, А.В. Лагерев. – Новосибирск : Наука, 2003. – 140 с.

84. Еделев, А.В. Программный комплекс «Корректива» для исследований долгосрочного развития топливно-энергетического комплекса Вьетнама / А.В. Еделев, Н.И. Пяткова, А.В. Чемезов, Х. Нгуен // Программные продукты и системы. – 2014. – № 4. – С. 211–216.

85. Еделев, А.В. Формирование вариантов развития энергетики Вьетнама методами комбинаторного моделирования / А.В. Еделев, В.И. Зоркальцев, Доан Ван

Бинь, Нгуен Хоай Нам // Программные продукты и системы. – 2017. – № 2. – С. 172–179.

86. Фартышев, Д.А. Разработка многоагентного ПК ИНТЭК-М для исследований проблемы энергетической безопасности / Д.А. Фартышев // Программные продукты и системы. – 2010. – № 3. – С. 126–129.

87. Массель, Л.В. Инструментальные средства поддержки решений по обеспечению энергетической безопасности / Л.В. Массель, Н.Н. Макагонова, А.Р. Ершов // Методические вопросы исследований надежности больших систем энергетики. – Санкт-Петербург, 1997. – Т. 49. – С. 492–503.

88. Массель, Л.В. Интеграция информационных технологий в системных исследованиях энергетики / Л.В. Массель, Е.А. Болдырев, А.Ю. Горнов. – Новосибирск : Наука, 2003.

89. Болдырев, Е.А. Моделирование программного обеспечения на примере программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности / Е.А. Болдырев // Информационные технологии в науке, технике и образовании. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2002. – С. 40–45.

90. Аршинский, В.Л. Мультиагентный программный комплекс для исследований проблемы энергетической безопасности / В.Л. Аршинский, А.Г. Массель, Д.А. Фартышев // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2009. – Т. 3. – С. 283–289.

91. Фартышев, Д.А. Методика построения и разработка многоагентного программного комплекса для исследований проблемы энергетической безопасности / Д.А. Фартышев. – Иркутск : ИСЭМ СО РАН, 2010.

92. Massel, A.G. Agent-service Approach for Development of Intelligent Decision-making Support Systems / A.G. Massel, V.I. Galperov, V.R. Kuzmin // Proc. VIth Int. Workshop «Critical Infrastructures: Contingency Management, Intelligent, Agent-Based, Cloud Computing and Cyber Security» (IWCI 2019) : Advances in Intelligent Systems Research. – 2019. – P. 211–215.

93. Массель, А.Г. Программный компонент интеграции когнитивного и математического моделирования в экосистеме знаний в энергетике / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Системы высокой доступности. – 2026. – Т. 22. – № 1. – С. 35–40.

94. Massel, L. Integration of Intelligent and Mathematical Technologies for Decision Support in Research and Ensuring Energy Resilience / L. Massel, A. Massel, T. Mamedov // Proceedings of the Sixth International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’22) / eds. S. Kovalev, A. Sukhanov, I. Akperov, S. Ozdemir. – Cham : Springer, 2023. – Vol. 566. – P. 60–72. – (Lecture Notes in Networks and Systems).

95. Massel, L. Integration of Mathematical and Cognitive Modelling in the Software Package “INTEC-A” / L. Massel, A. Massel, T. Mamedov // Engineering Proceedings. – 2023. – Vol. 33. – No. 1. – Article 26.

96. Массель, Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения / Л.В. Массель // Онтология проектирования. – 2016. – Т. 6. – № 2 (20). – С. 149–161.

97. Массель, Л.В. Применение фрактального подхода при построении стратифицированной модели знаний оценки эффективности сложных систем / Л.В. Массель, Р.В. Ерженин // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 2. – С. 357–358.

98. Senderov, S.M. On Modern Approach to Assessing National Energy Security in Russia / S.M. Senderov // Energy Systems Research. – 2026. – Vol. 9. – No. 1. – P. 48–57.

99. Mamedov, T.G. Multi-agent software complex for researching the direction of development of the fuel and energy complex taking into account energy security “INTEC-A” / T.G. Mamedov, A.G. Massel // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 289. – Article 03004.

100. Массель, А.Г. Программный комплекс и цифровая модель ТЭК как основа цифрового двойника на основе интеллектуальных технологий / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Труды Международного научно-технического конгресса «Интел-

лектуальные системы и информационные технологии – 2021» («ИС & ИТ-2021», «IS&IT'21»). – 2021. – С. 254–260.

101. Массель, А.Г. Адаптация методики реинжиниринга унаследованных программных систем / А.Г. Массель, Т.Г. Мамедов // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2021. – № 4(24). – С. 88–99.

102. Массель, Л. В. Менеджер управления сценариями (SDECIM) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667849. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2020663456; заявл. 04.11.2020; зарегистр. 29.12.2020. Бюл. № 1.

103. Массель, Л. В. Менеджер управления словарями (VIM) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667041. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2020663388; заявл. 03.11.2020; зарегистр. 21.12.2020. Бюл. № 1.

104. Массель, Л. В. Менеджер управления моделями (MIM) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666559. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2020663405; заявл. 04.11.2020; зарегистр. 11.12.2020. Бюл. № 12.

105. Массель, Л. В. Программный комплекс «ИНТЭК-А» / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682594. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2022681771; заявл. 16.11.2022; зарегистр. 24.11.2022. Бюл. № 12.

106. Массель, Л. В. Программный комплекс «ИНТЭК-SAW» / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690744. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2025690480; заявл. 11.11.2025; зарегистр. 11.11.2025. Бюл. № 11.

107. Массель, Л. В. Веб версия ПК «ИНТЭК-А» / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686175. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2024685831; заявл. 06.11.2024; зарегистр. 06.11.2024. Бюл. № 11.

108. Массель, Л. В. База данных программного комплекса для исследований направлений развития ТЭК (ИНТЭК-SAW) / Л. В. Массель, А. Г. Массель, Т. Г. Мамедов // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025625362. Правообладатель ФГБУН ИСЭМ СО РАН. № 2025625063; заявл. 11.11.2025; зарегистр. 21.11.2025. Бюл. № 12.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. Свидетельства о государственной регистрации программ
для ЭВМ**



Рисунок А.1 – Свидетельство №2025690744. Программный комплекс «ИНТЭК-SAW» (личный вклад: проектирование и программная реализация компонентов интеграции семантического и математического моделирования)



Рисунок А.2 – Свидетельство №2025625362. База данных программного комплекса для исследований направлений развития ТЭК (ИНТЭК-SAW) (личный вклад: разработка структуры хранения моделей, сценариев, когнитивных карт и результатов вычислительных экспериментов)



Рисунок А.3 – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686175. Веб версия ПК «ИНТЭК-А» (личный вклад автора: проектирование и программная реализация web-ориентированных интерфейсных компонентов для работы с моделями, сценариями и результатами расчетов)



Рисунок А.4 – Свидетельство №2022682594. Программный комплекс «ИНТЭК-А»
(личный вклад: проектирование и реализация интерфейсных и прикладных
компонентов для управления моделями, сценариями и словарями)



Рисунок А.5 – Свидетельство №2020667849. Менеджер управления сценариями (SDECIM) (личный вклад: реализация функций создания, редактирования и хранения сценариев исследования)



Рисунок А.6 – Свидетельство №2020667041. Менеджер управления словарями (VIM) (личный вклад: реализация средств ведения справочной информации экономико-математической модели)



Рисунок А.7 – Свидетельство №2020666559. Менеджер управления моделями (МИМ) (личный вклад: реализация функций формирования, загрузки, редактирования и сохранения моделей исследования ТЭК)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Основные виды угроз энергетической безопасности

Таблица Б.1 – Основные виды угроз энергетической безопасности

Характер угроз энергетической безопасности	Последствия проявления угроз энергетической безопасности
Экономические угрозы	
Дефицит инвестиционных ресурсов, хроническое недофинансирование капитальных вложений в ТЭК и энергосбережение	Недостаточные объемы ввода новых мощностей, реконструкции и технического перевооружения объектов ТЭК и энергомашиностроения
	Некомпенсируемое выбытие производственных мощностей
	Сокращение геологоразведочных работ и ухудшение состояния сырьевой базы
	Формирование долгосрочных структурных дисбалансов в развитии энергетики
	Сохранение слабо диверсифицированной структуры топливно-энергетического баланса и баланса котельно-печного топлива, прежде всего вследствие доминирующей роли природного газа в европейской части страны
	Рост дефицита располагаемых мощностей, высокий уровень износа основных фондов, недостаточные темпы их обновления, недостаточность резервов мощностей и запасов топлива
	Запаздывание освоения новых перспективных районов добычи углеводородов (Ямал, шельф северных морей и др.), ограничивающее возможности наращивания ресурсной базы
	Сохранение высокой энергоёмкости экономики, низкий уровень энергоэффективности объектов и систем, преобладание энергоёмких производств в отраслевой структуре
	Усиление зависимости от импорта технологий и оборудования на фоне деградации отечественного энергомашиностроения и энергетического строительства и замедленного развития данных отраслей
Финансовая нестабильность экономики, задолженности и неплатежи в ТЭК	Рост социальной напряжённости и дестабилизация производственных процессов; усиление негативного воздействия инвестиционных ограничений
	Ограничение возможностей приобретения материалов, оборудования и топлива для отраслей ТЭК; нарушение устойчивости снабженческих цепочек

Продолжение таблицы Б.1

	Снижение потенциала самофинансирования инвестиционных программ, рост перерывов и сбоев в поставках топливно-энергетических ресурсов
	Углубление кризисных явлений в сфере теплоснабжения и затяжной характер выхода отрасли из кризиса
	Несовершенство институциональной среды и системы управления в энергетическом секторе
Низкий технический уровень продукции отечественного энергомашиностроения	Снижение технологического уровня отраслей ТЭК, недостаточная эффективность и надёжность оборудования, усиление зависимости от импорта энергетического оборудования
Недостаточная пропускная способность отдельных энерготранспортных (межрегиональных) связей при несбалансированности регионов по энергоносителям	Формирование региональных дефицитов ТЭР при наличии излишков в других регионах, ограничение возможностей диверсификации источников энергоснабжения и маневрирования резервами
Чрезмерная концентрация производства и транспортных потоков ТЭР	Повышенная вероятность крупных потерь мощности и резонансных аварий, рост аварийности, увеличение радиусов передачи мощности и транспорта ТЭР
	Ослабление возможностей самообеспечения территорий и потребителей, рост протяжённости коммуникаций и вероятности дефицитов и недопоставок ТЭР
Чрезмерная централизация теплоснабжения и частично электроснабжения	Повышенная зависимость энергоснабжения от протяжённых коммуникаций, снижение управляемости и устойчивости систем энергоснабжения
Недостаточная диверсификация энергоснабжения	Повышенная вероятность перебоев и недоотпусков энергии при нарушении поставок монопольного энергоносителя
Недостаточная ёмкость топлиохранилищ, запасов топлива и резервов производственных мощностей	Напряжённость энергобаланса, критическая зависимость потребителей от транспорта ТЭР, перерывы поставок и иные нарушения энергетической безопасности
Возможность опережающего роста спроса на ТЭР по сравнению с ростом предложения	Рост напряжённости энергобаланса и дефицит топливно-энергетических ресурсов у потребителей
Социально-политические угрозы	
Трудовые конфликты и забастовки на предприятиях ТЭК и сопряжённых отраслях	Перерывы поставок ТЭР, снижение качества энергоносителей, нарушение стабильности энергоснабжения и ремонтных циклов
Противоправные действия, острые политические конфликты, террористические акты и военные действия в районах размещения объектов ТЭК	Повреждение или вывод из строя источников ТЭР и энергетических коммуникаций, невозможность их эксплуатации, прекращение поставок, аварии и сверхнормативные потери

Продолжение таблицы Б.1

	Деградация систем энергообеспечения, срыв инвестиционных проектов и ввода мощностей, рост дефицитов ТЭР и региональной энергетической несбалансированности
Ослабление государственного регулирования и контроля в сфере энергоснабжения	Игнорирование задач повышения эффективности и устойчивости энергоснабжения, снижение результативности мер по обеспечению энергетической безопасности
Низкая квалификация производственного персонала и управленческих кадров ТЭК	Несвоевременное и неоптимальное принятие мер по обеспечению энергетической безопасности, низкое качество их реализации
Внешиэкономические и внешнеполитические угрозы	
Высокая зависимость ТЭК от импорта оборудования и технологий, возможный отказ зарубежных партнёров от поставок	Замедление ввода мощностей и обновления производственного аппарата, рост простоев, деградация отечественного энергомашиностроения, перебои и дефицит ТЭР
Зависимость энергоснабжения отдельных приграничных регионов от зарубежных партнёров	Перебои энергоснабжения регионов, региональные энергетические кризисы, необходимость переоборудования установок на альтернативные виды топлива
Дискриминационные меры зарубежных стран в отношении российских ТЭР	Снижение экспортных доходов и валютной выручки, осложнение сбыта ТЭР, сокращение инвестиций и ухудшение финансового состояния предприятий ТЭК
Техногенные угрозы	
Аварии, взрывы и пожары антропогенно-техногенного происхождения на объектах ТЭК	Повреждение или вывод из строя энергетических объектов и систем, ограничения и отключения потребителей
	Снижение производственного потенциала ТЭК, истощение резервов и запасов, дефицит ТЭР, длительные перерывы энергоснабжения, значительные затраты на ликвидацию последствий аварий
Природные угрозы	
Стихийные бедствия (землетрясения, наводнения, ураганы и др.)	Повреждение энергетических объектов и коммуникаций, ограничения потребителей, снижение производственного потенциала, дефицит ТЭР и длительные перерывы энергоснабжения
Суровые зимы с превышением нормативных температурных условий	Дефицит ТЭР, недостаточность мощностей по транспорту и производству конечных видов энергии

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты о внедрении результатов диссертационного исследования

 Рэспубліканскае навукова-вытворчае унітарнае прадпрыемства «ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» вул. Акадэмічная, 15, корп. 2, 220072, г. Мінск тэл. (017) 257 64 72, факс (017) 378 15 54 e-mail: ipe@ipe.by Р/р ВУ22 АКВВ 3012 0818 1001 8550 0000 у ААТ «АСБ Беларусбанк», г. Мінск БІК АКВВВУ2Х УНП 101292548 АКПА 37465805	Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ» ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, г. Минск тел. (017) 257 64 72, факс (017) 378 15 54 e-mail: ipe@ipe.by Р/с ВУ22 АКВВ 3012 0818 1001 8550 0000 в ОАО «АСБ Беларусбанк», г. Минск БИК АКВВВУ2Х УНП 101292548 ОКПО 37465805
--	--

15.06.2026 № 122-01-08/271

СПРАВКА О ВНЕДРЕНИИ

Настоящим подтверждается, что результаты кандидатской диссертации Мамедова Тимура Габилевича «Методы, модели и инструментальные средства интеллектуальной поддержки принятия решений в прогнозных исследованиях топливно-энергетического комплекса» использовались при выполнении научно-исследовательской работы по заданию Энергофизические системы и технологии 1.1 «Разработка методических основ устойчивого развития и функционирования энергетики Республики Беларусь» ГПНИ «Энергофизические системы и технологии» на 2026–2030 годы (подпрограмма 1.1 «Устойчивое развитие энергетики»), а именно:

- Методика интеграции семантического и математического моделирования в исследованиях направлений развития топливно-энергетического комплекса с позиции обеспечения энергетической безопасности.
- Модифицированная экономико-математическая модель ТЭК, включающая дополнительные уравнения, отражающие экономические, экологические и квазидинамические связи, что обеспечивает учет бюджетных, экологических и межпериодных ограничений при исследовании направлений развития ТЭК.
- Формализованная модель вычислительного эксперимента, отличающаяся интеграцией математических и семантических моделей при формировании вычислительных сценариев исследования направлений развития ТЭК.

Рисунок В.1 – Справка о внедрении результатов диссертационного исследования в научно-исследовательскую деятельность Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, лист 1

- Численный метод стохастической корректировки параметров экономико-математической модели ТЭК на основе метода Монте-Карло с использованием когнитивных весов.
- Многоагентный программный комплекс «ИНТЭК-SAW», поддерживающий предложенную методику, модифицированную экономико-математическую модель и технологию поддержки принятия стратегических решений по развитию ТЭК с позиции обеспечения энергетической безопасности.

Вышеперечисленные результаты диссертационного исследования Мамедова Тимура Габилевича приняты к использованию в деятельности Института энергетики Национальной академии наук Беларуси.

Директор Республиканского
научно-производственного
унитарного предприятия
«Институт энергетики
Национальной академии наук Беларуси»,
к. ф.-м. н.



А.А. Бринь

Рисунок В.2 – Справка о внедрении результатов диссертационного исследования в научно-исследовательскую деятельность Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, лист 2

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

ФГБОУ ВО «ИГУ»

Вокин А.И.

2026 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается, что результаты интеллектуальной деятельности: «Программный комплекс «ИНТЭК-SAW»» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690744), «База данных программного комплекса для исследований направлений развития ТЭК (ИНТЭК-SAW)» (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025625362), «Веб версия ПК «ИНТЭК-А»» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686175), «Программный комплекс «ИНТЭК-А»» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682594), «Менеджер управления сценариями (SDECIM)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667849), «Менеджер управления словарями (VIM)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667041) и «Менеджер управления моделями (MIM)» (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666559) применены при чтении курса «Интеллектуальные системы и технологии» в Институте математики и информационных технологий ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ИГУ»).

Директор ИМИТ ИГУ

Фалалеев М.В.

Рисунок В.3 – Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИГУ»



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящим актом подтверждается, что программы для ЭВМ и база данных: «Программный комплекс «ИНТЭК-SAW»» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025690744), «База данных программного комплекса для исследований направлений развития ТЭК (ИНТЭК-SAW)» (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025625362), «Веб версия ПК «ИНТЭК-А»» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024686175), «Программный комплекс «ИНТЭК-А»» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022682594), «Менеджер управления сценариями (SDECIM)» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667849), «Менеджер управления словарями (VIM)» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667041) и «Менеджер управления моделями (MIM)» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020666559) применены при чтении курса «Интеллектуальные системы и технологии» (направление подготовки 09.03.02 «Информационные системы и технологии») в Институте информационных технологий и анализа данных ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»).

Директор института
ИТиАД, ИРНИТУ

Говорков А.С.

Рисунок В.4 – Акт внедрения результатов диссертационного исследования в учебный процесс ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»