

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(КНЦ СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН)

УДК 519.63:519.64

Рег. № НИОКТР 121081900115-1

Рег. № ИКРБС

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ КНЦ СО РАН

чл.-корр. РАН

_____ А. А. Шпедт

« » января 2024 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

КОМПЛЕКСНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ, ИНФОРМАЦИОННОЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИЧЕСКИХ,
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ
(заключительный)

Направление фундаментальных исследований

1.1.3. Математическое моделирование

(№ FWES-2021-0003)

Руководитель НИР
директор ИВМ СО РАН
член-корреспондент РАН

_____ В. В. Шайдуров

Красноярск 2024

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы директор ИВМ СО РАН член-корреспондент РАН	_____	В.В. Шайдуров (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
Исполнители:		
зам. директора ИВМ СО РАН по научной работе, канд. техн. наук	_____	С.В. Исаев (Раздел 4)
	(подпись, дата)	
зам. директора ИВМ СО РАН по научной работе, канд. физ.-мат. наук	_____	Д.А. Нестеров (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
уч. секр., канд. физ.-мат. наук	_____	А.В. Вяткин (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
зав. отд., канд. физ.-мат. наук	_____	В.С. Герасимов (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
зав. отд., канд. физ.-мат. наук	_____	Е.Д. Кареева (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
зав. отд., канд. техн. наук	_____	Т.Г. Пенькова (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
гл. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук	_____	Н.В. Еркаев (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
гл. науч. сотр., д-р техн. наук	_____	А.В. Лапко (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
гл. науч. сотр., д-р техн. наук	_____	Л.Ф. Ноженкова (Разделы 3, 4)
	(подпись, дата)	
вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук	_____	В.В. Денисенко (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук	_____	И.В. Краснов (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
вед. науч. сотр., д-р техн. наук	_____	В.А. Лапко (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
вед. науч. сотр., д-р физ.-мат. наук	_____	И.И. Рыжков (Раздел 1, 2)
	(подпись, дата)	
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	Е.Н. Васильев (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	В.А. Деревянко (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	

ст. науч. сотр., канд. хим. наук	_____	Е.В. Елсуфьев (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	А.Е. Ершов (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
ст. науч. сотр., д-р техн. наук	_____	О.С. Исаева (Разделы 3, 4)
	(подпись, дата)	
ст. науч. сотр., канд. техн. наук	_____	А.В. Коробко (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
ст. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	М.Ю. Сенашова (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	Л.В. Гилева (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	И.Л. Исаев (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
науч. сотр.	_____	Д.Д. Кононов (Раздел 4)
	(подпись, дата)	
науч. сотр., канд. техн. наук	_____	Р.В. Морозов (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
науч. сотр., канд. техн. наук	_____	А.И. Ноженков (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	В.С. Петракова (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
мл. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	В.В. Деревянко (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
мл. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук	_____	С.В. Козлова (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
мл. науч. сотр.	_____	Н.П. Фадеева (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
мл. науч. сотр.	_____	М.В. Якубович (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
прогр. 1-ой кат.	_____	А.М. Алдошкина (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
прогр. 1-ой кат.	_____	А.А. Коробко (Раздел 4)
	(подпись, дата)	
прогр. 1-ой кат.	_____	Н.В. Кулясов (Раздел 4)
	(подпись, дата)	

прогр. 1-ой кат.	_____	И.А. Ларионова (Раздел 4)
	(подпись, дата)	
прогр. 1-ой кат.	_____	А.В. Малышев (Раздел 4)
	(подпись, дата)	
прогр. 1-ой кат.	_____	А.С. Михалев (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
вед. инж.	_____	А.В. Макуха (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
ст. инж.	_____	Д.П. Емельянов (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
ст. инж.	_____	А.А. Пустынский (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
ст. инж.	_____	А.А. Сиротинин (Разделы 1, 2)
	(подпись, дата)	
ст. инж.	_____	И.В. Тимошина (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
инж.	_____	И.Р. Адаев (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
инж.	_____	Р.А. Голубев (Раздел 1)
	(подпись, дата)	
инж.	_____	И.А. Харченко (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
инж.	_____	К.С. Шефтель (Раздел 3)
	(подпись, дата)	
инж.	_____	Г.В. Шадрина (Раздел 2)
	(подпись, дата)	
нормоконтроль	_____	А.В. Вяткин
	(подпись, дата)	

РЕФЕРАТ

Отчёт 129 с., 54 рис., 3 табл., 4 прил.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ, НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, НАНОЧАСТИЦЫ

В соответствии с планами работ на 2021-2023 годы исследования проводились по четырем разделам.

В разделе «Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса» рассмотрены математические модели ионосферных электрических полей и токов как фрагменты общих ионосферных моделей. Исследованы условия генерации электрического поля в токовом слое на границе и хвосте магнитосферы на основе диссипативной МГД-модели.

Разработана математическая модель для выявления тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры по показаниям встроенных датчиков с целью локализации положения и источника возникающих отклонений.

Разработаны алгоритмы получения и исследования устойчивых схем предиктор-корректор на основе симметричных линейных многошаговых методов для имитации движения группировки навигационных космических аппаратов.

Представлены математические модели диффузии и термодиффузии в смесях для описания экспериментов, проводимых в наземных и космических условиях.

В разделе «Математическое моделирование физических процессов и устройств» рассмотрена математическая модель блока охлаждения для надводных и подводных судов, разработан и изготовлен экспериментальный стенд для определения энергетических характеристик узлов этого блока.

Представлен прямой метод загрузки тёмной бихроматической оптической ловушки из равновесной смеси газов при комнатной температуре. Изучена зависимость времени жизни светоиндуцированных ионных кулоновских цепочек от количества ионов и параметров оптической решётки.

Представлены модели упорядоченных ансамблей холодных атомных частиц, формируемых и удерживаемых полем коллинеарной суперпозиции косинус-Гауссовских бихроматических лазерных пучков. Выявлены условия максимального усиления локального поля за счет настройки поверхностного решеточного резонанса путем варьирования геометрических параметров структуры.

Представлены математические модели ионного транспорта в наноструктурированных мембранных материалах под действием электрического поля, а также модели переноса ионов в нанопористых мембранных материалах под действием разности давлений.

В разделе «Исследование больших данных, обнаружение новых знаний и прогнозирование состояния сложных систем и объектов» представлены алгоритмы выявления аномальных изменений контролируемых параметров, свидетельствующих о нарушении технологических процессов. Описаны модели, позволяющие обнаруживать и прогнозировать технологические нарушения в цикле производства алюминия по значениям контролируемых параметров на основе применения совокупности методов математической статистики, интеллектуального анализа данных и машинного обучения.

Представлены алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений, предложены метамодель и алгоритмы детализации интегральных оценок в целях информационной поддержки по планированию мероприятий долгосрочного развития территорий и формированию стратегий снижения рисков чрезвычайных ситуаций.

В разделе «Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ» представлена архитектура универсальной программной среды обработки данных на основе интеграции инструментов управления и анализа “больших данных”. Описан прототип цифровой платформы, поддерживающей полный цикл обработки и интеллектуального анализа данных. Рассмотрены методы, алгоритмы и программные средства, позволяющие реализовать стандартизированный обмен данными между гетерогенными системами.

Рассмотрено также обеспечение безопасности облачной инфраструктуры Интернета вещей (IoT) и кибербезопасность сервисов на примере корпоративной сети Красноярского научного центра.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	10
1. Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса.....	12
1.1. Математическое моделирование вклада магнитосферных и ионосферных электрических генераторов в поля и токи Глобальной электрической цепи Земли, диссипативных процессов, вызывающих генерацию электрического поля на границе и в хвосте магнитосферы, пространственной структуры экваториальных электроджетов Земли.....	12
1.1.1 Генерация электрического поля на границе магнитосферы.....	15
1.2. Разработка и экспериментальная проверка математических моделей и алгоритмов построения тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры спутников по результатам показаний встроенных температурных датчиков.....	19
1.3. Разработка базового программного обеспечения для формирования кодовых и фазовых псевдодалномерных данных для решения задачи оценивания текущих навигационных параметров для длительного движения спутника по возмущенной орбите с возможностью выбора метода интегрирования уравнений движения и уточнения данных.....	24
1.4. Математические модели диффузии и термодиффузии в смесях для описания экспериментов, проводимых в наземных и космических условиях.....	29
1.4.1. Устойчивость разделения бинарных смесей в термодиффузионной колонне.....	29
1.4.2. Обработка данных космического эксперимента DCMIX 4 по исследованию диффузии и термодиффузии в тройных смесях.....	31
2. Математическое моделирование физических процессов и устройств.....	34
2.1. Разработка теплофизической модели блока охлаждения для подводных и надводных судов и разработка стенда для исследования энергетических характеристик его конструктивных узлов. Экспериментальная проверка характеристик отдельных узлов и проведение испытаний экспериментального образца автономного блока.....	34
2.1.1. Разработка теплофизической модели блока охлаждения для подводных и надводных судов.....	34
2.1.2. Разработка стенда для исследования энергетических характеристик конструктивных узлов блока охлаждения.....	37
2.1.3. Экспериментальная проверка характеристик отдельных узлов и проведение испытаний экспериментального образца автономного блока.....	38

2.2. Прямой метод загрузки тёмной бихроматической оптической ловушки из равновесной смеси газов при комнатной температуре. Зависимость времени жизни светоиндуцированных ионных кулоновских цепочек от количества ионов и параметров оптической решётки.....	41
2.3. Модели упорядоченных ансамблей холодных атомных частиц, формируемых и удерживаемых полем коллинеарной суперпозиции косинус-Гауссовских бихроматических лазерных пучков.....	42
2.4. Условия максимального усиления локального поля за счет настройки поверхностного решеточного резонанса путем варьирования геометрических параметров структуры.....	48
2.5. Математические модели ионного транспорта в наноструктурированных мембранных материалах под действием электрического поля.....	51
2.6. Модели переноса ионов в напористых мембранных материалах под действием разности давлений для объяснения экспериментальных данных в области фильтрации.....	56
3. Исследование больших данных, обнаружение новых знаний и прогнозирование состояния сложных систем и объектов.....	61
3.1. Алгоритмы выявления аномальных изменений контролируемых параметров, свидетельствующих о нарушении технологического процесса.....	61
3.1.1. Алгоритм анализа полноты программ испытаний в технологическом процессе производства бортовой аппаратуры космического аппарата.....	61
3.1.2. Алгоритмы выявления отклонений в технологическом процессе производства алюминия.....	63
3.2. Модели и алгоритмы раннего обнаружения технологических нарушений с применением экспертных знаний и выявленных закономерностей работы сложного технического объекта.....	67
3.3. Методы выявления особенностей структурирования и связей выделенных структурных единиц с биологическими свойствами носителей генетической информации.....	69
3.4. Популяционно-эволюционный анализ геномов вирусов семейства Coronaviridae.....	71
3.5. Разработка методики синтеза структуры статистических моделей сложных динамических систем. Разработка непараметрических алгоритмов распознавания образов и автоматической классификации для условий больших объёмов статистических данных и «быстрых» методов их оптимизации в многомерном пространстве признаков исследуемых сложных систем.....	74
3.6. Алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений.....	79

3.7. Мета модель и алгоритмы детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий.....	84
4. Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ.....	87
4.1. Методы, алгоритмы и программное обеспечение для реализации стандартизированного обмена данными между гетерогенными системами.....	87
4.2. Методические и программные средства поддержки оперативной аналитической обработки данных научных исследований в рамках модельно-ориентированных систем сбора данных.....	88
4.3. Программное обеспечение трансформации данных различных форматов путем сопоставления структурных элементов и выполнения преобразований по установленным взаимным отношениям.....	91
4.4. Прототип цифровой платформы для поддержки полного цикла обработки и интеллектуального анализа данных.....	93
4.5. Формирование управляющих решений на основе комплексного оценивания состояния территорий с применением цифровой платформы.....	96
4.6. Архитектура универсальной программной среды обработки данных на основе интеграции инструментов управления и анализа “больших данных”.....	100
4.7. Безопасность облачной инфраструктуры Интернета вещей (IoT).....	101
4.8. Кибербезопасность сервисов на примере корпоративной сети ФИЦ КНЦ СО РАН.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	110
ПРИЛОЖЕНИЕ А Научные статьи к отчету за 2021 год.....	115
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Научные статьи к отчету за 2022 год.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ В Научные статьи к отчету за 2023 год.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ за 2021-2023 годы.....	128

ВВЕДЕНИЕ

В разделе «Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса» рассмотрены математические модели ионосферных электрических полей и токов как фрагменты общих ионосферных моделей. Исследованы условия генерации электрического поля в токовом слое на границе и хвосте магнитосферы на основе диссипативной МГД-модели.

Разработана математическая модель для выявления тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры по показаниям ограниченного числа встроенных датчиков с целью локализации положения и источника возникающих отклонений.

Разработаны алгоритмы получения и исследования устойчивых схем предиктор-корректор на основе симметричных линейных многошаговых методов для имитации движения группировки навигационных космических аппаратов.

Представлены математические модели диффузии и термодиффузии в смесях для описания экспериментов, проводимых в наземных и космических условиях.

В разделе «Математическое моделирование физических процессов и устройств» рассмотрена математическая модель блока охлаждения для надводных и подводных судов, разработан и изготовлен экспериментальный стенд для определения энергетических характеристик узлов этого блока.

Представлен прямой метод загрузки тёмной бихроматической оптической ловушки из равновесной смеси газов при комнатной температуре. Изучена зависимость времени жизни светоиндуцированных ионных кулоновских цепочек от количества ионов и параметров оптической решётки.

Представлены модели упорядоченных ансамблей холодных атомных частиц, формируемых и удерживаемых полем коллинеарной суперпозиции косинус-Гауссовских бихроматических лазерных пучков. Выявлены условия максимального усиления локального поля за счет настройки поверхностного решеточного резонанса путем варьирования геометрических параметров структуры.

Представлены математические модели ионного транспорта в наноструктурированных мембранных материалах под действием электрического поля, а также модели переноса ионов в нанопористых мембранных материалах под действием разности давлений.

В разделе «Исследование больших данных, обнаружение новых знаний и прогнозирование состояния сложных систем и объектов» представлены алгоритмы

выявления аномальных изменений контролируемых параметров, свидетельствующих о нарушении технологического процесса. Описаны модели, позволяющие обнаруживать и прогнозировать технологические нарушения типа «конус» и «анодный эффект» в цикле производства алюминия по значениям контролируемых параметров на основе применения совокупности методов математической статистики, интеллектуального анализа данных и машинного обучения. Результаты апробации демонстрируют достаточную точность разработанных моделей и алгоритмов для практического применения. Представлены также алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений; предложены метамодель и алгоритмы детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий. Разработанная модель состояния природно-техногенной безопасности является основой информационной поддержки по планированию мероприятий долгосрочного развития территорий и формированию стратегий снижения рисков чрезвычайных ситуаций.

В разделе «Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ» представлена архитектура универсальной программной среды обработки данных на основе интеграции инструментов управления и анализа “больших данных”. Описан прототип цифровой платформы, поддерживающей полный цикл обработки и интеллектуального анализа данных и отличающейся реализацией авторских методов углубленного интегрального анализа комплексных показателей социально-экономического развития территорий. Рассмотрены методы, алгоритмы и программные средства, позволяющие реализовать стандартизированный обмен данными между гетерогенными системами на основе формирования унифицированного представления структур данных. Рассмотрены методические и программные средства поддержки формирования аналитических отчетов, программное обеспечение трансформации данных различных форматов. Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение применяется к построению аналитических моделей и для графической визуализации результатов аналитической обработки данных различных форматов.

Рассмотрено также обеспечение безопасности облачной инфраструктуры Интернета вещей (IoT) и кибербезопасность сервисов на примере корпоративной сети Красноярского научного центра.

1. Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса

1.1. Математическое моделирование вклада магнитосферных и ионосферных электрических генераторов в поля и токи Глобальной электрической цепи Земли, диссипативных процессов, вызывающих генерацию электрического поля на границе и в хвосте магнитосферы, пространственной структуры экваториальных электроджетов Земли

В течение 2021-2023 лет проведены исследования Глобальной электрической цепи Земли (ГЭЦ). Основным прогрессом по сравнению с предыдущими версиями нашей модели достигнуто за счет использования глобального распределения гроз, полученного из наземной Всемирной сети определения местоположения молний (WWLLN), и спутниковых данных о глобальном распределении токов между магнитосферой и ионосферой. Построены глобальные карты грозовой активности на основе данных WWLLN за 2007-2009 годы. Такие карты созданы для разных сезонов и периодов универсального времени. Общее количество вспышек молнии в данных WWLLN на порядок меньше, чем в спутниковых данных системы OTD/LIS. Тем не менее, ключевые особенности пространственного распределения и сезонные тенденции, полученные наземными и спутниковыми методами, находятся в удовлетворительном соответствии. Основное различие заключается в отсутствии суточных вариаций, аналогичных кривой Карнеги, в данных WWLLN при их наличии в спутниковых данных. Это касается количества молний как на всей Земле, так и отдельно в основных грозовых областях. Зависимость от местного времени также слабее выражена в данных WWLLN. Эти карты использованы как входные данные для расчета ионосферных электрических полей и токов. Тем самым построена наиболее совершенная на настоящий момент модель ионосферной части ГЭЦ. Этого удалось достичь за счет использования более совершенного математического аппарата: созданного нами ранее численного метода решения задач электропроводности с несимметричными тензорными коэффициентами. Вторым важнейшим результатом является построенная математическая модель изменения электрического поля в атмосфере во время геомагнитных бурь. В рамках квазистационарной модели проводника, состоящего из атмосферы и ионосферы, рассчитаны ионосферные электрические поля в период главной фазы сильной геомагнитной бури 17 марта 2015 года. При этом для описания магнитосферного источника электрического поля использованы спутниковые данные о глобальном распределении токов между магнитосферой и

ионосферой. Изменение электрического потенциала в ионосфере приводит к изменению электрического поля во всей атмосфере, включая ее приземный слой. Для бури 17-18 марта 2015 года получено, что учет вариаций ионосферного электрического поля при расчете атмосферного электрического поля позволяет воспроизвести основные черты наблюдаемых в Геофизической обсерватории «Борок» возмущений электрического поля хорошей погоды.

При изучении атмосферной части глобальной электрической цепи поверхность Земли и ионосферу в первом приближении рассматривают как идеальные проводники с разностью потенциалов, образующейся за счет грозовой активности. Основной поправкой является распределение потенциала в ионосфере, порождаемое магнитосферными и ионосферными генераторами. В силу линейности задачи электропроводности их можно рассматривать отдельно.

Токи из грозовых областей попадают в лежащие над ними части ионосферы, а возвращаются на Землю как токи хорошей погоды глобально. Необходимый для этого перенос заряда по ионосфере происходит за счет внутриионосферных электрических токов. Как во всякой глобальной токовой системе происходит концентрация токов в областях с высокой проводимостью: в дневной ионосфере, в авроральных зонах и в окрестности геомагнитного экватора. В последнем случае интересующая нас интегральная проводимость поперек магнитного поля велика, поскольку длинные участки магнитных силовых линий расположены внутри E и F слоев, где велики локальные Педерсеновская и Холловская проводимости. Сила тока электроструи пропорциональна проводимости области электроструи A_{jet} , которая равна интегралу по магнитным силовым линиям, лежащим в этой области, от интегральной Каулинговской проводимости.

Мы сосредоточились на экваториальных электроструях, ввиду высокой вероятности именно в них наблюдать ионосферную часть ГЭЦ. Поскольку грозовая активность варьируется в течение суток и зависит от сезона, соответствующие вариации происходят в ионосферных токах, включая положение и интенсивность электроструй. Изучение последних позволяет выделить место и время измерений, позволяющие отстроиться от других генераторов. Это должна быть ночь, поскольку другие экваториальные электроструи ночью почти отсутствуют, и вблизи меридианов, ограничивающих основные грозовые области, поскольку именно через такие сечения окрестности геомагнитного экватора текут струи с максимальной силой тока.

На рисунке 1.1 показана диаграмма сезонной зависимости экваториальных электроструй на момент времени 18 часов универсального времени. На основании данных Карнеги известно, что в это время электрическое поле хорошей погоды имеет максимальную напряженность. Это соответствует большому полному току, протекающему в ГЭЦ. Ток ночных электроструй в 18 часов достигает наибольшей силы в декабре вблизи магнитного меридиана 230° , то есть над Тихим океаном к северо-востоку от Новой Гвинеи. Это неудобное место для измерения магнитных вариаций. Наземные измерения могут быть выполнены вблизи этого меридиана в Таиланде.

Проведено также исследование пространственной структуры этих экваториальных электроджетов (электроструй). Рассчитаны создаваемые ими магнитные возмущения, которые такие электроструи создают на поверхности Земли и в ионосфере. Они могут достигать 0.3 нТ, то есть, в принципе, могут быть измерены с помощью меридиональной цепочки высокочувствительных магнитометров. Как альтернативу можно использовать спутниковые измерения.

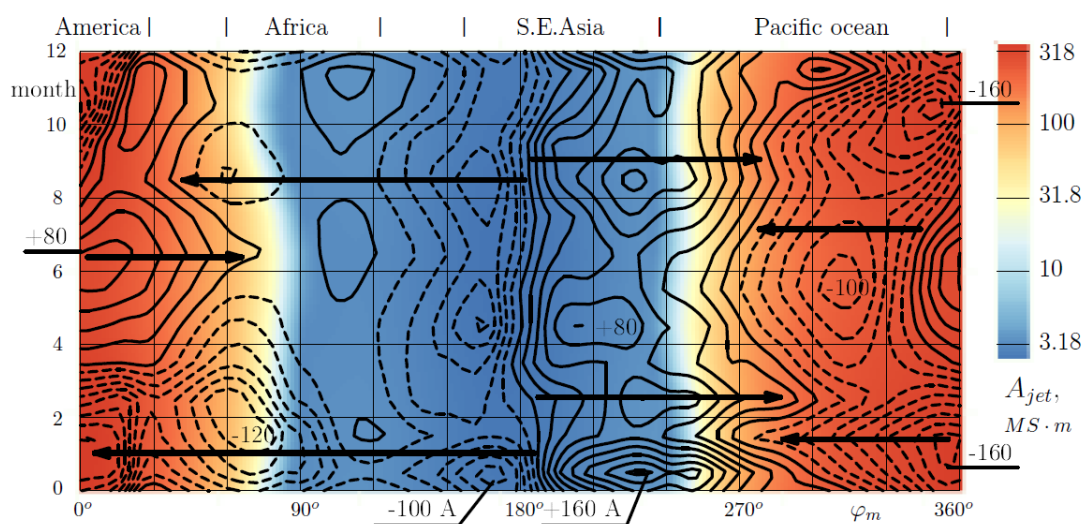


Рисунок 1.1 – Сезонные вариации силы тока экваториальных электроструй в 18 часов универсального времени. Линии уровня проведены с интервалом в 20 А, штриховыми линиями показаны токи в западном направлении. Стрелками показаны направления электроструй. Цветом показана проводимость области электроструи A_{jet}

Из данных наблюдений следует, что во время геомагнитных бурь происходят изменения электрического поля в атмосфере. В рамках квазистационарной модели проводника, состоящего из атмосферы и ионосферы, мы рассчитали ионосферные электрические поля в период главной фазы сильной геомагнитной бури 17 марта 2015 года. При этом для описания

магнитосферного источника электрического поля использованы спутниковые данные о глобальном распределении токов между магнитосферой и ионосферой. Изменение электрического потенциала в ионосфере приводит к изменению электрического поля во всей атмосфере, включая ее приземный слой. Важно, что в период геомагнитной бури обсерватория, в которой измеряется атмосферное электрическое поле, существенно меняет свое положение относительно направления на Солнце. Можно сказать, что обсерватория крутится вместе с Землей под ионосферной картиной, развивающейся во времени. Это влияет как на ионосферное электрическое поле, так и на атмосферную часть глобальной электрической цепи, наблюдаемой в обсерватории. Из этого следует, что при оценке влияния геомагнитной бури на атмосферное электрическое поле в конкретной обсерватории необходимо учитывать местное время при сопоставлении данных измерений с индексами геомагнитной активности. Для бури 17-18 марта 2015 года нами получено, что учет вариаций ионосферного электрического поля при расчете атмосферного электрического поля позволяет воспроизвести основные черты наблюдаемых в Геофизической обсерватории «Борок» возмущений электрического поля хорошей погоды. На основе результатов моделирования показано, что во время экстремально сильных магнитных бурь в некоторых местах на Земле формируются вариации того же масштаба, что и само поле хорошей погоды.

1.1.1. Генерация электрического поля на границе магнитосферы.

Диссипативные процессы на границе магнитосферы существенно зависят от структуры магнитного поля в магнитослое, располагающемся между границей магнитосферы и головной ударной волной. На фронте ударной волны происходит значительный скачок плотности, температуры и давления плазмы, а также напряженности магнитного поля. При этом ключевую роль играет направление межпланетного магнитного поля (ММП) по отношению к вектору магнитного момента Земли. В ходе исследований построена замкнутая эмпирическая модель магнитного поля магнитослоя, основанная на многолетнем массиве данных космических аппаратов. В качестве входных параметров модель учитывает три компоненты наблюдаемого ММП, динамическое давление солнечного ветра и угол наклона диполя Земли. В основе архитектуры модели лежит общее представление магнитного поля в виде суммы тороидальных и полоидальных составляющих, удовлетворяющих условию сохранения магнитного потока. В результате адаптации модели к множеству данных, состоящему из 1 291 380 одномоментных записей спутниковых магнитометров, получен набор из 960 коэффициентов, обеспечивающих количественное описание магнитного поля в

магнитослое.

На рисунке 1.2 показаны распределения интенсивности магнитного поля магнитослоя в случаях северного (слева) и южного (справа) направлений ММП. Видно, что при северном ММП магнитное поле значительно усилено в пограничном слое, прилегающем к магнитосферной границе. Такое усиление поля, демонстрируемое эмпирической моделью, хорошо согласуется с идеальной магнитогазодинамической (МГД) моделью обтекания магнитосферы солнечным ветром, в которой нет диссипации. Это значит, что при северном ММП диссипация не играет существенной роли в магнитослое, по крайней мере на дневной стороне. Однако, при южном ММП ситуация кардинально меняется. В этом случае максимум интенсивности магнитного поля в магнитослое оказывается значительно ниже, чем при северном ММП. Следует отметить, что в магнитослое усиливается лишь составляющая ММП, поперечная к скорости солнечного ветра. Когда вектор ММП строго коллинеарен скорости ветра, усиления магнитного поля вообще не происходит, как видно на рисунке 1.3 (справа). На рисунке 1.3 (слева) также показано распределение магнитного поля при наклонном ММП по отношению к скорости солнечного ветра. В этом случае можно видеть некоторое усиление магнитного поля, но в меньшей степени, чем при строго северном направлении ММП. Таким образом, можно заключить, что поперечные компоненты ММП (по отношению к скорости солнечного ветра) претерпевают значительное усиление в магнитослое и оказывают наиболее сильное влияние на магнитосферу. Помимо направления важна также величина ММП, характеризуемая параметром Маха-Альфвена (Ma), имеющим смысл отношения скорости ветра к альфвеновской скорости. При уменьшении параметра Ma толщина магнитослоя, а также области усиленного магнитного поля могут значительно возрастать, как показано в работе [2].

Ослабление магнитного поля при южном ММП можно объяснить повышенной диффузией магнитного поля, связанной с диссипацией. Эти процессы идут тем интенсивнее, чем выше плотность электрического тока на границе магнитосферы, которая получается минимальной при северном направлении ММП и максимальной при южном направлении. Интенсивная диффузия магнитного поля сопровождается генерацией электрического поля на границе магнитосферы, которое в свою очередь создает электрические токи, втекающие в ионосферу Земли.

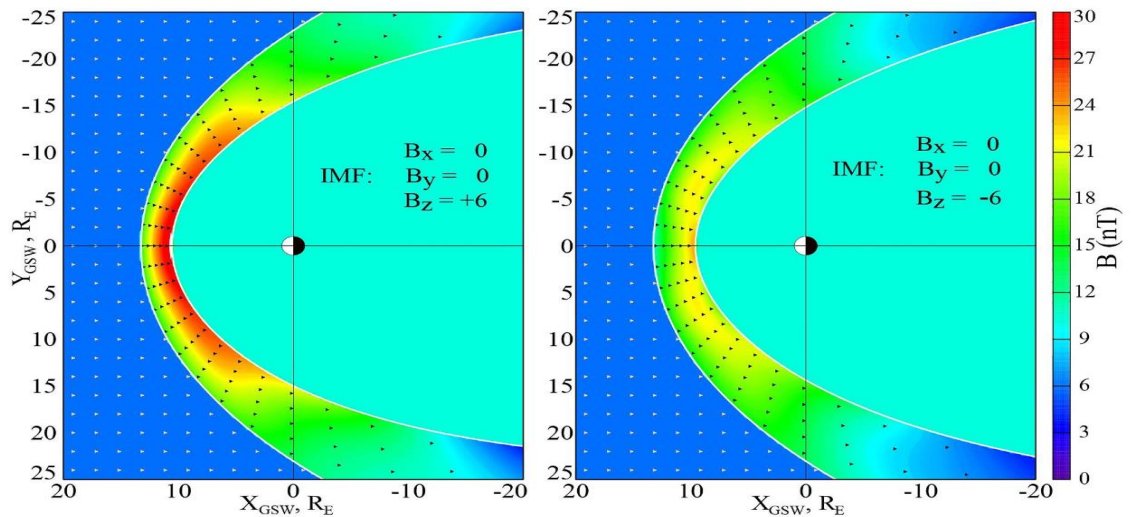


Рисунок 1.2 – Распределение интенсивности магнитного поля при северном (слева) и южном (справа) ММП

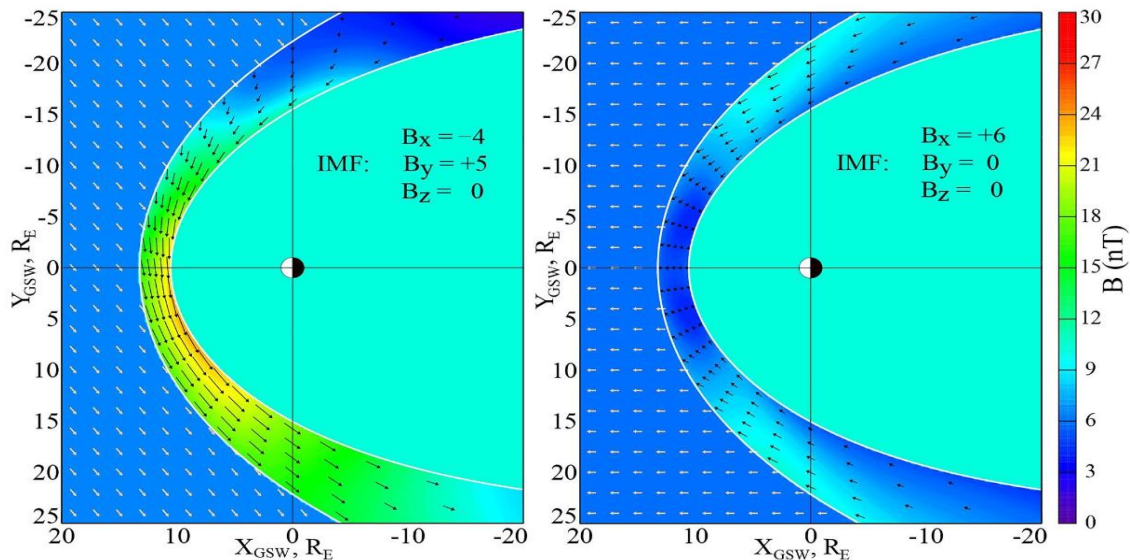


Рисунок 1.3 – Распределение интенсивности магнитного поля при ММП в плоскости магнитного экватора. Слева – ММП направлено под углом к скорости солнечного ветра. Справа – ММП строго параллельно скорости солнечного ветра

Таким образом, электрическое поле и токи, генерируемые на границе и проникающие внутрь магнитосферы, наиболее сильно выражены именно при южном направлении ММП. В этом случае возникают условия для так называемого пересоединения магнитных полей солнечного и земного происхождения, при котором происходит кардинальное изменение топологии магнитного поля. Для описания этого процесса применена резистивная МГД-модель, учитывающая неоднородное аномальное удельное сопротивление плазмы, величина которого связана с плотностью электрического тока. Физической причиной возникновения

аномального сопротивления является плазменная турбулентность, развивающаяся на границе магнитосферы. Максимальная величина аномального сопротивления связана с существующим эмпирическим коэффициентом Бомовской диффузии, установленным экспериментально для турбулентной плазмы. При этом максимальная напряженность электрического поля E_m на границе магнитосферы определяется формулой $E_m = \varepsilon B^2 / (\mu_0 \rho)^{1/2} \sin(\theta/2)$, где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, B , ρ – магнитное поле и массовая плотность на границе магнитосферы, θ – угол отклонения поперечной к скорости ветра составляющей ММП от северного направления, ε – безразмерный параметр, характеризующий интенсивность магнитного пересоединения и пропорциональный квадратному корню из обратного локального числа Лундквиста S : $\varepsilon = 0.6/S^{1/2}$. Здесь безразмерное число Лундквиста определяется формулой: $S = V_A l_d / \nu_m$, где ν_m – магнитная вязкость, принимаемая равной коэффициенту Бомовской диффузии, V_A – альфвеновская скорость, l_d – характерная длина неоднородности аномального сопротивления плазмы. На рисунке 1.4 показана расчетная конфигурация магнитных силовых линий на дневной границе при южном направлении ММП.

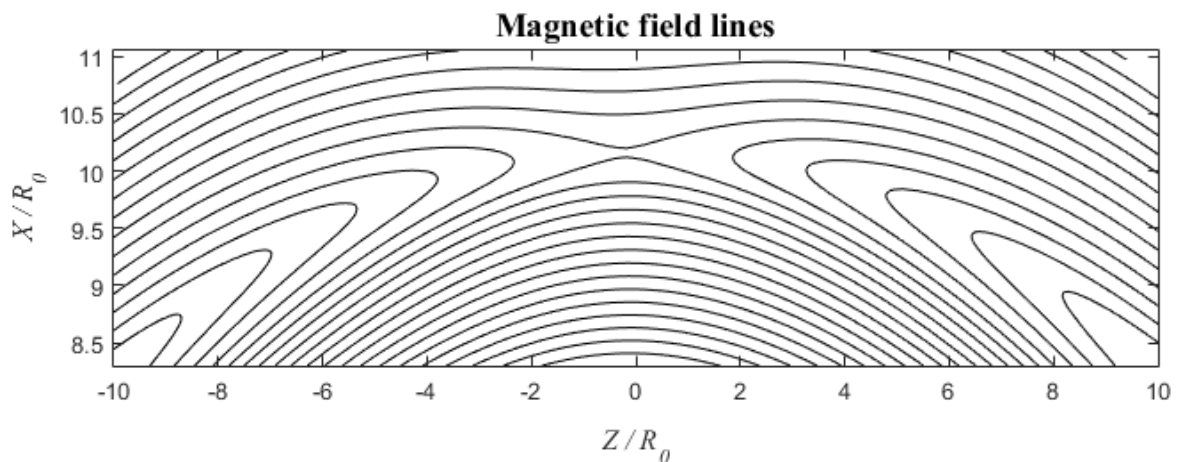


Рисунок 1.4 – Магнитные силовые линии вблизи границы магнитосферы при южном ММП

Полученная на основе моделирования оценка максимума параметра ε имеет порядок ~ 0.1 . Приведенная выше формула показывает, что величина электрического поля на границе магнитосферы и соответствующий поток электромагнитной энергии из солнечного ветра внутрь магнитосферы максимальны при южном направлении ММП ($\theta = \pi$) и монотонно убывают при повороте ММП к северу ($\theta \rightarrow 0$).

1.2. Разработка и экспериментальная проверка математических моделей и алгоритмов построения тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры спутников по результатам показаний встроенных температурных датчиков

Повышение качества и надежности космической техники является одной из важнейших задач космической отрасли. Мониторинг температурных полей позволяет следить за состоянием бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) и выявлять указывающие на неисправности отклонения. Для контроля тепловых режимов в электронные блоки встраивается некоторое ограниченное количество датчиков, которые обеспечивают измерение температуры в местах установки. Для контроля тепловых режимов всех электрорадиоизделий (ЭРИ) электронного блока необходимо обеспечивать построение температурных полей всего блока. Данная работа посвящена разработке математических моделей, обеспечивающих построение температурных полей плат бортовой радиоэлектронной аппаратуры по результатам показаний встроенных температурных датчиков. В 2021 году была выполнена разработка модели и создана программная реализация алгоритмов. В 2022-2023 годах выполнялась экспериментальная проверка модели.

Описание математической модели и расчетного алгоритма было приведено ранее в промежуточных отчетах. В модели заложен подход по выявлению теплового поля электронных блоков в виде диапазона возможных температур в каждой точке и температур радиоэлементов по показаниям датчиков на основе заданных ограничений на варьируемые параметры системы (диапазоны мощностей радиоэлементов, диапазон температур окружающей среды, потоки на границах и т.п.). Это позволяет выявлять тепловое поле и разброс его возможных значений для случаев, когда количество варьируемых параметров превышает количество датчиков. В целом задача определения теплового поля сводится к последовательному решению набора задач линейного программирования. Предварительно решается серия прямых задач и определяется базовое тепловое поле при характерных заданных параметрах системы и коэффициенты чувствительности температуры в каждой точке по каждому параметру. Текущие показания датчиков порождают набор ограничивающих неравенств. На основе симплекс-метода определяются максимальные и минимальные возможные температуры в каждой точке для текущего показания датчиков.

Разработанная модель запрограммирована и проверена экспериментально. Проверка выполнена на макете радиоэлектронного блока и на экспериментальном образце силового модуля, разрабатываемого для системы питания космического аппарата. Макет электронного

блока представлял собой алюминиевую рамку размером 231 мм × 174 мм толщиной 1.1 мм, на которую наклеена плата с ЭРИ. Часть ЭРИ представляли собой силовые транзисторы (16 шт.), которые могут управляться независимо друг от друга и являются основными источниками выделения тепла. Для контроля температуры на макете было установлено 35 температурных датчиков: на каждом транзисторе и на поверхности платы.

В экспериментах с макетом задавались режимы работы нагревателей подобно режимам работы на реальных блоках. Включались разные группы ЭРИ в разных комбинациях. При достижении стационарного состояния считывались показания датчиков, а по модели определялось температурное поле. Далее построенное температурное поле сравнивалось с реальным распределением, измеренным тепловизором. Целью экспериментов являлось исследование точности построения теплового поля в зависимости от количества используемых датчиков.

В таблице 1.1 показан пример сводных данных по 12 экспериментам для разного количества используемых датчиков. Модель выдает в каждой точке минимальную и максимальную температуры T_{\min} и T_{\max} . В качестве выявленного поля используется среднее значение $T_p = (T_{\min} + T_{\max}) / 2$ и расчетная погрешность этого поля $\pm \Delta T_p = (T_{\max} - T_{\min}) / 2$.

Таблица 1.1 – Сравнение выявленных температур с измеренными значениями в экспериментах

Показатель	Плата				ЭРИ			
	28 датчиков	12 датчиков	4 датчика	4 датчика с ограничениями	28 датчиков	12 датчиков	4 датчика	4 датчика с ограничениями
Максимальное отклонение выявленных температур от измеренных значений $T_p - T_{\text{Э}}$	2.3	3.7	8.9	2.8	0.9	18.4	21.7	3.0
Среднее отклонение выявленных температур от измеренных значений $T_p - T_{\text{Э}}$	0.6	0.8	1.8	0.7	0.05	3.4	4.2	0.8
Максимальная расчетная погрешность выявленных температур $\pm \Delta T_p$	1.8	7.4	16.6	5.2	1.0	22.8	26.8	5.2
Средняя расчетная погрешность выявленных температур $\pm \Delta T_p$	0.9	2.4	7.2	2.5	0.95	8.6	11.2	2.7

При использовании большого количества датчиков (28 шт.) отклонение построенного температурного поля по модели довольно близко к измеренным значениям (не превышало 2.3 °С), поскольку количество варьируемых параметров (18 шт.) меньше количества датчиков. При снижении числа используемых датчиков расчетная неопределенность

температурного поля возрастает. Например, для 4-х датчиков отклонение от измеренных значений в максимуме достигало 8.9 °С на плате и 21.7 °С на ЭРИ. Следует отметить, что в среднем отклонения были относительно невысоки – в пределах 5 °С.

Также был рассмотрен вариант с 4-мя датчиками, но с заданными дополнительными ограничениями (9 шт.) на значения мощностей ЭРИ. Используемые ограничения имитируют связи на значения мощностей тепловыделения элементов, включенных в определенную электронную схему, вида $Q_{VT1} = Q_{VT4}$, $3 \cdot Q_{VT7} = 2 \cdot Q_{VT9}$ и т.п. В этом случае, несмотря на то, что суммарное количество датчиков и ограничений (4 + 9 = 13 шт.) было меньше количества варьируемых параметров (18 шт.), отклонение расчетного теплового поля от измеренных значений было в пределах 3 °С. Сравнение температурных полей поверхности макета блока показано на рисунках 1.5 и 1.6.

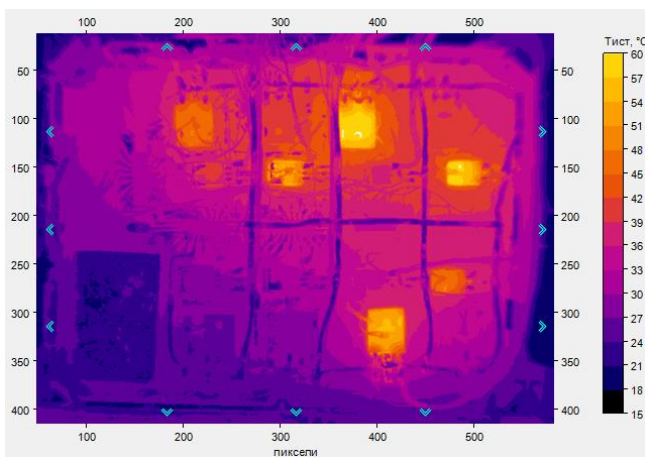


Рисунок 1.5 – Термограмма поверхности блока

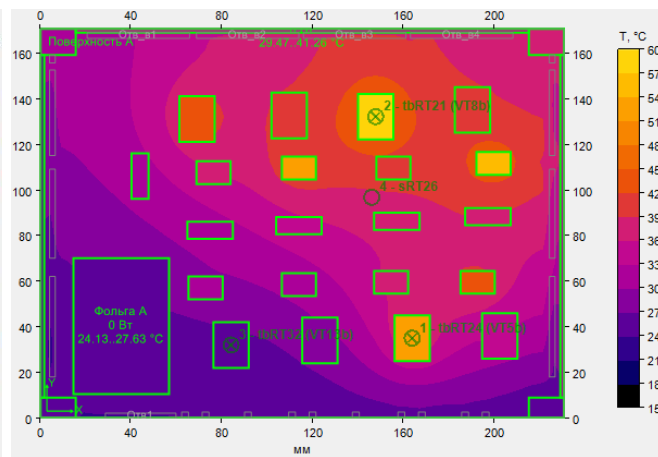


Рисунок 1.6 – Выявленное температурное поле

Аналогичным образом проведена проверка точности восстановления температурного поля по показаниям датчиков на реальном экспериментальном образце силового модуля, разрабатываемого для системы питания космического аппарата. Силовой модуль представляет собой алюминиевую рамку длиной 450 мм и высотой 150 мм. На рамке устанавливается несколько плат с большим количеством ЭРИ разного типа и с различной мощностью тепловыделения. На поверхности плат в составе модуля встроены миниатюрные температурные датчики (43 шт.).

Сначала создана математическая модель передачи тепла по силовому модулю, учитывающая теплофизические характеристики конструкции, термические сопротивления контактов, расположения и параметры элементов, плат и частей конструкции. Далее для

алгоритма восстановления теплового поля был определён перечень параметров модели, значения которых должны варьироваться в ходе определения теплового поля по показаниям датчиков. В общем случае на тепловое поле влияет большое количество переменных, которые включают в себя мощности тепловыделения радиоэлементов, тепловые потоки со стороны кабелей и разъемов, температуру теплоотводящего основания, температуры окружающего воздуха (для лабораторных экспериментов). Однако можно учесть зависимости между переменными, а также объединить многие из них в группы.

В первую очередь были выделены элементы, мощности которых изменяются одинаковым образом при изменении режимов работы модуля. Вводились дополнительные уравнения, учитывающие связь между мощностями таких элементов, или такие элементы объединялись в группу с одним параметром – суммарным значением мощности.

Также выделялись параметры, значения которых не могут быть однозначно определены по отдельности при использовании только показаний датчиков. Например, мощности тепловыделения некоторых элементов влияют на ближайшие датчики таким образом (одинаково), что нельзя корректно распределить суммарное выделяемое тепло этими элементами по каждому из них однозначно. Обычно это происходит, когда элементы стоят близко друг к другу и далеко от датчика. В этом случае вместо множества элементов указывается единая область тепловыделения для этой группы с одной суммарной мощностью, которая будет выступать в качестве такого параметра.

Важно отметить, что процесс объединения (сокращение списка) варьируемых параметров частично автоматизирован и проводился итерационно. Для этого использовался набор термограмм и соответствующих показаний датчиков, которые предварительно были получены при разных режимах работы модуля (в некотором смысле обучающая выборка). После каждого изменения осуществлялась проверка полученного списка варьируемых параметров. Для этого запускался алгоритм восстановления поля по всем имеющимся термограммам, и автоматически контролировалась точность получаемых температурных полей по термограммам. В первую очередь каждое изменение не должно было приводить к резкому увеличению отклонению восстановленных полей от термограмм. Это происходило, когда из перечня варьируемых параметров исключался важный параметр. Во-вторых, определялись «лишние» параметры, значения которых не могут быть «разрешены» между собой и которые требуется объединить.

В результате был определен список из 25 варьируемых параметров, которые использовались в алгоритме восстановления теплового поля. Для итоговой проверки

алгоритма использовалось 10 замеров с термограммами и показаниями датчиков, соответствующие разным режимам и условиям работы модуля. Точность восстановления теплового поля контролировалась по 207 точкам на термограмме в разных местах блока.

В таблице 1.2 приведены сводные результаты отклонений значений восстановленных температур от измеренных температур по всем замерам. Максимальные отклонения лежат в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1.2 – Отклонения восстановленных температурных полей от соответствующих термограмм по всем замерам

Параметр контроля отклонений	Отклонение, $^{\circ}\text{C}$	
	Макс.	Мин.
Отклонения восстановленного поля в местах установки датчиков от показаний датчиков на платах (30 шт.)	-0,98	1,53
Отклонения восстановленного поля от термограммы по областям на платах (207 шт.)	-1,04	2,63
Отклонения восстановленных температур ЭРИ от показаний датчиков на ЭРИ (13 шт.)	-1,08	0,32
Отклонения восстановленных температур ЭРИ от термограммы по областям на ЭРИ (15 шт.)	-2,38	2,72

На рисунке 1.7 приведен пример термограммы поверхности работающего модуля для одного из типичных режимов. На рисунке 1.8 показано восстановленное температурное поле.

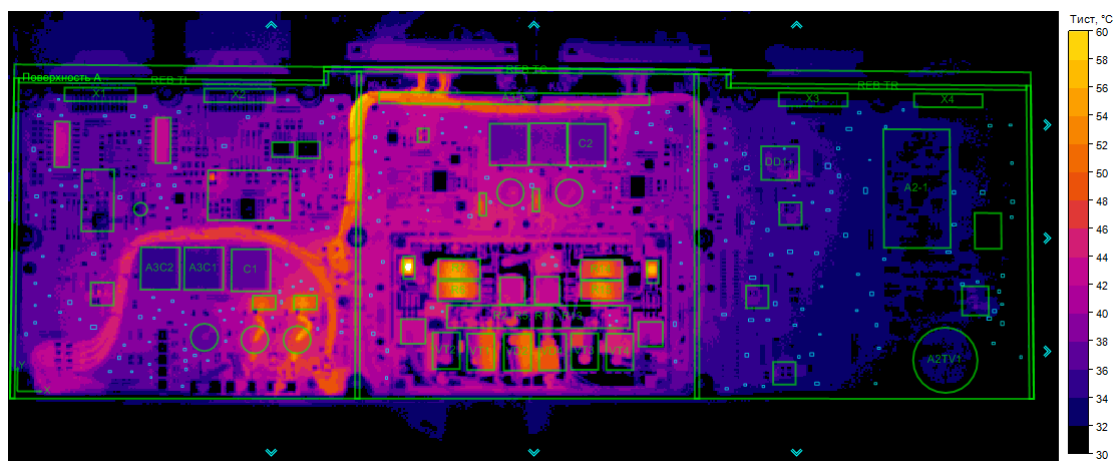


Рисунок 1.7 – Термограмма для проверки точности восстановления поля

Голубыми областями обозначены области, по которым производится сравнение восстановленного значения с температурой на термограмме. Места установки датчиков отмечены кружками. Сравнение восстановленного температурного поля с термограммами показало, что отклонения лежат в пределах ± 3 °С.

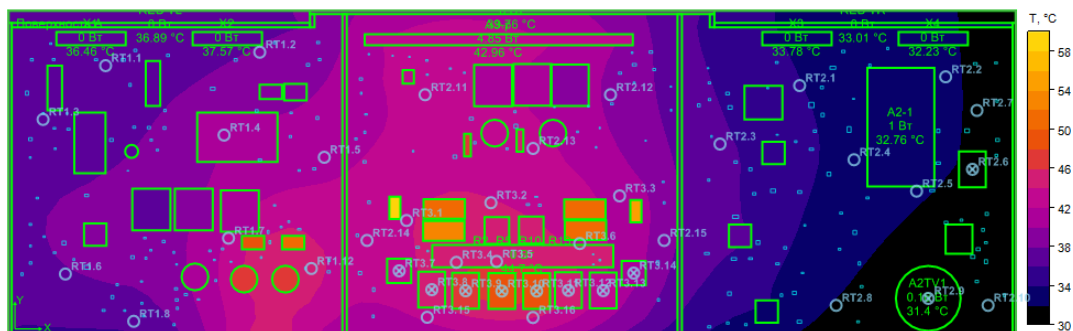


Рисунок 1.8 – Восстановленное температурное поле

1.3. Разработка базового программного обеспечения для формирования кодовых и фазовых псевдодальномерных данных для решения задачи оценивания текущих навигационных параметров для длительного движения спутника по возмущенной орбите с возможностью выбора метода интегрирования уравнений движения и уточнения данных

Орбитальное движение описывается системой уравнений второго порядка

$$\mathbf{x}'' = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}), \quad (1.1)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – позиция спутника на орбите в момент времени t , а $\mathbf{f}(t, \mathbf{x})$ – силы, действующие на спутник (на расчет которых требуются значительные вычислительные затраты). Поэтому количество оценок правой части на шаг интегрирования рассматривается как мера вычислительных затрат численного метода интегрирования систем (1.1). Линейные многошаговые методы (ЛММ), несмотря на конечный интервал устойчивости, являются конкурентноспособными при длительном интегрировании по сравнению с неявными методами Рунге-Кутты, интегратором Эверхарта и коллокационными методами, которые широко применяются при интегрировании орбит на небольшом промежутке времени. Для почти круговых орбит (которыми являются орбиты спутников ГЛОНАСС) особый интерес представляют симметричные линейные многошаговые методы

$$\sum_{j=0}^k \alpha_j \mathbf{x}_{n+j} = h^2 \sum_{j=0}^k \beta_j \mathbf{f}_{n+j}, \quad k \geq 2, \quad \alpha_j = \alpha_{k-j}, \beta_j = \beta_{k-j}, j = 0, \dots, k. \quad (1.2)$$

Здесь на множестве $\{t_n: t_n = t_0 + nh, h > 0, n = 0, 1, \dots\}$ определена \mathbf{x}_n – аппроксимация $\mathbf{x}(t_n)$ точного решения (1.1), $\mathbf{f}_n = \mathbf{f}(t_n, \mathbf{x}_n)$. Методы (1.2), во-первых, дают только линейный рост ошибки по долготе и почти постоянную ошибку в энергии, что значительно повышает точность расчетов по сравнению с методами семейства Адамса; во-вторых, методы обратимы во времени для обратимых во времени задач. Более того, многие симметричные методы, примененные к решению периодических задач при разумных ограничениях на шаг интегрирования имеют периодические решения. В этом случае говорят о методах с ненулевым интервалом периодичности.

В трехлетний отчетный период разработан ряд алгоритмов получения симметричных линейных многошаговых методов (СиммЛММ) и получаемых на их основе схем предиктор-корректор. В частности, разработаны, реализованы и верифицированы 1) алгоритмы получения коэффициентов семейств явных и неявных симметричных методов заданного порядка точности; 2) новые алгоритмы исследования устойчивости (периодичности) ЛММ, 3) технология выбора пар предиктор-корректор из широкого семейства СиммЛММ; 4) система тестов с точными решениями для тестирования и сравнения любых численных методов, используемых для интегрирования уравнения (1.1).

Неявные линейные многошаговые методы более точны и имеют больший интервал устойчивости, поэтому более предпочтительны для приложений. Чтобы разрешить неявность, обычно используется режим предиктора-корректора в форме $P(EC)^m$ или $P(EC)^m E$. Здесь P и C используются для обозначения одного применения предиктора или корректора соответственно, а E – для обозначения одного вычисления $\mathbf{f}(t, \mathbf{x})$; m – количество шагов корректора (т.е. применения пары EC). Поскольку каждой схеме $\hat{P}(E\hat{C})^{m+1}$ может быть сопоставлена схема $P(EC)^m E$ с таким же главным членом локальной ошибки и тем же полиномом устойчивости (но не наоборот), то эффективные схемы предиктор-корректор искали среди $P(EC)^m E$. Действительно, схему с самым длинным интервалом устойчивости, требующую $(m + 1)$ -у оценку правой части за шаг интегрирования, можно найти среди $P(EC)^m E$, а соответствующая схема $\hat{P}(E\hat{C})^{m+1}$ может и не существовать.

Если предиктор и корректор одного порядка, то 1) главный член локальной ошибки схемы $P(EC)^m E$ и корректора совпадают; 2) с помощью механизма Милна [*Milne W.E.*,

Numerical solution of differential equations. – John Wiley and Sons, 1953] можно апостериорно оценивать локальную ошибку, что удобно для практических расчетов. Поскольку в этом случае шаблоны предиктора и корректора не совпадают (рисунок 1.9.а), схема $P(EC)^mE$ не имеет интервала периодичности и теряет часть преимуществ симметричных методов. Был доказан ряд утверждений о корнях полинома устойчивости схем $P(EC)^mE$ и показано, что для некоторых m вообще не существует устойчивых схем [E.D. Karepova, Yu.V. Shan'ko, I.R. Adaev. *Predictor-Corrector Mode for Symmetric Multistep Methods for the Numerical Modelling of Satellite Motion // AIP Conference Proceedings, 2022.* – V. 2522. DOI: 10.1063/5.0100843].

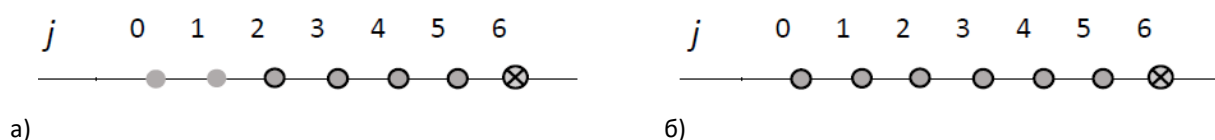


Рисунок 1.9 – Примеры шаблонов схемы $P(EC)^mE$: а) предиктор и корректор 6-го порядка (симметричность нарушается); б) предиктор 6-го порядка и корректор 8-го порядка (симметричность сохраняется). Точки, соответствующие предиктору закрашены серым, корректору – имеют черную границу, помеченная крестиком точка оценивается на текущем в шаге

Чтобы схема $P(EC)^mE$ сохранила преимущества симметричных методов, шаблоны предиктора и корректора должны совпадать друг с другом (рисунок 1.9.б). Доказано, что в этом случае 1) порядок предиктора на две единицы меньше порядка корректора; 2) порядок схемы $PECE$ и корректора совпадают, а главные члены локальной ошибки нет; 3) порядок и главные члены локальной ошибки схемы $P(EC)^mE$ и корректора совпадают $\forall m \geq 2$; 4) если предиктор и корректор имеют ненулевые интервалы периодичности, то схема $P(EC)^mE$ тоже имеет ненулевой интервал периодичности.

Для тестирования и сравнения численных методов было реализовано специальное программное обеспечение (ПО). Во-первых, было показано, что симметричные методы значительно превосходят методы семейства Адамса по точности. Во-вторых показано, что вычислительные затраты режима предиктор-корректор для выбранных пар симметричных методов высокого порядка в 3.5 раза ниже, чем для интегратора Эверхарта того же порядка. Численные эксперименты проведены для задачи возмущенного движения спутника по орбите. Модельная задача построена из ограниченной задачи трех тел (Земля-Луна-спутник Земли пренебрежимо малой массы) таким образом, что имеется дополнительная сила, действующая на спутник, зависящая только от времени и компенсирующая влияние Луны. В

результате модельная задача имеет точное решение, и ошибки численного решения оцениваются непосредственно. Поскольку матрица Якоби такой задачи совпадает с матрицей Якоби ограниченной задачи трех тел, то и свойства устойчивости численных методов для этих задач совпадают и отличаются от свойств традиционной задачи Кеплера для невозмущенной орбиты. Численные эксперименты проведены на реальных данных, а кеплеровы элементы соответствуют положению спутника COSMOS 2413 (ГЛОНАСС) в один из моментов 12 июля 2015 г.

В 2023 году разработано, написано и отлажено базовое программное обеспечение на языке Си/Си++, предназначенное для формирования параметров радионавигационных сигналов. ПО имитирует движение группировки навигационных космических аппаратов (НКА) «ГЛОНАСС» и «ГЛОНАСС-М» и движение приемника на поверхности Земли. Приемник представляется материальной точкой,двигающейся поступательно и криволинейно.

Входными данными программы для моделирования движения орбит НКА являются данные альманаха системы НКА ГЛОНАСС, актуальные на момент начала движения приемника. Входные данные для моделирования движения приемника зависят от сценария движения и задаются в виде ini-файла.

Выходные данные программы 1) описывают сценарий движения приемника в геодезической СК; 2) имитируют движение группировки НКА в рамках реализованной модели возмущенного движения по орбите; 3) в каждый момент времени определяют видимое с точки зрения приемника созвездие НКА; 4) имитируют оперативную информацию от каждого видимого приемником НКА; 3) выдают информацию о совместном движении системы НКА и приемника, которая зависит от сценария движения приемника. Стандартными выходными данными являются рассчитанные на каждую 0.1 секунды расстояние от приемника до каждого видимого приемником НКА и соответствующие доплеровские смещения. Программа может выдавать эфемериды НКА, интерполированные с помощью эрмитовых сплайнов высокого порядка.

Движение НКА моделируется с помощью численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (СОДУ) движения центра масс НКА вокруг Земли в рамках модели, описанной в ИКД ГЛОНАСС [*Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Общее описание системы с кодовым разделением сигналов. – 2016. 133 с.*]. В модели движения учтены ускорения НКА, определяемые геоцентрической константой гравитационного поля Земли,

ускорения, учитывающие полярное сжатие Земли с помощью зонального гармонического коэффициента второй степени, и ускорения от лунно-солнечных гравитационных возмущений. Начальные данные для задачи Коши для СОДУ рассчитываются в инерциальной геоцентрической декартовой системе координат (СК) с помощью данных Альманаха системы НКА «ГЛОНАСС» и «ГЛОНАСС-М».

Для численного интегрирования СОДУ реализована схема предиктор-корректор на основе симметричных линейных многошаговых методов или методов Адамса-Штермера, кроме того, реализован метод Эверхарта. Во всех случаях можно задавать большой диапазон точности методов. Для старта многошаговых методов реализован блочный метод с самозапуском [*Chakravarti P.C., Worland P.B. A class of self-starting methods for the numerical solution of $y'' = f(x, y)$. – BIT, V. 11 (1971), p. 368 - 383*].

Для получения координат НКА на любой момент времени строится система интерполяционных многочленов Эрмита 11-ой степени. Шаг интерполяции может быть определен на этапе компиляции. Многочлены склеены по значениям, скоростям и ускорениям. Количество склеек рассчитывается автоматически на основе длины интервала движения.

Для получения координат приемника при поступательном криволинейном движении на любой момент времени на основе данных входного файла строится кубический сплайн. При расчете расстояния от приемника до НКА учитывается поправка на время добегания сигнала от спутника до приемника.

ПО использует следующие системы координат: 1) инерциальную геоцентрическую декартову СК; 2) неинерциальную геоцентрическую декартову СК; 3) инерциальную геодезическую СК; 4) неинерциальную геодезическую СК; 5) элементы орбиты НКА. В ПО реализованы формулы перевода координат и компонент скоростей из одной СК в другую.

ПО использует три шкалы времени: 1) Юлианские даты (непрерывная временная шкала, каждый момент времени представляется двумя значениями типа double); 2) непрерывная локальная шкала времени (представлена одним значением типа double, начало отсчета – полночь Московского декретного времени для суток начала движения приемника; единица измерения – количество секунд, прошедших от начала отсчета, может принимать отрицательные значения); 3) локальная шкала даты-времени (день.месяц.год час:минута:секунда), связанная с календарной датой. При работе с временем используются функции астрономической библиотеки *sofa* Международного астрономического общества.

1.4. Математические модели диффузии и термодиффузии в смесях для описания экспериментов, проводимых в наземных и космических условиях

1.4.1. Устойчивость разделения бинарных смесей в термодиффузионной колонне

Термодиффузия (или эффект Соре) – это возникновение потока массы смеси под действием градиента температуры. Для описания и предсказания процессов переноса тепла и массы в смесях необходимо знать коэффициенты переноса, в частности диффузии и термодиффузии. Одним из экспериментальных методов измерения коэффициентов термодиффузии является термодиффузионная колонна. Экспериментальные исследования разделения смесей в колоннах, в частности, проводятся в лаборатории Университета Мондрагона (Испания). В данной работе выполнено математическое моделирование процессов разделения, которые изучаются в этой лаборатории, с целью более глубокого понимания и прогнозирования конвективной устойчивости течений в колонне.

В колонне смесь расположена в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. Температура стенок поддерживается постоянной $T_0 \pm \Delta T/2$, внутренний цилиндр нагревается. Вслед за градиентом температуры между стенками возникает градиент концентрации компонентов смеси. Тепловая конвекция приводит к увеличению концентрации одних компонентов смеси вверху колонны, а других – внизу. Измерение разности концентраций между концами колонны позволяет экспериментально определить коэффициенты термодиффузии, однако это возможно только при устойчивом стационарном конвективном течении в колонне. Одним из механизмов развития неустойчивости является аномальный эффект Соре, при котором концентрация более тяжелых компонентов смеси увеличивается вблизи нагретой стенки и, соответственно, вверху колонны, а легких – вблизи холодной стенки и в нижней части.

В ходе исследований выполнено численное трехмерное моделирование разделения смеси этанол – вода с массовой долей этанола 0.2204 для двух цилиндрических колонн высотой $2h = 0.42$ м и зазорами $L = 1.54$ мм (колонна I) и $L = 1.93$ мм (колонна II). Смесь обладает аномальной термодиффузией при концентрации этанола до 30 %. Параметры системы взяты из эксперимента (Bou–Ali M.M. et al. // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. № 1. pp. 1250–1252). Рассмотрены разности температур ΔT между стенками от 4.25 до 16 К. Расчеты выполнены в пакете Ansys Fluent с помощью параллельных вычислений на 6 ядрах.

Согласно эксперименту для колонны II при малых разностях температур между стенками вертикальное разделение смеси нарушается в связи с развитием неустойчивости.

При достижении критической разности температур (для данной смеси это 13.5 К) конвективное течение остается устойчивым, и стационарная разность концентраций этанола между концами колонны не изменяется со временем. Численное моделирование показало, что развитие неустойчивости зависит от параметров колонны. В частности, для колонны I разделение смеси неустойчиво при всех приложенных разностях температур. Напротив, в колонне II разделение смеси всегда устойчиво. Рисунки 1.10 и 1.11 иллюстрируют распределение концентрации этанола в продольном сечении колонн I и II соответственно при $\Delta T = 13.5$ К в разные моменты времени (этанол является легким компонентом.) Как видно из рисунка 1.13, в колонне I с течением времени стационарное распределение концентрации этанола нарушается. Развитие конвективной неустойчивости в колонне можно также проследить с помощью распределения скорости в направлении z , показанном на рисунке 1.12 для случая $\Delta T = 10.8$ К. Видно, что с течением времени структура течения из двух встречных потоков (рисунок 12.а) нарушается вследствие развития конвективной неустойчивости. В колонне II, наоборот, со временем наблюдается установление стационарного распределения концентрации этанола (рисунок 1.11).

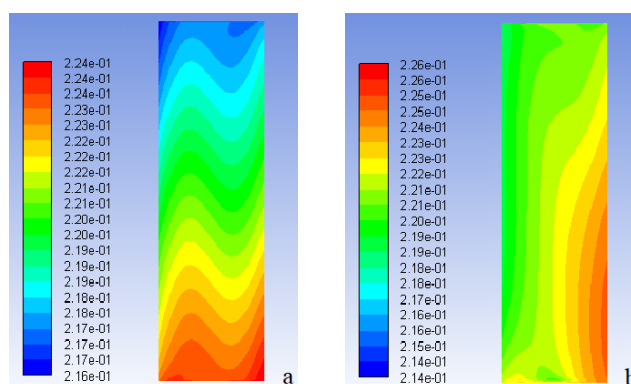


Рисунок 1.10 – Поле концентрации этанола в сечении rz в колонне I для $\Delta T = 13.5$ К: (а) 20 мин, (б) 120 мин. Левая стенка является внутренним цилиндром, колонна сжата в 100 раз

Различия результатов численного моделирования и эксперимента (Phys. Rev. E. 1999. V. 59. № 1. pp. 1250–1252) можно объяснить тем, что даже незначительное отклонение от осевой симметрии в экспериментальной установке из двух коаксиальных цилиндров может нарушить конвективный баланс. С увеличением разности температур между стенками до некоторого порогового значения конвективный поток становится достаточно сильным, чтобы

поддерживать в стационарном состоянии разделение смеси с обратным градиентом плотности (когда тяжелый компонент (вода) – накапливается в верхней части колонны).

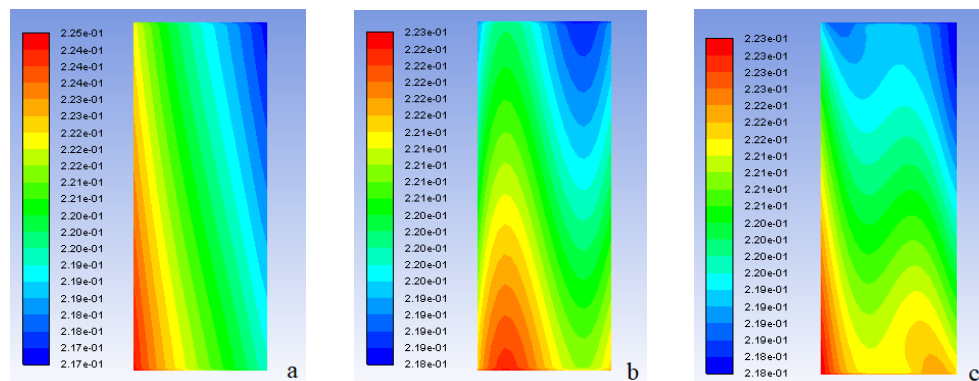


Рисунок 1.11 – Поле концентрации этанола в сечении gz в колонне II для $\Delta T = 13.5$ К: (a) 40 мин, (b) 45 мин, (c) 120 мин.

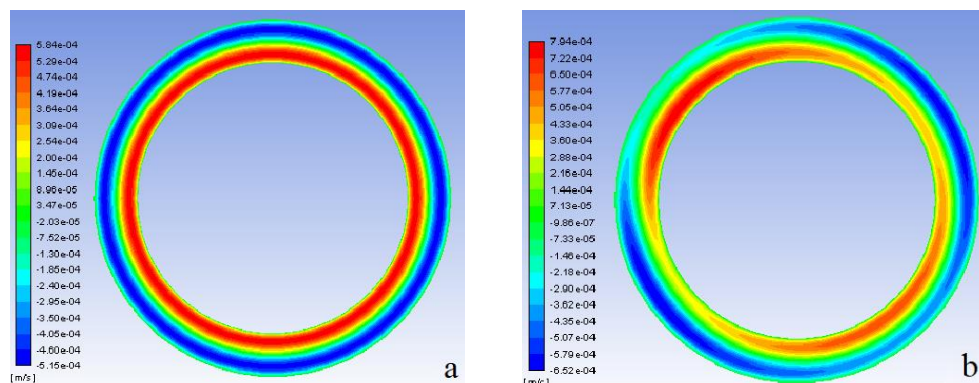


Рисунок 1.12 – Распределение модуля скорости в направлении z в колонне I при $\Delta T = 10.8$ К в сечении $z = 0$: (a) 10 мин, (b) 160 мин.

1.4.2. Обработка данных космического эксперимента DCMIX 4 по исследованию диффузии и термодиффузии в тройных смесях

В 2018 – 2019 годах на Международной космической станции проводился эксперимент DCMIX–4, в котором изучались процессы термодиффузионного разделения тройной смеси толуол – метанол – циклогексан. Особенность этой смеси заключается в существовании зоны фазового расслоения (см. рисунок 1.13) в определенном диапазоне концентраций. При приближении к этой зоне происходит уменьшение коэффициентов диффузии компонентов и соответственное увеличение коэффициента Co_{re} .

Эксперименты проводились следующим образом. Вначале в однородной смеси, находящейся в прямоугольной ячейке, создавалась разность температур между противоположными стенками, которая приводила к возникновению разности концентраций под действием термодиффузии (этап Соре). После установления стационарного состояния разность температур снималась. Далее происходило перемешивание смеси под действием диффузии при постоянной температуре (этап диффузии). Регистрация изменения концентраций компонентов в пространстве и во времени проводится с помощью оптической интерферометрии. Сопоставление этих данных с точным решением уравнений переноса тепла и массы позволяет определить коэффициенты диффузии и термодиффузии.

В отчетном периоде на основе ранее разработанных алгоритмов и программного обеспечения была проведена обработка экспериментальных данных для трех ячеек, соответствующих концентрациям 1, 2, 3 на рисунке 1.13.(а). На рисунке 1.13.(б) показана эволюция наименьшего собственного значения диффузионной матрицы при приближении к зоне расслоения. Красные закрашенные квадраты соответствуют результатам, полученным на МКС, а незакрашенные кружки соответствуют наземным измерениям (J. Chem. Eng. Data 54, 405 (2009)).

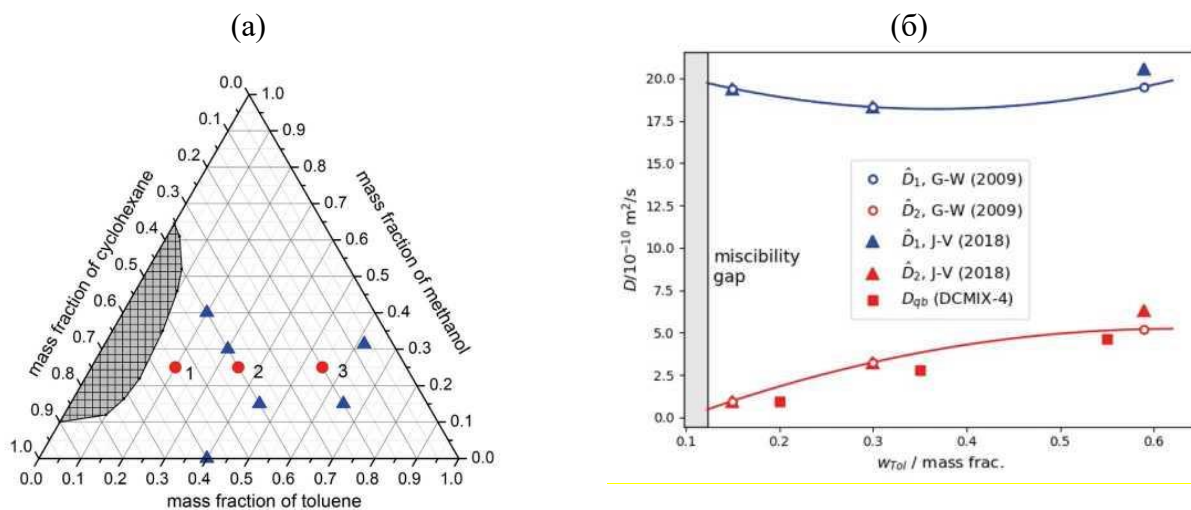


Рисунок 1.13 – Карта концентраций для смеси толуол / метанол / циклогексан (а). Образцы из ячеек DCMIX–4 указаны цифрами 1, 2, 3. Серым цветом показана область фазового расслоения. Зависимость наименьшего собственного значения диффузионной матрицы от концентрации толуола (красные квадраты) в сравнении с данными литературы

Результаты обоих экспериментов находятся в хорошем согласии для наименьшего собственного значения. Приведены также результаты, полученные с помощью молекулярно-динамического моделирования (Ind. Eng. Chem. Res. 57, 16508 (2018)). Для наименьшего собственного значения они подчеркивают хорошее качество результатов микрогравитации, а для наибольшего собственного значения они соответствуют наземным измерениям. Из этих результатов можно сделать два вывода: во-первых, наименьшее собственное значение уменьшается в направлении зоны смещения; во-вторых, два собственных значения очень различны: для смеси, бедной толуолом – они отличаются более чем в десять раз.

2. Математическое моделирование физических процессов и устройств

2.1. Разработка теплофизической модели блока охлаждения для подводных и надводных судов и разработка стенда для исследования энергетических характеристик его конструктивных узлов. Экспериментальная проверка характеристик отдельных узлов и проведение испытаний экспериментального образца автономного блока

При создании систем охлаждения холодильных камер подводных судов одним из требований является бесшумный режим работы, которому удовлетворяют термоэлектрические холодильники. Исследования посвящены разработке блока охлаждения с тепловыми затворами, которые препятствуют проникновению тепла внутрь холодильных камер при отключении термоэлектрических модулей или их выхода из строя.

В 2021 году разработана математическая модель, описывающая процесс теплопередачи в элементах блока охлаждения. Модель позволяет рассчитывать рабочие характеристики отдельных узлов и всего блока охлаждения. Расчет характеристик воздушного и жидкостного радиаторов проводится на основе решения уравнения теплопроводности, из которого определяется распределение температуры по высоте ребер с учетом размеров и материала ребер, значения локального коэффициента теплообмена для заданной скорости воздуха или жидкости. Модель позволяет определить холодильный коэффициент и холодопроизводительность блока охлаждения при различных условиях работы и вариантах компоновки.

В 2022-2023 годах разработана теплофизическая модель блока охлаждения, выполнена разработка стенда для исследования энергетических характеристик его конструктивных узлов, проведена экспериментальная проверка характеристик отдельных узлов и испытан экспериментальный образец автономного блока.

2.1.1. Разработка теплофизической модели блока охлаждения для подводных и надводных судов

Основной задачей блока охлаждения (БО) является обеспечение требуемого температурного перепада ΔT_0 при заданной холодопроизводительности Q . Эта задача определяет конструктивные решения для устройства подвода теплоты (УПТ) и устройства отвода теплоты (УОТ), а также выбор термоэлектрического модуля (ТЭМ). Наряду с этим важной задачей при разработке БО является достижение максимальной энергетической эффективности процесса охлаждения. В реальном БО, имеющем тепловые потери в УПТ и УОТ, эффективность работы описывается холодильным коэффициентом, который

определяется как $\varepsilon = Q/W$. При этом потребляемая электрическая мощность W обеспечивает компенсацию тепловых потерь при заданных значениях холодопроизводительности Q и разницы температур ΔT_0 между объемом холодильной камеры и охлаждающей водой.

Расчет энергетических характеристик БО проводился для стационарного процесса с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад с перепадами температур в отдельных узлах БО:

$$\Delta T_0 = R_T Q - \Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q) + R_S(Q + U(I, Q)I),$$

где U , I — напряжение и сила тока электропитания ТЭМ, R_T , R_S — термические сопротивления УПТ и УОТ. Первое слагаемое в правой части этой формулы описывает температурный перепад в УПТ, второе определяет разность температур между горячей и холодной сторонами ТЭМ, третье — перепад температуры в УОТ. Рабочие характеристики термоэлектрического модуля $Q(\Delta T_{\text{ТЭМ}})$ и $U(\Delta T_{\text{ТЭМ}})$ являются исходными данными для определения зависимостей $U(I, Q)$ и $\Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q)$ с помощью интерполяционных многочленов. Численное решение нелинейной алгебраической системы уравнений для заданных значений R_S , R_T , ΔT_0 и I позволяет рассчитать энергетические характеристики Q , W и ε .

Расчет и анализ проведен на примере серийного ТЭМ «S-199-14-11», который имеет максимальные значения холодопроизводительности $Q = 124.2$ Вт и перепад температуры $\Delta T_{\text{ТЭМ}} = 72.5$ К при силе тока $I_{\text{max}} = 7.9$ А и напряжении $U_{\text{max}} = 25.3$ В. Энергетические характеристики для значений $R_T = 0.3$ К/Вт, $R_S = 0.3$ К/Вт приведены на рисунках 2.1 и 2.2; на кривых указаны соответствующие им значения ΔT_0 в градусах Цельсия. Зависимости холодопроизводительности $Q(I)$ имеют максимумы, значения которых снижаются с ростом абсолютной величины температурного перепада ΔT_0 . Значениям ниже максимума соответствуют по два значения силы тока (как для уровня $Q = 20$ Вт, обозначенного штриховой горизонтальной линией). Более эффективный режим работы БО обеспечивается при меньшем значении силы тока.

Графики холодильного коэффициента на рисунке 2.2 также имеют максимумы, зависящие от температурного перепада ΔT_0 , значения которого указаны в градусах Цельсия на соответствующих кривых. В отличие от зависимостей $Q(I)$ на рисунке 2.1, значения силы тока, соответствующие максимумам графиков $\varepsilon(I)$, имеют существенную зависимость от ΔT_0 .

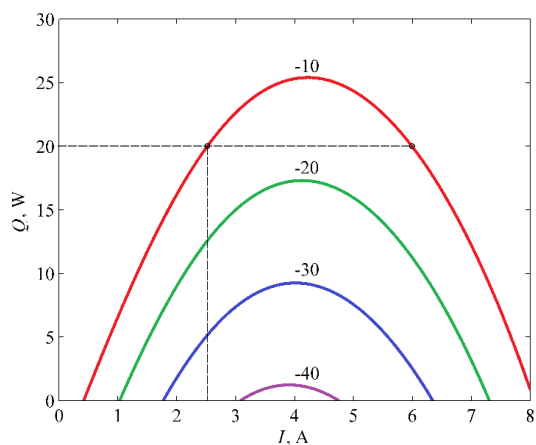


Рисунок 2.1 – Зависимости холодопроизводительности от силы тока при различных значениях температурного перепада ΔT_0

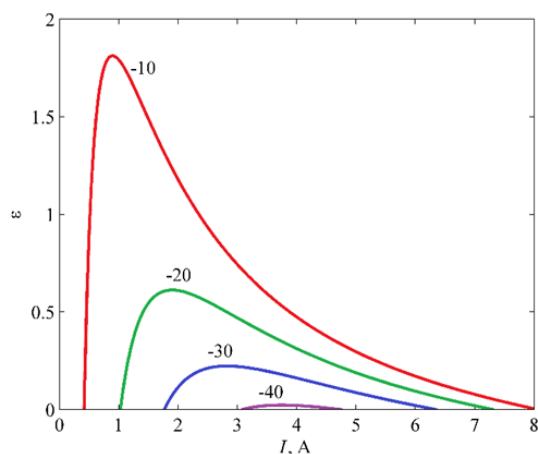


Рисунок 2.2 – Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при различных значениях температурного перепада ΔT_0

Максимальные значения характеристик $Q(I)$ и $\varepsilon(I)$ характеризуют потенциал применяемого ТЭМ при заданных R_T и R_S , поскольку позволяют определить достижимый предел энергетической эффективности БО. Общую картину холодопроизводительности дает приведенная на рисунке 2.3 номограмма $Q(R_S, R_T)$, которая по значениям термических сопротивлений УПТ и УОТ, измеренных в ходе экспериментальных исследований, позволяет определить значение холодопроизводительности, производимой одним ТЭМ.

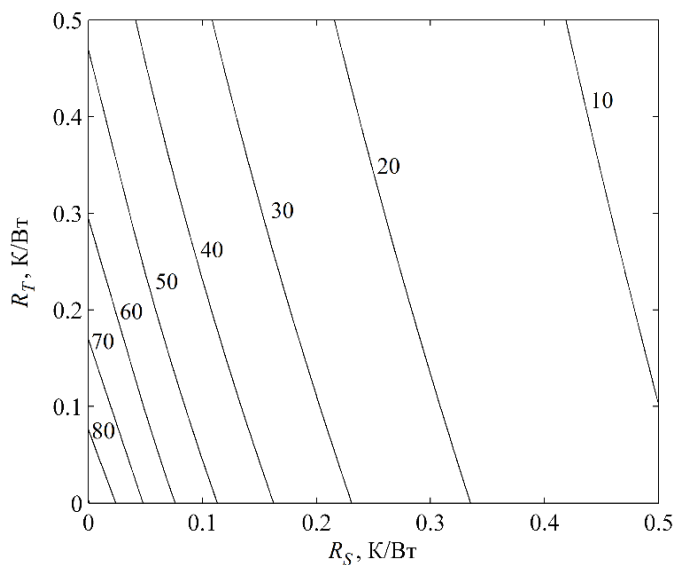


Рисунок 2.3 – Изолинии максимальной холодопроизводительности (значения Q на кривых указаны в Вт) от термического сопротивлений R_S и R_T при $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$

2.1.2. Разработка стенда для исследования энергетических характеристик конструктивных узлов блока охлаждения

Для исследования характеристик двухфазных термосифонов и воздушного теплообменника БО разработан и изготовлен экспериментальный стенд, схема которого приведена на рисунке 2.4. Стенд состоит из корпуса бытовой морозильной камеры 1 объемом 230 литров, воздушного теплообменника 2, емкости с водой 3, вентилятора типа «улитка» 4, радиатора системы охлаждения 5. Для интенсификации испарения в емкость с водой помещены ультразвуковой генератор и нагреватель, которые подключены к источнику питания 6. Температурный режим обеспечивается за счет циркуляции теплоносителя, поступающего из циркуляционных термостатов LOIP LT-300 7 и 8. Система измерения температуры включала в себя 9 термопар, размещенных в емкости с водой, на пластинах теплообменника, на входе и выходе из макета, в объеме камеры. Регистрация значений температуры производилась автоматизированным вычислительным комплексом на базе модульной измерительной системы L-Card E-270 9 и компьютера 10. Общий вид расположения элементов экспериментального стенда в корпусе морозильной камеры представлен на рисунке 2.5. В ходе экспериментальных исследований определялась теплопередающая способность двухфазных термосифонов и энергетические характеристики воздушного теплообменника.

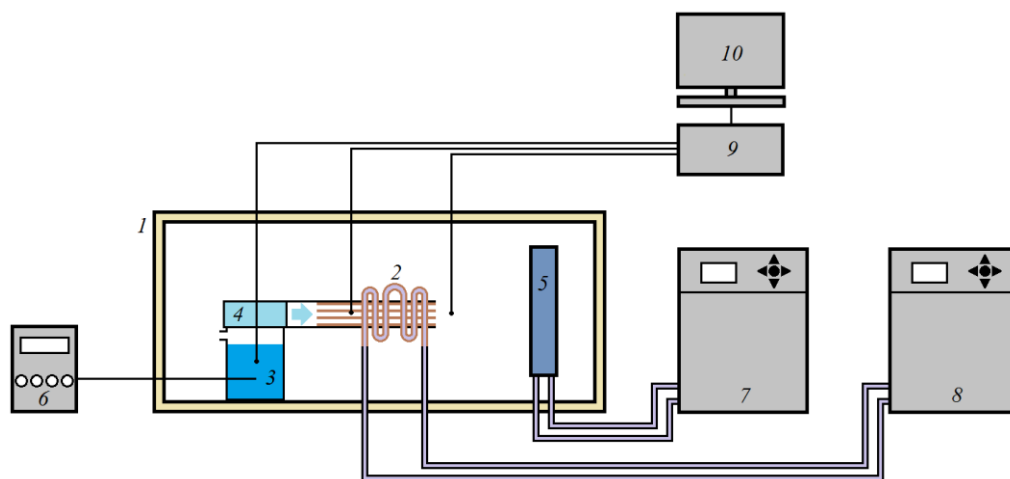


Рисунок 2.4 – Схема экспериментального стенда. 1 – корпус, 2 – теплообменник, 3 – емкость с водой, 4 – вентилятор, 5 – радиатор, 6 – источник питания, 7 – термостат теплообменника, 8 – термостат радиатора, 9 – модуль измерительной системы, 10 – компьютер



Рисунок 2.5 – Внутренний объем экспериментального стенда

2.1.3. Экспериментальная проверка характеристик отдельных узлов и проведение испытаний экспериментального образца автономного блока

Оригинальная конструкция БО содержит в себе 8 ТЭМ. В ней применены технические решения, направленные на повышение эффективности охлаждения. В частности, использование термосифонов обеспечивает снижение величины термического сопротивления при теплопередаче от ребер воздушного радиатора к холодному спаю термоэлектрических модулей и препятствуют возникновению обратного потока теплоты при выключении электропитания блока, которое периодически производится для оттаивания инея и удаления воды. К каждому ТЭМ присоединены по три термосифона. Экспериментальный образец (рисунок 2.6) является отдельной секцией БО и предназначен для работы с одним ТЭМ.



Рисунок 2.6 – Экспериментальный образец автономного блока

При проведении экспериментов измерения температуры проводились термопарами, схема их расположения приведена на рисунке 2.7. В зоне испарения и подвода теплоты

расположены три термопары с номерами 5, 6 и 7, которые располагаются на поверхности термосифона между нитями нагревателя. Термопара 4 прикреплена к поверхности термосифона вблизи конденсатора. Термопары 1, 2 и 3 измеряют температуру в зоне конденсации и отвода теплоты, находясь в углублениях дополнительной латунной пластины вровень с поверхностью, контактирующей с конденсатором для учета влияния термических сопротивлений в слое конденсата внутри термосифона и стенки трубки, а также дополнительного термического сопротивления конденсатора и слоя термопасты. Таким образом, применительно к БО можно определить полное термическое сопротивление секции термосифонов, которая обеспечивает теплопередачу от ребер воздушного радиатора на поверхность холодной стороны ТЭМ.

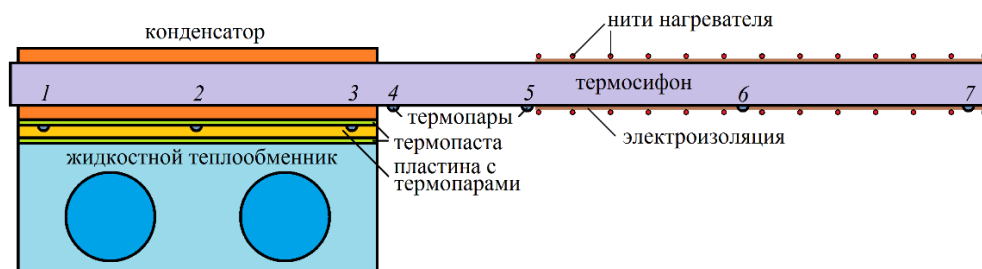


Рисунок 2.7 – Схема расположения термопар для измерения температуры

Фиксация измерений проводилась после выхода температур на установившийся режим. Характерное распределение значений температуры по длине термосифона приведено на рисунке 2.8, полученных при угле наклона $\alpha = 15^\circ$ и температуре теплоносителя в контуре жидкостного теплообменника $T_0 = -15^\circ\text{C}$. На кривых указаны соответствующие значения тепловой мощности.

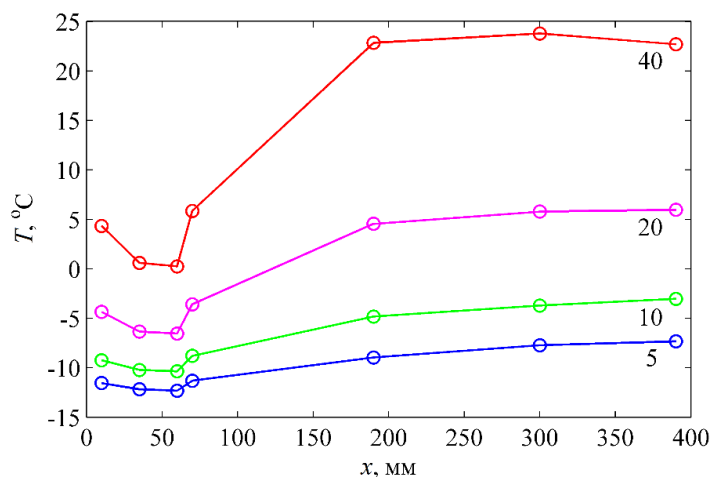


Рисунок 2.8 – Распределение температуры по длине термосифона

Значения термического сопротивления термосифона рассчитывались по формуле:

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q},$$

где T_e и T_c – средние значения температуры в зонах испарения и конденсации, в которых производится подвод и отвод теплоты. Полученные значения термических сопротивлений термосифона приведены в таблице 2.1 для всего диапазона тепловой мощности, температур теплоносителя в контуре жидкостного теплообменника и углов отклонения термосифона от вертикали.

Таблица 2.1 – Экспериментальные значения термического сопротивления термосифона в зависимости от передаваемой тепловой мощности Q , температуры теплоносителя T_0 и угла наклона α

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha, ^\circ$	$R (Q = 5 \text{ Вт})$	$R (Q = 10 \text{ Вт})$	$R (Q = 20 \text{ Вт})$	$R (Q = 40 \text{ Вт})$
5	0	0,69	0,56	0,53	0,56
	15	0,63	0,53	0,51	0,53
	30	0,66	0,54	0,51	0,53
	45	0,75	0,56	0,52	0,51
-5	0	0,73	0,59	0,55	0,57
	15	0,82	0,61	0,53	0,53
	30	0,72	0,59	0,52	0,53
	45	0,72	0,57	0,50	0,51
-15	0	0,72	0,61	0,55	0,56
	15	0,75	0,6	0,54	0,54
	30	0,75	0,62	0,55	0,53
	45	0,74	0,59	0,54	0,52
-25	0	0,78	0,62	0,57	0,57
	15	0,79	0,63	0,57	0,54
	30	0,80	0,64	0,56	0,53
	45	0,81	0,62	0,57	0,52

В исследовании отчетливо проявилась зависимость термического сопротивления от тепловой мощности. На рисунке 2.9 приведены зависимости $R(Q)$ для различных значений температуры теплоносителя в жидкостном теплообменнике при угле наклона $\alpha = 0$. При росте тепловой мощности до 20 Вт термическое сопротивление R снижается, при дальнейшем росте происходит его стабилизация, а при значениях $T_0 = 5$ и -5°C наблюдается увеличение термического сопротивления. Сравнительный анализ данных, приведенных в таблице 1, в целом свидетельствует об определенных тенденциях снижения термического сопротивления при увеличении температуры теплоносителя и угла наклона термосифона.

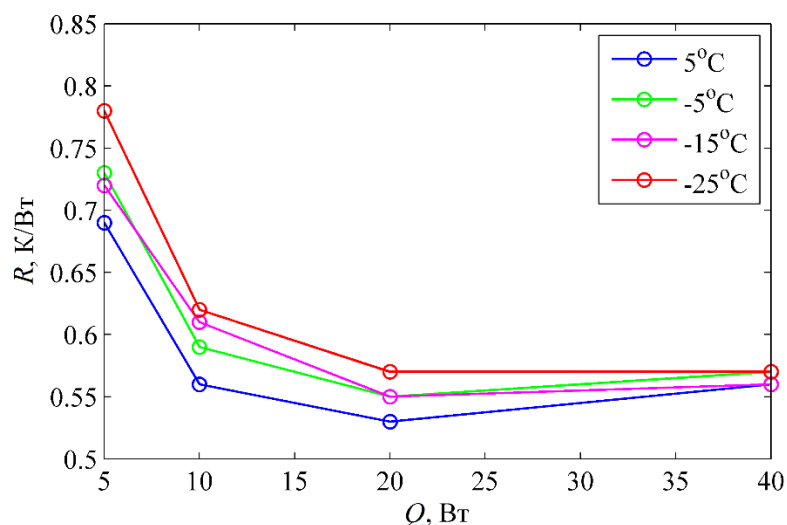


Рисунок 2.9 – Зависимость термического сопротивления термосифона от тепловой мощности для различных значений температуры теплоносителя

2.2. Прямой метод загрузки тёмной бихроматической оптической ловушки из равновесной смеси газов при комнатной температуре. Зависимость времени жизни светоиндуцированных ионных кулоновских цепочек от количества ионов и параметров оптической решётки

Построена математическая модель слабо-диссипативной бихроматической тёмной оптической ловушки (БТОЛ), погруженной в равновесный газ с примесью резонансных атомов. Модель основана на квазиклассической теории оптических сил в поле суперпозиции косинус-Гауссовских бихроматических световых пучков, из которой получено кинетическое уравнение Фоккера-Планка для вигнеровской функции распределения атомов со столкновительным членом и граничными условиями. Это уравнение учитывает следующие физические процессы: отражение достаточно холодных частиц от односторонних светоиндуцированных потенциальных барьеров на торцах ловушки; уменьшение энергии частицы при прохождении узкого охлаждающего слоя, в котором на неё действует светоиндуцированная сила трения; столкновительные потери частиц из ловушки. Слабо-диссипативная природа БТОЛ (связанная с узостью охлаждающего слоя – cooling layer (CL)) выражается в наличии малого параметра в задаче – относительного изменения энергии частицы при её однократном прохождении слоя CL. Показано, что главный член асимптотического разложения вигнеровской функции распределения по этому параметру подчинён редуцированному уравнению Фоккера-Планка в энергетическом пространстве. На

основе анализа решения этого уравнения дано описание динамики накопления резонансных атомов в ловушке, кинетики их пленения и глубокого охлаждения. В результате предсказан ряд нетривиальных свойств БТОЛ. Показано, что *ловушка обладает гигантской аккумуляционной способностью: коэффициент эффективности η аккумуляции может достигать значений $\gtrsim 103$* . Он определяется как отношение количества частиц, пленённых рассматриваемой БТОЛ, к аналогичной величине для традиционно используемых консервативных тёмных оптических ловушек (при одинаковых глубинах этих ловушек). В закрытой системе (когда отсутствуют потери резонансных атомов на стенках резервуара R) высокая аккумуляционная способность БТОЛ проявляется в возможности пленить в ней практически все примесные атомы (в одном из конкретных рассчитанных случаев 97%), т.е. БТОЛ можно использовать как эффективное устройство для разделения газов (отделения резонансных частиц от нерезонансных). С практической точки зрения важно, что достижение этих эффектов не требует охлаждения резервуара до очень низких температур (как в традиционных подходах), а возможно при комнатных температурах (расчёты проводились при температуре буферного газа $T_0 = 300$ К). При этом пленённые в БТОЛ частицы имеют температуры на четыре порядка величины меньше: $T=0.05$ К. Эффект такого глубокого охлаждения достигается (несмотря на слабо-диссипативную природу БТОЛ) благодаря многократным повторениям процессов отражения пленённых частиц от светоиндуцированных барьеров и последующего прохождения через охлаждающий слой CL.

Ещё один важный результат исследований по теме лазерного пленения и охлаждения частиц связан с суперкомпьютерным моделированием стохастической динамики ионов (линейной цепочки ионов с сильным кулоновским взаимодействием), удерживаемой полихроматической оптической сверхшёткой. Расчёты проводились на суперкомпьютере MVS-10P в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН (г. Москва) с целью выявления зависимости от параметров сверхшётки и количества ионов в цепочке степени устойчивости такой кулоновской системы по отношению к квантовым флуктуациям оптических сил. Было обнаружено (вопреки интуитивным прогнозам), что темп уменьшения времени разрушения, рассматриваемый линейной цепочкой холодных ионов из-за действия квантовых флуктуаций, существенно замедляется с увеличением количества ионов.

2.3. Модели упорядоченных ансамблей холодных атомных частиц, формируемых и удерживаемых полем коллинеарной суперпозиции косинус-Гауссовских бихроматических лазерных пучков

Одним из эффективных методов лазерного манипулирования атомными частицами (атомами, ионами, наночастицами) является использование оптических решёток, которые представляют собой пространственно-периодические массивы светоиндуцированных потенциальных ям для частиц. Интерес к таким светоиндуцированным решёткам обусловлен возможностями важных применений (в частности, в спектроскопии высокого разрешения, квантовой информатике, исследованиях холодных столкновений и сильно коррелированных многочастичных систем, получения сильно неравновесных состояний газа). Эти применения основаны на уникальной способности оптических решёток формировать упорядоченные локализованные (изолированные от стенок) ансамбли холодных атомов. В рамках проекта разработаны модели долгоживущих периодических структур в виде системы, сильно локализованных трёхмерных сгустков резонансных частиц в смеси газов, которые формируются в поле коаксиальной суперпозиции бихроматических косинус-Гауссовских оптических пучков (КГОП) с модулированным пространственным профилем комплексной амплитуды. Разработанные модели учитывают это обстоятельство и эффект возникновения так называемых выпрямленных градиентных сил (ВГС) в суперпозиции бихроматических КГОП с надлежащим выбором управляющих параметров (т.е. в поле специально комбинированного КГОП, обязательно включающем в себя интерферирующие компоненты и частотные компоненты с большими отстройками от резонанса). Показано, что результатом механического действия подобного комбинированного КГОП на резонансные частицы оказывается формирование бихроматической оптической сверхрешётки (БОСР) с периодом, существенно превышающем длину световой волны и сверхглубокими (в сравнении с обычными монохроматическими оптическими решётками) потенциальными ямами. БОСР способна обеспечивать устойчивое (долговременное) трёхмерное удержание частиц и их периодическое перераспределение по ячейкам сверхрешётки. Кроме того, благодаря бездифракционным свойствам КГОП, её длина (и объём) может на порядки превосходить размеры практически реализованных оптических решёток (сверхрешёток), в которых используется неколлинеарная конфигурация световых пучков.

В достаточно сильных полях можно сформировать БОСР с подобными свойствами, используя суперпозицию однонаправленных (!) бихроматических КГОП. Такая конфигурация оптических пучков является контринтуитивной (из-за присутствия значительной силы рассеяния, действующая вдоль направления распространения света) и оказывается допустимой для создания БОСР благодаря эффекту Тальбота, который в рассматриваемом случае комбинированного КГОП проявляется в неизбежной периодической

модуляции продольного пространственного распределения его интенсивности (т.е. вдоль направления распространения пучков) вследствие периодической модуляции поперечного распределения интенсивности суперпозиции интерферирующих КГОП. Рисунок 2.10 иллюстрирует один из полученных результатов образования трехмерной БОСР-Тальбота.

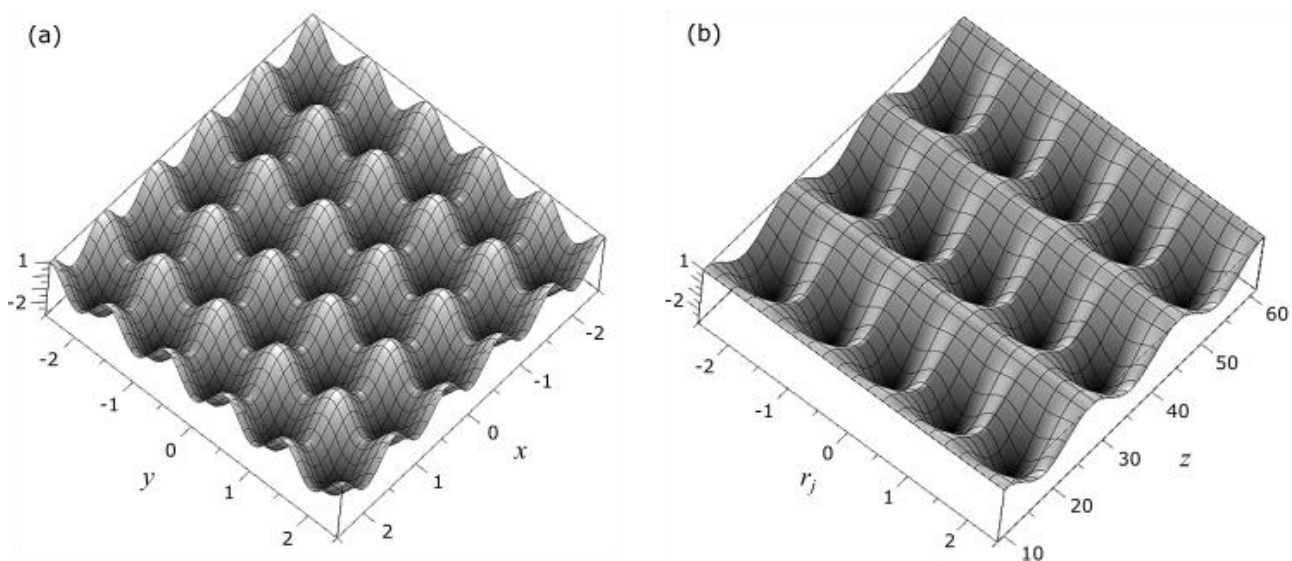


Рисунок 2.10 – Оптическая бихроматическая трехмерная сверхрешетка Тальбота, индуцированная однонаправленными косинус-Гауссовскими оптическими пучками (потенциал выпрямленных градиентной силы в окрестности оси световых пучков). (a) Безразмерный потенциал ВГС в плоскости перпендикулярной световым пучкам. (b) Потенциал ВГС в любой плоскости, проходящей через ось оптических пучков (ось Z). Пространственные координаты даны в единицах поперечного периода сверхрешетки

Этот результат для разных конфигураций комбинированных КГОП (вытекающие из модели, основанной на оптических уравнениях Блоха) предсказывают возможность их применения для долговременного лазерного трехмерного пленения атомов индуцированными периодическими сверхрешётками в условиях глубокого вакуума (причем без наложения дополнительного магнитного поля как в классических магнитооптических ловушках). Для исследования возможностей применения комбинированных КГОП для манипулирования резонансными двухуровневыми частицами, погруженными в холодный буферный газ, использовалась модель в виде квазиклассических кинетических уравнений для матрицы плотности в представлении Вигнера $\hat{\rho}(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$, определённой в фазовом пространстве координат и скоростей частиц (\mathbf{r}, \mathbf{v}) . Помимо столкновений эти уравнения учитывают квантовые флуктуации оптических сил и штарковский (световой) сдвиг энергетических

уровней. Их специфика (связанная с особенностями рассматриваемых комбинированных КГОП) заключается в том, что они являются мультипликативными стохастическими уравнениями и описывают процессы, характеризующиеся сильно различающимися (на порядки величин) временными масштабами. Это обстоятельство позволило провести их последовательную редукцию к диффузионно-дрейфовым уравнениям для плотности потока частиц, которые справедливы при условии малости эффективного числа Кнудсена, определяемого светоиндуцированным коэффициентом трения, частотой столкновений и радиусом световых пучков. При выводе этих уравнений также предполагалась Рэлеевская смесь газов (тяжёлые резонансные частицы в лёгком буферном газе), что позволяет представить интегралы столкновений в дифференциальной форме Фоккера-Планка.

Проблема формирования БОСР с помощью КГОП в столкновительном газе с частотой столкновений частиц с атомами буферного газа, превышающей светоиндуцированный коэффициент трения, существенно осложнена сильным эффектом так называемого светоиндуцированного дрейфа (СИД). Этот эффект имеет физическую природу, совершенно отличную от светового давления, и обусловлен различием транспортных сечений рассеяния возбуждённых и невозбуждённых частиц и скоростной селективностью их возбуждения. При этом оказалось, что в рассматриваемой ситуации в отношении СИД справедлив аналог оптической теоремы Ирншоу (следствие вихревого характера пространственной структуры эффективной силы, вызывающей СИД), доказывающей невозможность формирования устойчивых оптических решёток при доминировании эффекта СИД. Однако на основе построенной модели (которая учитывает силы светового давления и эффект СИД) показано, что посредством подходящей настройки параметров комбинированного КГОП можно реализовать гибридный механизм формирования сверхрешёток для устойчивой локализации частиц, основанный на совместном проявлении радиационных сил и СИД. В гибридной схеме пленения частиц выпрямленные градиентные силы нейтрализуют деструктивное действие продольной компоненты эффективной силы (приводящей к СИД), которая стремится вытолкнуть частицы на торцевые стенки камеры с газом, препятствуя их локализации и изоляции.

Помимо преодоления ограничений теоремы Ирншоу выпрямленные оптические силы в этой схеме формируют глубокую периодическую сверхрешётку вдоль оси световых пучков, осуществляющую острую пространственную группировку частиц вблизи центров её ячеек. В свою очередь, приток частиц в сверхрешётку из окружающей пучок газовой смеси (т.е. её селективная «загрузка») и их поперечное удержание обеспечивается эффектом СИД. При

этом может достигаться гигантский аккумуляционный эффект: количество пленённых частиц (в случае достаточно большого резервуара с газом) экспоненциально велико по относительной глубине светоиндуцированной поперечной потенциальной ямы: при $U_t \geq 10$

$$\mathcal{A}(U_t) \approx (8/U_t) \exp(U_t/4),$$

где \mathcal{A} – коэффициент аккумуляции: отношение количества пленённых частиц к количеству частиц в облучаемой световым пучком области в невозмущенной газовой смеси и глубина потенциальной ямы выражена в единицах температуры буферного газа. Величина коэффициента аккумуляции в конкретных вычислениях достигала значений 10^3 , тогда как увеличение концентрации пленённых частиц достигало значений 10^5 благодаря острой группировке частиц в узкие слои с размерами существенно меньше периода сверхрешётки и радиуса световых пучков. Полученные результаты иллюстрирует рисунок 2.11.

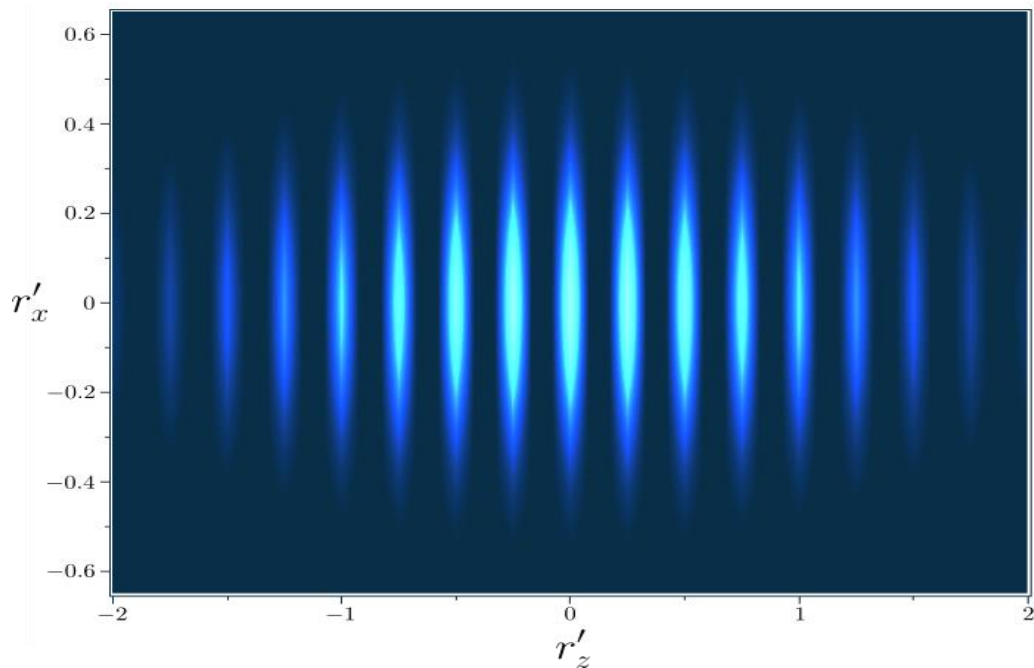


Рисунок 2.11 – Перераспределение плотности резонансных частиц в буферном газе, индуцированное комбинированным косинус-Гауссовским бихроматическим световым пучком при реализации гибридной схемы их 3D пленения (аккумуляция, локализация и резкая стратификация): типичный график плотности в любой плоскости, проходящей через ось пучков (ось Z). Яркие светлые участки соответствуют высокой, а тёмные – низкой плотности. Координаты даны в единицах эффективного радиуса световых пучков

При уменьшении давления газа проявляются диссипативные свойства радиационных сил, когда коэффициент светоиндуцированного трения значительно превышает частоту столкновений резонансных частиц с атомами буферного газа. Тогда в результате эффекта охлаждения пленённых частиц диссипативными компонентами выпрямленных оптических сил их температура всегда меньше температуры буферного газа. В этом случае может быть реализован другой гибридный механизм формирования оптических сверхрешёток в поле комбинированного бихроматического косинус-Гауссовского светового пучка, в котором селективная загрузка сверхрешётки частицами и их поперечное удержание осуществляется благодаря действию термофоретической силы, пропорциональной градиенту температуры резонансных частиц. В свою очередь, продольные выпрямленные градиентные силы осуществляют сильную периодическую стратификацию плотности частиц. Показано также, что в случае линейно поляризованных световых пучков опто-термофоретическая сверхрешётка переводит резонансную примесь в неравновесное состояние со стационарными замкнутыми токами частиц – так называемыми броуновскими вихрями. Этот эффект обусловлен анизотропией в спонтанном испускании фотонов возбуждёнными атомами и, следовательно, анизотропией квантовых флуктуаций оптических сил, т.е. по-существу с макроскопическими проявлениями квантовых эффектов.

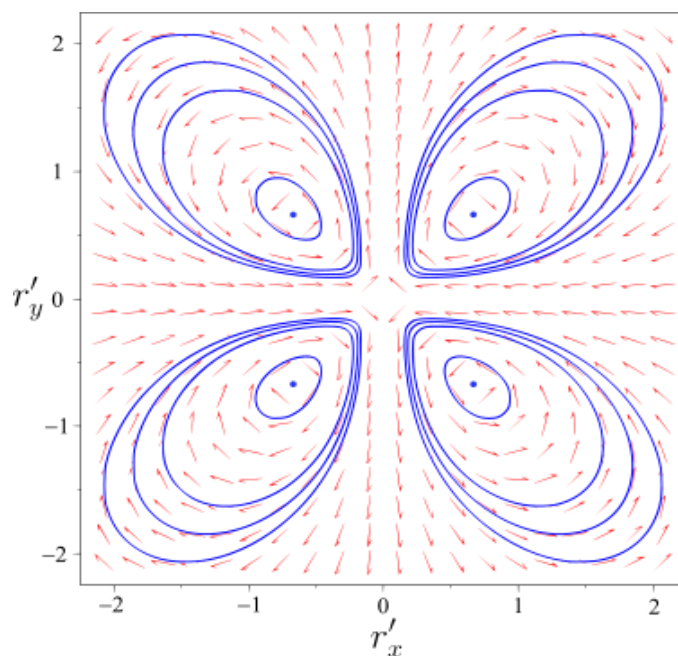


Рисунок 2.12 – Броуновские вихри резонансных частиц: линии тока в плоскости перпендикулярной оси опто-термофоретической ловушки

Ранее броуновские вихри наблюдались в экспериментах по манипулированию коллоидными микрочастицами с помощью оптических пинцетов, но их возникновение не было обусловлено какими-либо квантовыми эффектами. Полученные результаты помимо традиционных для оптических решёток применений могут быть использованы для селективного извлечения сверхмалых примесей из газовых смесей и их долговременного удержания, а также для разработки новых лазерных методов разделения газов и изотопов (для лабораторных целей) с высоким коэффициентом разделения $\gg 1$.

2.4. Условия максимального усиления локального поля за счет настройки поверхностного решеточного резонанса путем варьирования геометрических параметров структуры

Периодические структуры из резонансных частиц привлекают внимание исследователей в связи с проявлением в них нетривиальных оптических свойств и возможностью широкого применения в задачах усиления локального поля, сенсорики, генерации лазерного излучения и других прикладных областях. В таких системах возбуждение электромагнитных мод различных порядков возможно за счет взаимодействия мод отдельных частиц структуры с коллективными модами, обусловленными взаимодействием частиц друг с другом. Для сферических частиц модами первого порядка являются электро- и магнито-дипольные. За счет увеличения размеров частиц возможно достичь возбуждения мод более высоких порядков. В случае периодических структур (например, решеток наночастиц) взаимодействие локальных мод каждой отдельной частицы с коллективными резонансами также приводит к возбуждению мод различных порядков. При этом модовый состав таких резонансов зависит от ряда геометрических параметров как самих частиц, так и структуры в целом. Особый интерес представляет решение задачи поиска геометрии системы, которая обеспечивает максимальное усиление локального поля. В настоящем разделе проекта исследовались периодические структуры из альтернативного плазмонного материала – алюминия. Данный материал обладает уникальными оптическими свойствами и позволяет достичь резонансный отклик в ближней ультрафиолетовой области спектра, что актуально для биомедицинских приложений.

Для решения задач рассеяния периодическими структурами наночастиц использовался метод конечных разностей во временной области – Finite Difference Time Domain (FDTD). Он является одним из ключевых методов для описания оптических свойств наноструктур и

использовался для расчета спектров экстинкции, отражения и поглощения в наноструктурах. Этот метод разрабатывался с середины XX века и за это время стал одним из самых популярных методов численной электродинамики. Метод основан на дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме. В отличие от других методов, например, метода связанных диполей, математическая модель в основе FDTD не использует никаких приближений и является точной для классической электродинамики. Уравнения решаются методом конечных разностей на двух вложенных структурированных прямоугольных сетках, одна из которых используется для расчета электрических полей, а другая – для магнитных полей. Метод позволяет за один расчет получить спектры пропускания и отражения исследуемой системы, а также распределение поля в расчетной области с учетом как сложной композитной структуры исследуемой системы, так и оптических свойств используемых материалов.

Возможность применения периодических граничных условий, а также оптимизация метода за счет учета симметрии элементарной ячейки периодической структуры позволяют значительно ускорить процесс расчета. Кроме того, метод позволяет проводить параллельные вычисления с использованием высокопроизводительных кластерных систем. Моделирование осуществлялось для элементарной ячейки с периодическими граничными условиями для имитации бесконечного пространства. В наших расчетах периодическая структура освещалась сверху плоской волной с нормальным падением вдоль оси X и поляризацией вдоль оси Y . Структура электромагнитного поля записывалась с помощью трехмерных discrete Fourier transform (DFT) мониторов, полностью вмещающих в себя исследуемые частицы. Данные с пространственным распределением комплексных векторов электрического и магнитного поля записывались в файлы для последующей обработки и разложения поля по мультиполям. Дальнее поле разлагалось на дипольную и квадрупольную компоненты (ED, EQ, MD, MQ).

На рисунке 2.13 представлены вычисленные спектры экстинкции одномерной и двумерной структуры, а также его компоненты ED, MD, EQ, MQ. Период структур $S = 280$ нм, радиус частиц 60 нм.

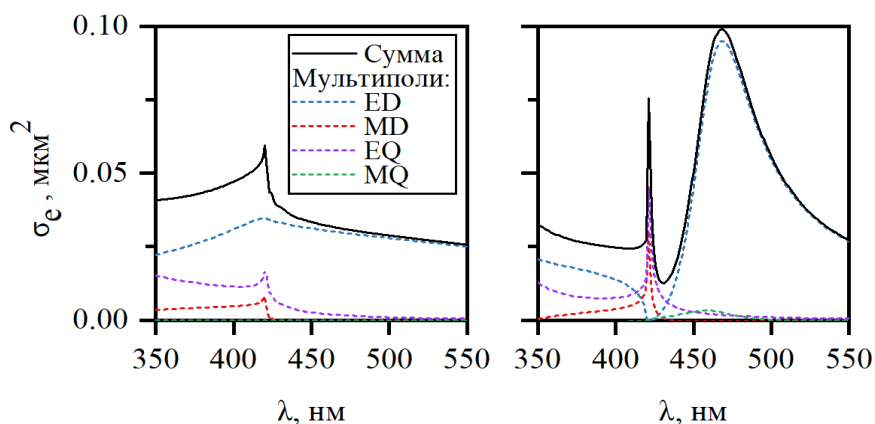


Рисунок 2.13 – Спектры экстинкции одномерной (слева) и двумерной (справа) периодической структуры из частиц алюминия, а также их разложение на компоненты по мультиполям. Период структур 280 нм, радиус частиц 60 нм.

Как видно из представленных зависимостей, амплитуда экстинкции в случае одномерной структуры значительно меньше, чем в случае двумерной. Кроме того, в спектре двумерной структуры присутствуют две обособленные линии экстинкции, которые обусловлены возбуждением магнито-дипольного и электроквадрупольного резонансов в случае коротковолнового пика, а в случае длинноволнового пика – электро-дипольного и магнито-квадрупольного резонансов. Положение каждого из максимумов экстинкции связано со спектральным положением аномалий Рэлея для взаимно ортогональных направлений в плоскости решетки. Так, коротковолновый пик связан с периодом решетки в направлении, лежащем в плоскости поляризации падающего излучения, а длинноволновый пик – в перпендикулярном ей направлении. Изменяя шаг решетки в одном из направлений, возможно добиться совпадения длин волн всех четырех мультипольных компонент.

Как показано на рисунке 2.14, в случае совпадения спектрального положения всех четырех компонент в разложении электромагнитного поля по мультиполям, в отражении наблюдается минимум, а в поглощении максимум. Кроме того, как видно из распределения локального электрического поля, такая синхронизация приводит к максимальному усилению поля вблизи частицы.

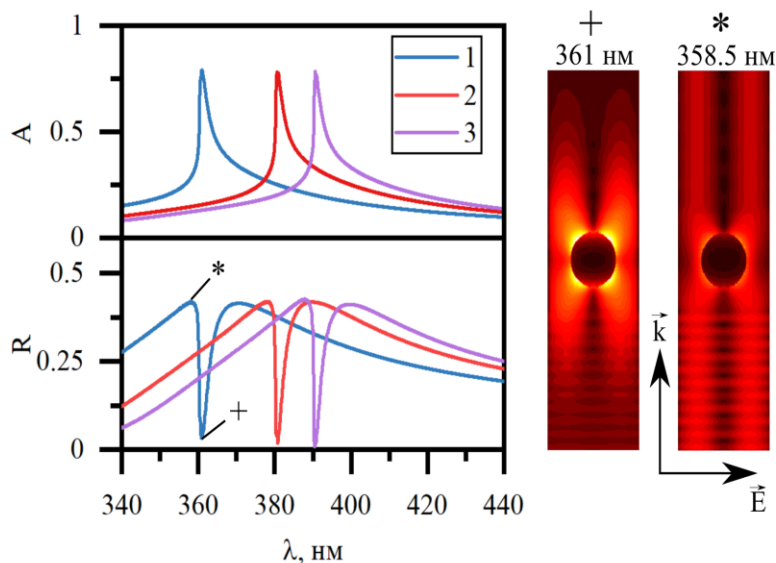


Рисунок 2.14 – Спектры поглощения (вверху), отражения (внизу) двумерной периодической структуры из алюминиевых частиц с различными геометрическими параметрами 1 - $R_p=50$ нм, $S_x=240$ нм, $S_y=197$ нм; 2 - $R_p=53.3$ нм, $S_x=253.3$ нм, $S_y=211$ нм; 3 - $R_p=55$ нм, $S_x=260$ нм, $S_y=217.5$ нм, где R_p - радиус сферической наночастицы, S_x - шаг решетки, в направлении, совпадающем с \vec{E} , S_y - шаг решетки, в направлении, совпадающем с \vec{H} . Распределение электрического поля (справа) в элементарной ячейке на длине волны максимума и минимума отражения

2.5. Математические модели ионного транспорта в наноструктурированных мембранных материалах под действием электрического поля

Наиболее распространенной технологией опреснения воды является мембранная технология обратного осмоса, в которой вода при определённом давлении проходит через полупроницаемую мембрану из более концентрированного в менее концентрированный раствор (мембрана пропускает воду и задерживает растворенные вещества). Основу установок обратного осмоса составляют тонкопленочные композитные мембраны, очищающие воду от солей. На селективные свойства таких фильтров помимо технологических характеристик также влияют рН и состав разделяемого раствора, однако сложный характер этого воздействия еще недостаточно изучен.

В рамках сотрудничества с коллегами из Европейского центра передовых технологий водоподготовки (Wetsus) и Университета Твенте (Нидерланды) разработана модель транспорта ионов через полимерную мембрану обратного осмоса. Такие мембраны являются композитными и состоят из подложки из полиэстера (150 мкм), промежуточного слоя из

полисульфона (40 мкм) и селективного слоя из полиамида (200 нм). В структуре полиамида присутствуют карбоксильные группы и аминогруппы, которые диссоциируют согласно уравнениям



При низких pH преобладает реакция (2.1), в результате чего мембрана заряжается положительно, а при высоких pH – реакция (2.2), которая приводит к отрицательному заряду мембраны. Электрическое поле, создаваемое поверхностными зарядами мембраны, существенно влияет на транспорт ионов через поры, характерный размер которых составляет порядка 1 нм (см. рисунок 2.15).

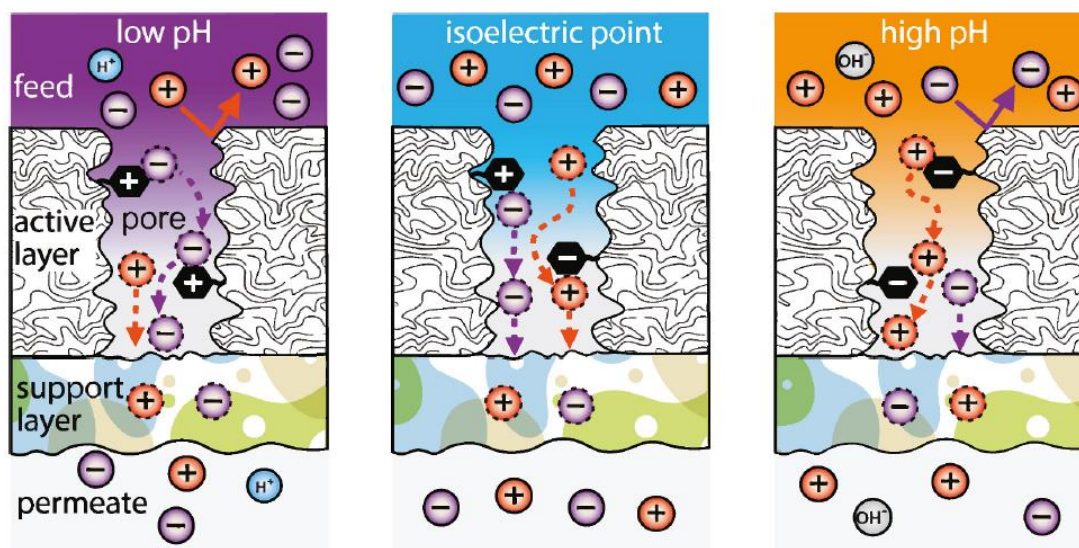


Рисунок 2.15 – Влияние pH на транспорт ионов через обратноосмотическую мембрану

Для описания влияния pH на перенос ионов через селективных слой и их задержание была разработана математическая модель, которая основывается на следующих предположениях.

1. Концентрации ионов и электрический потенциал изменяются только в направлении Z, перпендикулярном поверхности мембраны.

2. Перенос катиона, аниона, H^+ и OH^- ионов происходит за счет конвекции, диффузии и электромиграции и описывается уравнением Нернста-Планка:

$$J_i = KC_i J_V - K\varepsilon D_i \left(\frac{dC_i}{dZ} + \frac{F}{RT} z_i C_i \frac{d\Phi}{dZ} \right), \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.3)$$

Здесь J_i – поток ионов типа i , C_i – молярная концентрация ионов, z_i – зарядовое число, D_i – коэффициент диффузии, J_V – объемный поток воды, K – коэффициент трения между ионами и мембраной, ε – коэффициент пористости мембраны, Φ – потенциал, T – температура, F – постоянная Фарадея, R – универсальная газовая постоянная.

3. Учитывается диссоциация воды, при этом ионное произведение воды является постоянным в соответствии с уравнением $C_{H^+} C_{OH^-} = K_w$.

4. Заряд поверхности мембраны определяется диссоциацией карбоксильных групп и аминогрупп, плотность заряда X (приведенная к мол / м³) дается формулой

$$X = \xi \left(\frac{C_{NH_2}^t}{1 + K_{NH_2} / C_{H^+}} - \frac{C_{COOH}^{1t}}{1 + C_{H^+} / K_{COOH}^1} - \frac{C_{COOH}^{2t}}{1 + C_{H^+} / K_{COOH}^2} \right)$$

Здесь C_{H^+} – концентрация ионов водорода, K_j – константы равновесия реакций (2.1), (2.2) (вторая реакция характеризуется двумя константами), C_j^t – плотность поверхностных групп, ξ – коэффициент, учитывающий долю активных поверхностных групп.

5. Выполняется условие электронейтральности $z_+ C_+ + z_- C_- + C_{H^+} - C_{OH^-} + X = 0$.

6. Ионный ток отсутствует: $z_+ J_+ + z_- J_- + J_{H^+} - J_{OH^-} = 0$.

7. Выполнены условия Доннана на границе мембрана/раствор: $C_i = C_i^\infty \phi_i \exp(-z_i \Delta\Phi)$.

Здесь C_i – концентрация ионов внутри мембраны, C_i^∞ – концентрация ионов в растворе, ϕ_i – коэффициент, описывающий соотношения размера пор мембраны и размера ионов, $\Delta\Phi$ – скачок потенциала на границе.

8. Потоки катиона и аниона определяются формулами $J_{\pm} = C^P J_V$, где C^P – концентрация соли в выходном потоке (пермеате).

Предложенная модель сводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений для концентраций ионов и электрического потенциала с краевыми условиями, которая решалась численно. Задается объемный расход и концентрации ионов в сырьевом потоке C_i^f . В результате решения необходимо определить концентрацию ионов в пермеате C_i^P и задержание ионов согласно формуле $R_i = 1 - C_i^P / C_i^f$.

Расчетные данные сравнивались с данными экспериментов, которые проводились в Университете Твенте. Использовалась установка тангенциальной фильтрации (Convergence Inspector Colossus, The Netherlands) и мембрана BW30HR-440 (DuPont™ FilmTec™, США), вырезанная из мембранного модуля. В качестве рабочего был выбран водный раствор NaCl (30 мМ); поток через мембрану составлял 20 л/м² час, давление 6.2 – 6.8 бар; сырьевой поток 50 л/час; поток пермеата 0.5 л/час. Эксперименты проводились для различных значений pH в диапазоне pH = 3.5–10.5 (посредством добавления кислоты / основания, а также прокачкой смеси газов CO₂ / N₂ в определенном соотношении).

Результаты расчетных и экспериментальных исследований показаны на рисунке 2.16 для задержания ионов натрия и хлора, а также pH пермеата в зависимости от pH сырьевого потока. В работе осуществлена подгонка параметров модели (коэффициентов трения, пористости и заряда) для описания экспериментальных данных. На рисунке 2.17 представлена расчетная зависимость заряда поверхности мембраны от pH сырьевого потока. Видно, что при pH = 5.2 мембрана является незаряженной, что приводит к локальному минимуму задержания соли (рисунок 2.16.а). При pH < 5.2 заряд мембраны является положительным за счет диссоциации аминогрупп (реакция (2.1)). В этом случае задержание ионов натрия больше, чем задержание ионов хлора (рисунок 2.16.а) за счет электростатического взаимодействия. При pH > 5.2 заряд мембраны является отрицательным за счет диссоциации карбоксильных групп (реакция (2.2)) и его величина растет с ростом pH. Это приводит к увеличению задержания соли. Из рисунка 2.16.б видно, что фильтрация соли приводит к увеличению pH пермеата по сравнению с pH сырьевого потока.

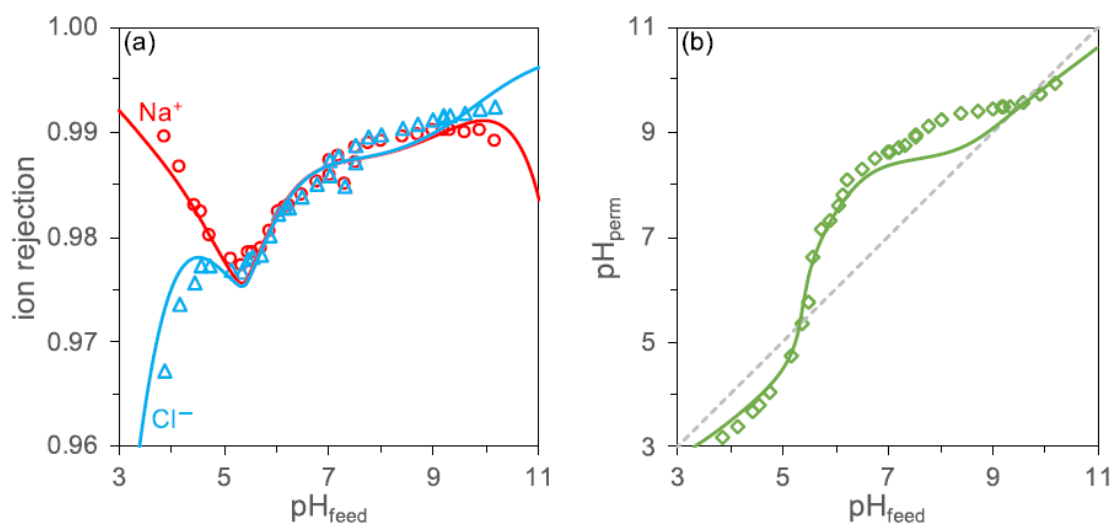


Рисунок 2.16 – Влияние pH сырьевого потока на задержание ионов (a) и pH пермеата (b). Экспериментальные данные показаны точками, расчетные – непрерывными кривыми

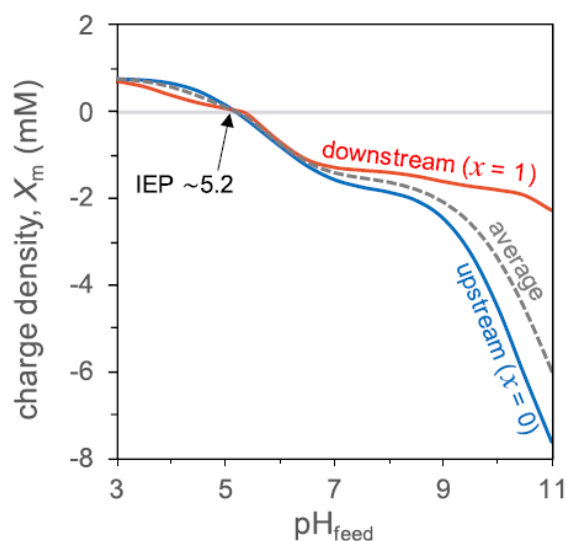


Рисунок 2.17 – Влияние pH сырьевого потока на заряд мембраны.

Результаты работы показывают ключевую роль локального pH в ионизации функциональных групп и их взаимодействия с ионами H^+ и OH^- . Установлено, что степень очистки воды зависит от ее водородного показателя pH и ионного заряда мембраны. Модель позволяет предсказывать эффективность опреснения, минеральный состав полученной воды и может использоваться для разработки улучшенных фильтров и мембранных элементов.

2.6. Модели переноса ионов в напористых мембранных материалах под действием разности давлений для объяснения экспериментальных данных в области фильтрации

Обратный осмос – одна из наиболее распространённых мембранных технологий опреснения и удаления загрязнений из воды. В данной технологии раствор продавливается под давлением через мембрану, частично или полностью задерживающую ионы соли и пропускающую молекулы воды. Обратный осмос применяется во всем мире и может использоваться как для небольших, так и для крупномасштабных опреснительных установок. Для оценки производительности используются стандартные тесты с помощью образцов мембран и водного раствора NaCl в контролируемых лабораторных условиях.

В ходе исследований предложена новая модель для потока раствора и задержания соли, которая может использоваться в широком диапазоне параметров – от случая незаряженной мембраны и раствора с нейтральным веществом до случая сильно заряженной мембраны и сильного водного электролита. Предложенная модель основана на фрикционной модели транспорта ионов соли и растворителя через мембрану. Полученное в рамках модели уравнение для задержания соли применяется для описания нескольких наборов экспериментальных данных по фильтрации морской воды с помощью обратного осмоса и позволяет дать сравнительную оценку солевой проницаемости различных коммерчески доступных мембран.

Рассмотрим бинарный симметричный электролит с моновалентными катионом и анионом. Предложенная модель основана на расширенном уравнении Нернста-Планка (2.3) для потока ионов, которое учитывает их перенос через мембрану под действием конвекции, диффузии и электромиграции. Условие электронейтральности записывается в виде $C_+ - C_- + X = 0$, где C_{\pm} – концентрации ионов, а X – объемная плотность заряда мембраны. Предполагается, что на границе мембрана / раствор выполняются условия равновесия Доннана, а также имеет место стерическое (размерное) исключение ионов. Далее, предполагается, что концентрация соли в пермеате C_p (после мембраны) значительно меньше концентрации в сырьевом потоке C_f . Учитывается концентрационная поляризация (повышение концентрации растворенного вещества вблизи мембраны). Концентрация соли на поверхности мембраны C_{int} связана с концентрацией соли в сырьевом потоке формулой

$$C_{int} = C_f \exp(v_w / k_{dbl}). \quad (2.4)$$

Здесь v_w – объемный поток раствора через мембрану (л/м²ч) и k_{dbl} – коэффициент массопереноса в пограничном слое вблизи мембраны. Поток соли связан с объемным потоком раствора формулой $J_s = C_p v_w$. Предполагается, что конвективным переносом ионов через мембрану можно пренебречь, поэтому поток соли пропорционален разности между полной концентрацией соли (катион плюс анион) между внутренними границами мембраны со стороны сырьевого потока и пермеата: $J_s = P(C'' - C')$, где P есть проницаемость мембраны по соли. Указанные предположения приводят к следующему выражению для задержания соли:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} = 1 - \frac{P}{v_w} \left(\sqrt{\left(\frac{C}{C_f}\right)^2 + \exp\left(\frac{2v_w}{k_{dbl}}\right)} - \frac{C}{C_f} \right), \quad (2.5)$$

где $C = |X|/2\Phi$ – коэффициент, определяемый объемной плотностью заряда мембраны и коэффициентом распределения Φ (отношение концентрации соли внутри мембраны к концентрации соли в растворе). Если C/C_f мало, что имеет место для слабо заряженных мембран или для больших концентраций соли C_f , то задержание дается формулой

$$R = 1 - \frac{B}{v_w} \exp\left(\frac{v_w}{k_{dbl}}\right). \quad (2.6)$$

Это предельное соотношение, в котором заряд мембраны не учитывается, также используется в модели растворение / диффузия.

Независимо от того, заряжена мембрана или нет, уравнение (2.6) можно использовать для определения наблюдаемой проницаемости по соли B_{obs} . Для незаряженной мембраны B_{obs} не зависит от C_{int} и совпадает с проницаемостью по соли B . Однако, если

экспериментальные данные для мембраны показывают зависимость B_{obs} от C_{int} , то мембрана является заряженной. Указанная зависимость может быть получена из уравнений (2.4)–(2.6), которые дают

$$B_{obs} = P \left(\sqrt{\left(\frac{C}{C_{int}}\right)^2 + 1} - \frac{C}{C_{int}} \right). \quad (2.7)$$

Связь потока воды через мембрану с приложенной разностью давлений ΔP^∞ выводится с помощью теории Бьерума о электростатическом ион-ионном взаимодействии, которое приводит к снижению осмотического давления:

$$v_w = A \left(\Delta P^\infty - 2RTC_{int} (1 - \gamma \sqrt[3]{C_{int} / C_{ref}}) \right), \quad (2.8)$$

где A – проницаемость мембраны по воде, R – универсальная газовая постоянная, T – температура и $\gamma = 0.0154$.

Полученное новое уравнение (2.5) использовалось для описания ряда наборов данных из литературы, а также данных, полученных в настоящей работе. Эксперименты проводились с различными обратноосмотическими мембранами с использованием коммерчески доступной системы обратного осмоса (Demcon convergence inspector reverse osmosis pilot system, Нидерланды) в Университете Твенте (Нидерланды).

На рисунке 2.18 приведены результаты для мембраны SW30-HRLE компании DuPont, из которой был вырезан образец размером 5×8 см. Как видно из рисунка 2.18.В, задержание соли не зависит от ее концентрации C_f в сырьевом потоке при $C_f \geq 300$ мМ, однако для меньших значений задержание увеличивается с уменьшением C_f . Эти результаты хорошо описываются уравнением (2.5) с параметрами мембраны $P = 0.39$ л/м²ч, $C = 55$ мМ, $k_{dbl} = 110$ л/м²ч и $A = 2.2$ л/м²ч бар. Наблюдаемая проницаемость по соли B_{obs} возрастает примерно в 2 раза при изменении концентрации соли от низких значений к высоким, см. рисунок 2.18.А.

Результаты для различных коммерческих мембран представлены на рисунке 2.19.А, где показана зависимость наблюдаемой проницаемости мембраны по соли от концентрации соли вблизи поверхности. Для определения мембраны с лучшей (наименьшей)

проницаемостью по соли, необходимо определиться с типичной концентрации соли, которая является различной для морских и солоноватых вод. В данной работе используется значение $C_{ref} = 500 \text{ mM}$, которое соответствует морской воде. Зависимость обратной проницаемости по соли $1/B_{obs,ref}$ от проницаемости по воде A для различных мембран показана на рисунке 2.19.В. Точки в правом нижнем углу соответствуют мембранам с высокой проницаемостью по воде и соли, а точки в левом нижнем углу – с низкой проницаемостью по воде и соли. Мембраны с оптимальным соотношением указанных параметров лежат в центральной области графика и выше кривой, показанной черным цветом.

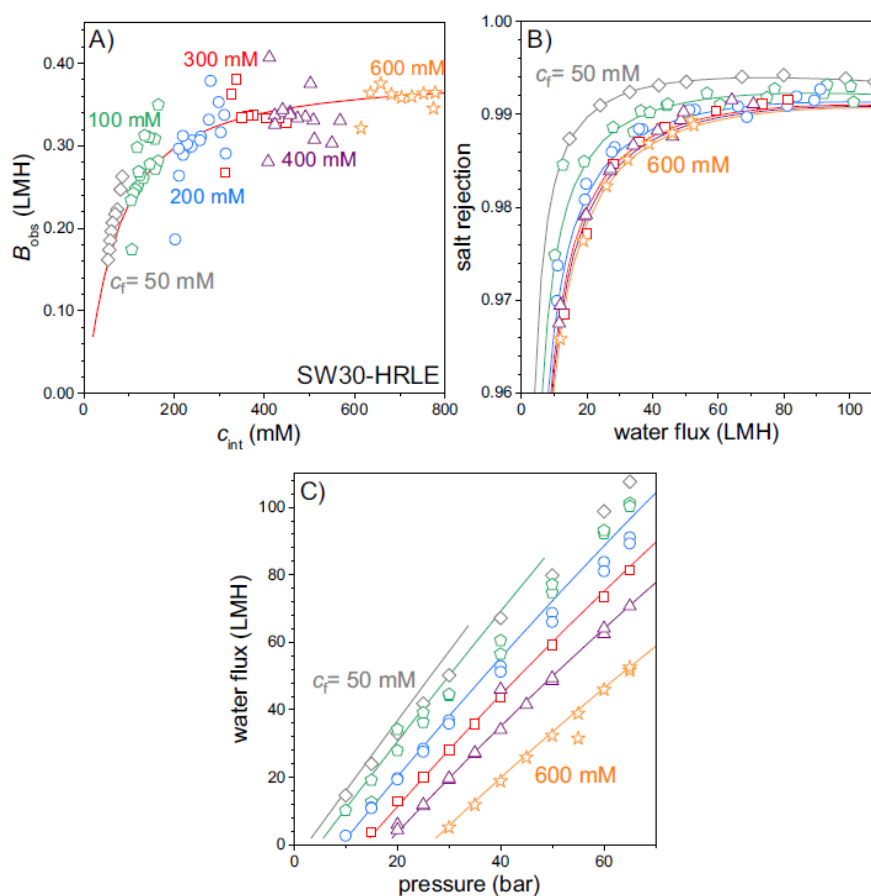


Рисунок 2.18 – Экспериментальные и расчетные зависимости наблюдаемой проницаемости по соли (A), задержания соли (B) и потока растворителя (C) от концентрации NaCl вблизи мембраны, потока растворителя и давления соответственно для мембраны SW30-XLE (Dupont)

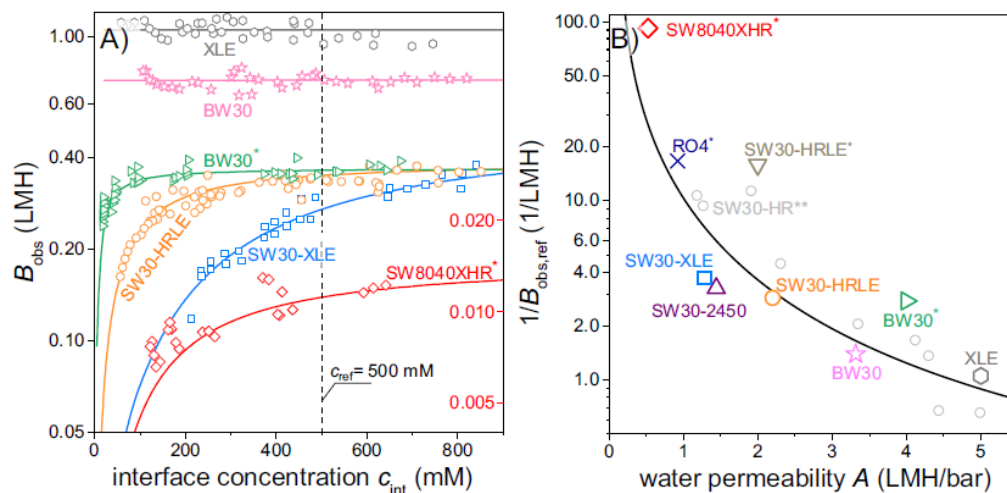


Рисунок 2.19 – А) Зависимость наблюдаемой проницаемости по соли B_{obs} от концентрации соли вблизи мембраны C_{int} для различных мембран. В) Диаграмма производительности ряда коммерческих обратноосмотических мембран

В заключение следует отметить, что в ходе исследования предложена новая модель (уравнение), которое описывает заряженные и незаряженные обратноосмотические мембраны для 1:1 водных электролитов. Ее четыре параметра могут быть определены из достаточно представительного набора экспериментальных данных – проницаемость по воде, по соли, коэффициент заряда мембраны и коэффициент массопереноса в пограничном слое.

3. Исследование больших данных, обнаружение новых знаний и прогнозирование состояния сложных систем и объектов

3.1 Алгоритмы выявления аномальных изменений контролируемых параметров, свидетельствующих о нарушении технологического процесса

3.1.1 Алгоритм анализа полноты программ испытаний в технологическом процессе производства бортовой аппаратуры космического аппарата

Предложен алгоритм анализа полноты программ испытаний в технологическом процессе производства бортовой аппаратуры космического аппарата, позволяющий на основе построенных цифровых моделей выявлять неконтролируемые параметры функционирования технических систем, что способствует повышению качества и снижению затрат, связанных с подготовкой и проведением испытаний.

Исследование продолжает работы по созданию формальных принципов анализа структуры и базы знаний интеллектуальной имитационной модели, а также разработке инструментов их инфографического представления. Особенностью рассматриваемых систем является наличие в них внутренних принципов информационного взаимодействия бортовых и наземных сегментов на основе собственных протоколов и специализированных структур данных. Задача испытаний заключается в формировании и передаче последовательности управляющих воздействий на объект контроля и обеспечении сбора, мониторинга и анализа данных, возникающих в результате его функционирования. В технологическом процессе испытаний требуется проводить не только измерительный, но и функциональный контроль, для чего созданы программные инструменты, интеллектуального имитационного моделирования, интегрированные с технологиями анализа и верификации устройств.

Алгоритм анализа программ испытаний заключается в выполнении следующей последовательности действий.

1. Построение цифровых двойников функционирования объекта контроля.

Физические устройства представляются цифровыми образами в элементах интеллектуальной имитационной модели, которые объединяют базы знаний, программно-математические модели и данные натурных испытаний. Базы знаний описывают правила работы технических систем. Моделирование выполняется на графических структурах. Результаты имитационных экспериментов консолидируются в эталонной базе прецедентов R_E .




2. Автоматическое построение базы знаний из программ испытаний.

Из формальных описаний испытательных процедур в базу знаний R_N записываются следующие правила: передачи команды (передающие устройства, интерфейсы, время ожидания); приёма команды (принимающие устройства, интерфейсы, структура телекоманд, пакет данных, критерии выбора обрабатывающего устройства); квитирования команды (интерфейсы, структура телекоманд, способ квитирования); передачи телеметрической информации (устройство телесигнализации, структура телеметрического кадра, номер параметра в телеметрическом кадре, значение) и правила контроля отработки команды (параметры, условия контроля).

3. Сопоставление баз знаний на основе заданных критериев анализа.

Выполняется сравнение базы знаний R_N , построенной на основе испытательных процедур, с эталонной базой знаний R_E , созданной при проектировании бортовых систем и отражающей поведение устройств, заложенное в технической документации.

4. Графическая визуализация результатов анализа.

Выполняется визуализация зависимостей и ошибок в базах знаний. На рисунке 3.1 приведён фрагмент графа, узлы которого обозначают структуры правил. Совпадение эталонной базы знаний и построенной по программам испытаний обозначено узлами с пиктограммой , наличие правил в эталонной базе при отсутствии в базе, построенной по программам испытаний – , и избыточные действия в испытаниях – .

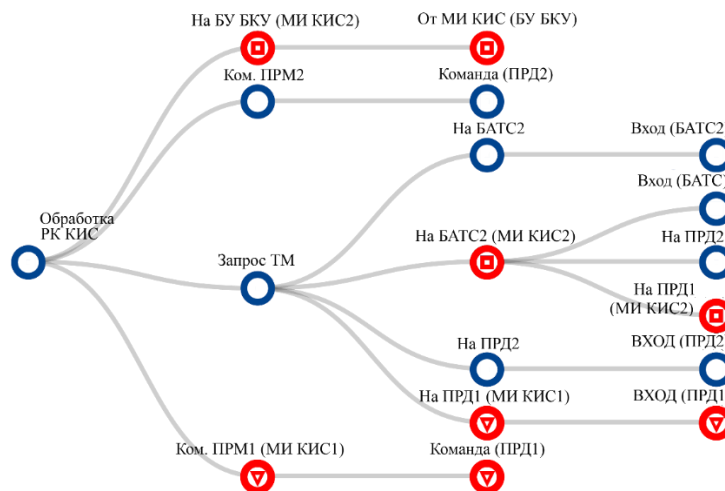


Рисунок 3.1 – Графическая визуализация результатов сопоставления баз знаний

Для анализа программ испытаний однотипных устройств предназначен следующий способ визуализации: эталонная база выбирается для основного комплекта и сопоставляется с

построенной базой знаний для резервного комплекта. Пример результатов анализа показан на рисунке 3.2. Отсутствующие в программах испытаний действия с командами отображаются пунктирной линией.

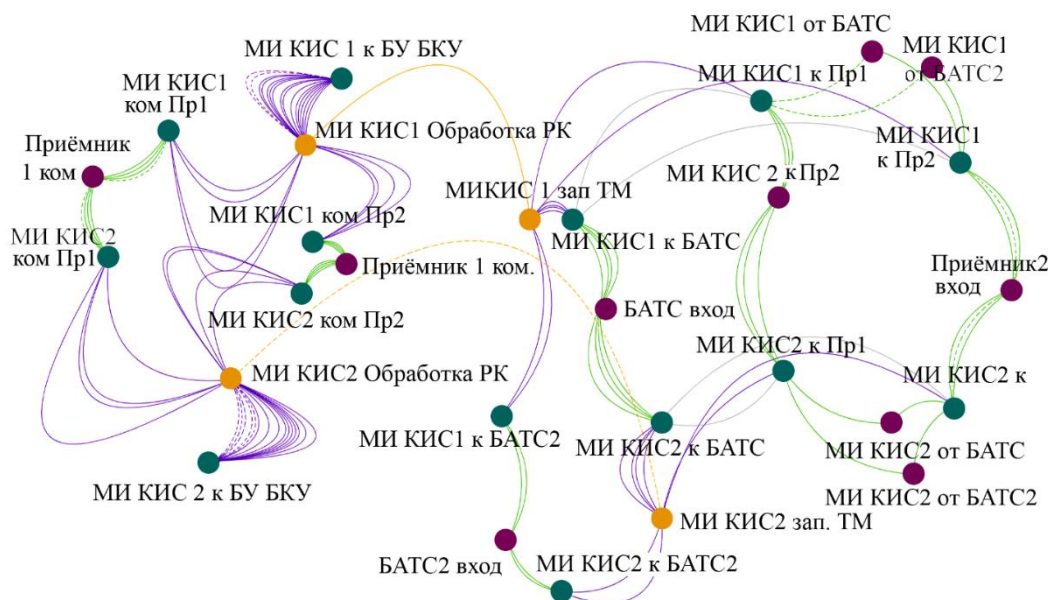


Рисунок 3.2 – Графическая визуализация сопоставления программ испытаний основного и резервного устройств

Предложенный алгоритм обеспечивает выявление аномалий технологического процесса испытаний. Он отличается такими свойствами, как конструктивность – легко реализуется, в том числе инфографическими инструментами и интероперабельность – встраивается в существующую схему проведения испытаний.

3.1.2 Алгоритмы выявления отклонений в технологическом процессе производства алюминия

С целью раннего обнаружения отклонений в технологическом процессе и превентивной оценки рисков снижения производительности в цикле производства алюминия на основе совокупности методов математической статистики, интеллектуального анализа данных и машинного обучения разработаны алгоритмы выявления изменений контролируемых параметров.

Для выявления отклонений в технологическом процессе по данным мгновенного мониторинга разработан алгоритм идентификации изменений значений контролируемых параметров «шум» и «ток на аноде». По значениям параметров определяются стадии

развития технологических нарушений. Идентификация возникновения нарушений осуществляется по значениям параметра «шум» (рисунок 3.3). Основываясь на результаты предварительного исследования событий технологических нарушений, диапазон значений параметра «шум» разбивается на три интервала: $[0; 0.03)$, $[0.03; 0.06)$ и $[0.06; \infty]$. Первый интервал определяет «штатный режим» технологического процесса, второй интервал характеризует процесс, протекающий с возможными нарушениями, а третий интервал характеризует процесс, протекающий с серьезными нарушениями.

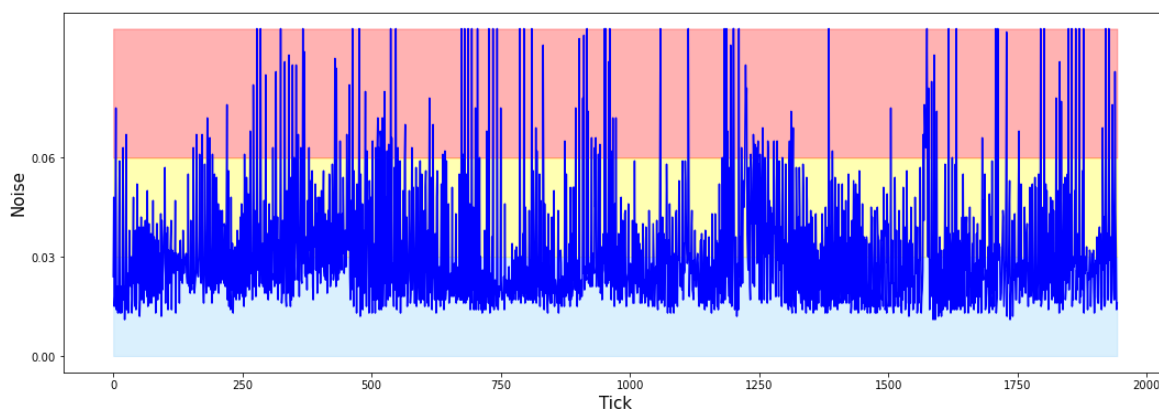


Рисунок 3.3 – Градация значений технологического параметра «шум»

После идентификации возникновения нарушений выполняется поиск «проблемных» анодов по значениям параметра «ток на аноде» – вычисляются оценки среднего взвешенного и взвешенного линейного отклонения. По результатам анализа характеристик временных рядов определяется два индикатора развития нарушения: I_f – индикатор «шума»; I_{amp} – индикатор «тока на аноде». Определено три значения индикатора: 0 – «зеленый» – норма; 1 – «желтый» – развитие технологических нарушений; 2 – «красный» – возникновение технологических нарушений. Обработка индикаторов выполняется последовательно. Сначала проверяется индикатор по «шуму», затем, в случае выявления изменений ($I_f \neq 0$) и наличия данных по «току анодов», выполняется проверка индикатора изменения «тока». Если зарегистрированы изменения «тока на анодах» ($I_{amp} \neq 0$), то определяются аноды с максимальным изменением сигнала. В зависимости от значений индикатора, формируются предупреждения: если $I_f \neq 0$ и $I_{amp} = 0$ – сообщение об изменении сигнала «шум» и время фиксации отклонения; $I_f \neq 0$ и $I_{amp} \neq 0$ – сообщение об изменении сигнала «ток на аноде» с перечнем «проблемных» анодов.

Для прогнозирования технологического нарушения «анодный эффект» разработана модель на основе алгоритма градиентного бустинга на деревьях решений – *XGBoost Classifier*, учитывающая одновременно данные среднесуточного мониторинга и усредненные данные мгновенного мониторинга работы комплекса производства алюминия. На рисунке 3.4 представлен пример обнаружения нарушения; синим цветом выделены фактические значения напряжения, красным – значение индикаторной функции

$$I(P(A)) = \begin{cases} 0, & P(A) \leq 0.6 \\ 1, & 0.6 < P(A) \leq 0.8 \\ 2, & P(A) > 0.8 \end{cases}$$

где $P(A)$ – рассчитываемая алгоритмом вероятность обнаружения нарушения «анодный эффект».

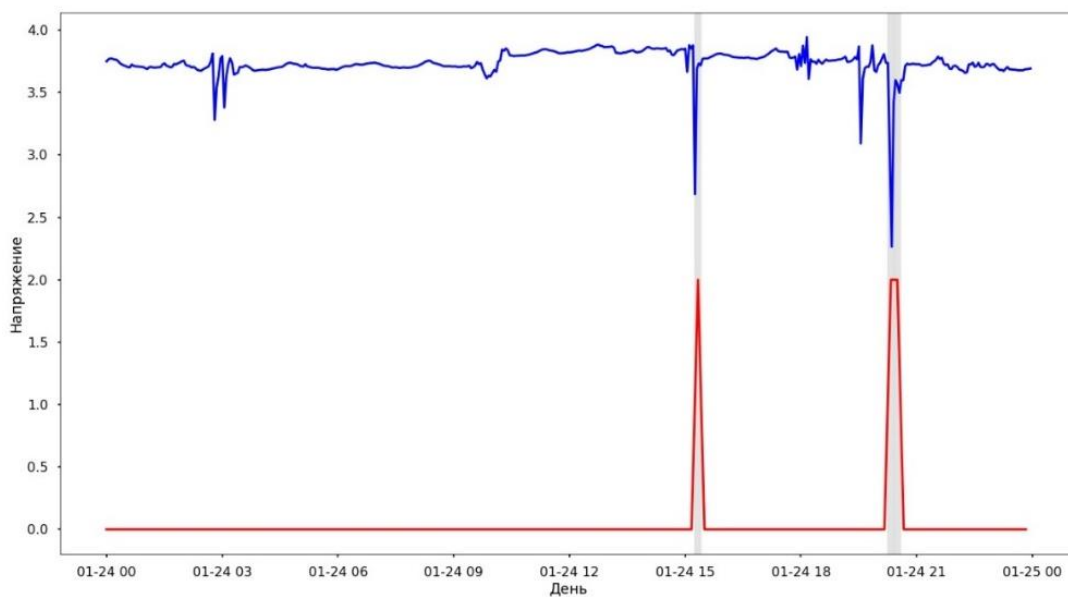


Рисунок 3.4 – Пример обнаружения нарушения «анодный эффект» на электролизерах РА-550 Саяногорского алюминиевого завода

Для оценки точности модели используется следующая матрица ошибок:

	Прогнозные значения	
Реальные значения	TN True Negative (истинно-отрицательное решение): результат отрицательный, прогноз совпал с реальностью	FP False Positive (ложноположительное решение): ошибка 1-го рода, модель предсказала положительный результат, в реальности отрицательный
	FN False Negative (ложноотрицательное решение): ошибка 2-го рода – модель предсказала отрицательный результат, в реальности положительный	TP True Positive (истинно-положительное решение) результат положительный, прогноз совпал с реальностью

На рисунке 3.5 представлены результаты апробации модели для опытного участка РА-550 Саяногорского алюминиевого завода. При классификации, как правило, используется пороговое значение 0.5. Однако такое значение не всегда оказывается оптимальным, влияет на соотношение ложноположительных и ложноотрицательных прогнозов и уменьшено до значения 0.3. Результаты демонстрируют высокий процент истинно-положительных решений и допустимые для применения модели ошибки первого и второго рода.

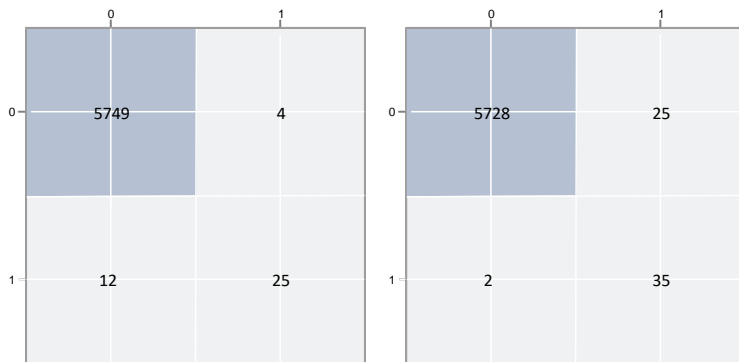


Рисунок 3.5 – Матрица ошибок для модели прогнозирования «анодного эффекта» на опытном участке РА-550 Саяногорского алюминиевого завода (слева – пороговое значение 0.5, справа – пороговое значение 0.3)

Полученные результаты апробации модели демонстрируют высокий процент истинно-положительных решений и допустимые для применения модели ошибки первого и второго рода.

3.2. Модели и алгоритмы раннего обнаружения технологических нарушений с применением экспертных знаний и выявленных закономерностей работы сложного технического объекта

Для раннего обнаружения технологических нарушений в цикле производства алюминия, связанных с возникновением образования на подошве анода типа «конус», разработана модель прогнозирования нарушения по данным среднесуточного мониторинга. Прогноз формируется на результатах трех моделей: модели метаклассификации, модели голосования и модели на основе ассоциативных правил, которые путем выявления внутренних закономерностей в данных определяют состояние объекта, соответствующее возникновению нарушения.

Модель метаклассификации и модель голосования разработаны на основе применения ансамблевых алгоритмов. Построение моделей включает три основных этапа: предварительная обработка данных мониторинга; прогнозирование на основе алгоритмов классификации; формирование обобщенного прогноза. Предварительная обработка данных включает восстановление пропущенных значений, поиск и удаление аномальных значений. По результатам исследования алгоритмов и анализа метрик их точности, выбраны алгоритмы: для восстановления значений – *EM-algorithm*, для поиска аномальных значений – *Tukey's method*, для балансировки данных – *SVMsmote algorithm*.

В основе модели «метаклассификации» лежит стекинг-метод ансамблирования – *Meta Classifier*. Он заключается в обучении нескольких базовых алгоритмов классификации и их объединении путем обучения метамоделей на множественных предсказаниях, возвращаемых базовыми моделями. Формирование стекового ансамбля выполняется по принципу «*k-fold cross learning*». Обучающая выборка разбивается на несколько частей – *folds*. На всех частях, кроме одной, последовательно осуществляется обучение базовых алгоритмов – классификаторов. На основе полученных моделей для оставшейся части обучающей выборки формируются прогнозы. Результаты прогнозирования, полученные базовыми алгоритмами, рассматриваются как новые признаки – метапризнаки, которые используются в качестве входных данных для обучения метамоделей. В качестве метамоделей для объединения результатов прогнозирования базовых алгоритмов используется *Logistic Regression*. На основе анализа метрик точности для прогнозирования возникновения технологических нарушений типа «конус» выбран метод *Meta Classifier*.

В основе модели «голосования» лежит ансамблевый метод *Voting Classifier*, позволяющий объединять концептуально разные классификаторы машинного обучения и

использовать большинство голосов (или средние предсказанные вероятности – мягкое голосование). На основе анализа метрик точности для прогнозирования возникновения технологических нарушений типа «конус» выбран метод *Voting Classifier*.

На основе применения *технологии ассоциативных правил* разработана модель, которая путем анализа событий-прецедентов и выявления причинно-следственных связей в данных, формирует правила, определяющие состояние технологии и вероятность возникновения нарушения.

Результаты оценки эффективности моделей представлены на рисунке 3.6 для опытных участков РА-300 и РА-550 Саяногорского алюминиевого завода. Оценка основана на сравнении результатов прогнозирования с фактами обнаружения нарушений за период 01.09.2022 – 31.05.2023. Днями с нарушениями считались день обнаружения и три предшествующих дня. Результаты прогнозирования считались положительными, если значения вероятности составляли 60% и более.

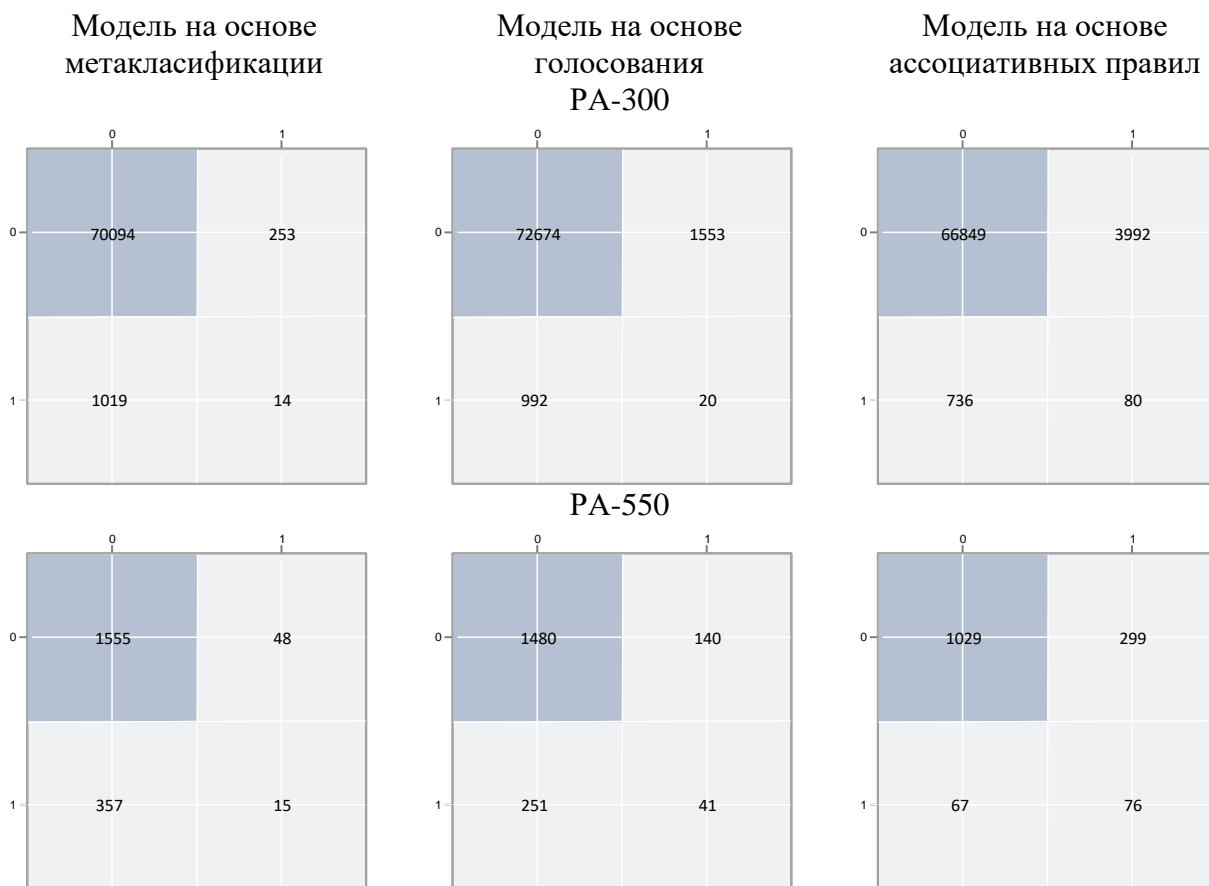


Рисунок 3.6 – Матрицы ошибок для моделей прогнозирования технологического нарушения типа «конус»

Как видно из значений матрицы, наилучшие результаты прогнозирования наблюдаются для модели на основе ассоциативных правил. В целом, полученные результаты апробации демонстрируют высокий процент истинно-положительных решений и допустимые для применения моделей ошибки первого и второго рода.

3.3. Методы выявления особенностей структурирования и связей выделенных структурных единиц с биологическими свойствами носителей генетической информации

Гены фотосинтетических систем рассматриваются как символьные последовательности различной длины, состоящие из символов алфавита $\mathfrak{M} = \{A, C, G, T\}$. Каждой из этих последовательностей мы будем ставить в соответствие частотный словарь толщины 3, то есть список всех троек $v_1v_2v_3$ идущих подряд нуклеотидов с указанием частот этих троек; всего может быть 64 триплета. Частота f_ω — это отношение числа копий n_ω данного слова к общему числу всех триплетов N , где N — сумма всех n_ω :

$$f_\omega = n_\omega / N \quad (3.1)$$

Всякий частотный словарь W_3 отображает символьную последовательность в 64-мерное метрическое пространство.

Для каждого гена был построен частотный словарь $W_{(3,3)}$, представляющий собой множество частот триплетов. Частотный словарь ставит в соответствие гену точку в 64-мерном пространстве триплетов. Кроме названия гена, с точкой связаны название вида, которому принадлежит ген, к какому стренду ген относится — прямому или обратному, GC-состав гена. По полученному множеству точек в программе *VidaExpert* (<http://bioinfo-out.curie.fr/projects/vidaexpert/>) строился вид данных в пространстве первых трёх главных компонент, вычисленных для 64-мерного пространства триплетов. Рассматривались проекции на плоскости пространства первых главных компонент.

Было рассмотрено 570 геномов хлоропластов и 45 геномов цианобактерий. Из полных геномов были выделены гены фотосистем. Рассмотрено распределение точек генов в пространстве частот триплетов. Обнаружено, что гены хлоропластов и цианобактерий образуют два больших кластера: один включает точки, относящиеся к генам прямого стренда

(обозначены красным цветом), а другой – точки, относящиеся к генам обратного стренда (обозначены зеленым цветом) (рисунок 3.7 а, г). Это существенно отличает пространственную структуру генов фотосинтетических систем I и II от пространственной структуры полных геномов хлоропластов, митохондрий и бактерий, где такой кластеризации не наблюдается.

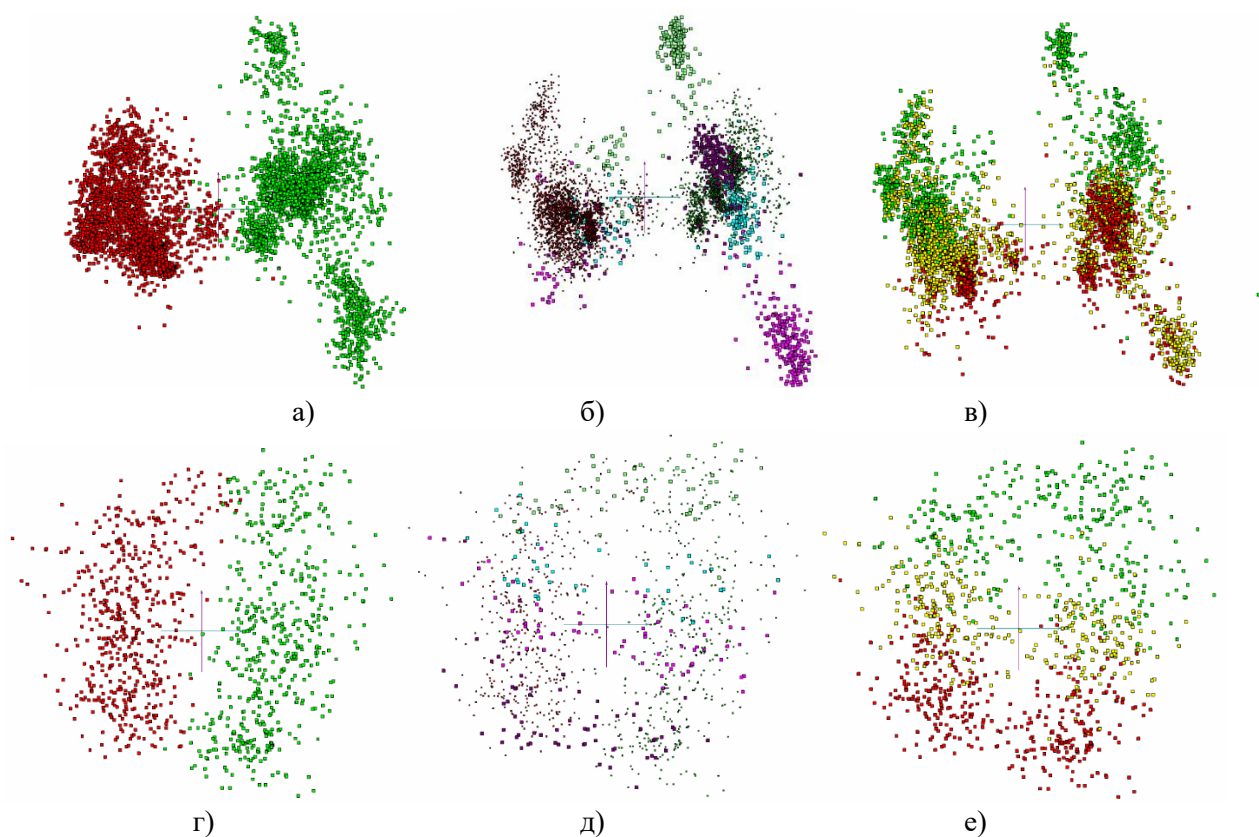


Рисунок 3.7 – Распределение генов фотосистем по стрендам а, г), типу генов и видам организмов б, д) и величине GC-состава в, е). Точки показаны в плоскости первой и второй главных компонент

Нужно отметить, что гены одного типа фотосистемы хлоропластов расположены довольно компактно, даже если они находятся в крупных кластерах, относящихся к прямому и обратному стренду, и скорее «соседствуют», чем пересекаются с генами других типов. То есть кластеризация происходит именно по типу генов, а не по филогенетическим признакам организмов, которым они принадлежат. На рисунке 3.7.б) показаны кластеры, образованные генами хлоропластов одного типа. Гену *psbF* соответствуют точки бирюзового цвета, гену *psbJ* – малинового цвета, гену *psbL* – светло-зеленого цвета и гену *psbN* – фиолетового

цвета. Остальные точки окрашены по принадлежности к стрендам и имеют меньший размер для наглядности. Напротив, гены, относящиеся к цианобактериям одного вида, образуют кластеры внутри стрендов.

На рисунке 3.7.д) показаны гены, относящиеся к *Gloeobacter kilauensis* и *Gloeobacter violaceus*, которые обозначены фиолетовым цветом; *Synechocystis* обозначены малиновым цветом; *Nostoc* обозначены бирюзовым цветом; *Prochlorococcus marinus* обозначены светло-зеленым цветом.

Было рассмотрено пространственное расположение значений *GC*-состава для генов. Для каждого гена вычислялся его *GC*-состав, то есть отношение количества нуклеотидов *G* и *C* к общему числу нуклеотидов в гене. Точки, соответствующие генам со значением *GC*-состава меньше среднего, обозначены на рисунке зеленым цветом; точки, соответствующие генам со средним значением *GC*-состава, обозначены желтым цветом; и точки со значением *GC*-состава больше среднего обозначены красным цветом. Было обнаружено, что в распределении *GC*-состава генов фотосинтетических систем хлоропластов не наблюдается какой-либо упорядоченности. Для цианобактерий величина *GC*-состава генов расположена по возрастанию значений от меньшего к большему. То есть для величины *GC*-состава генов фотосистемы цианобактерий имеет место градиентное распределение в пространстве частот триплетов. Такой тип распределения встречается у геномов хлоропластов, у геномов митохондрий высших растений, водорослей, мхов, лишайников и грибов и у *GC*-богатых бактерий.

Существенные различия распределения генов фотосистем хлоропластов и цианобактерий в пространстве частот триплетов может объясняться длительным сроком самостоятельной эволюции хлоропластов и цианобактерий после происхождения от общего предка.

3.4. Популяционно-эволюционный анализ геномов вирусов семейства Coronaviridae

SARS-CoV-2 является третьим коронавирусом в дополнение к SARS-CoV и MERS-CoV, который вызывает тяжелый респираторный синдром у людей. Основная цель исследования состояла в сравнении двух методов выявления взаимосвязей между геномами коронавирусов: филогенетического, основанного на выравнивании всего генома с последующим выводом молекулярного филогенетического дерева, и кластеризации частот триплетов без выравнивания с использованием 69 геномов коронавирусов, выбранных из

двух общедоступных баз данных NCBI GenBank и GISAID. Оба подхода привели к хорошо разделяемым надежным классификациям.

Для первого подхода выравнивание последовательностей проводили с использованием MAFFT (версия 7) и универсального итеративного алгоритма уточнения L-INS-i, подходящего для последовательностей, насыщенных расширенными вставками. Поиск оптимальной модели молекулярной эволюции и филогенетических построений осуществлялся с использованием программы IQ-TREE версии 1.6.12 и версии модели молекулярной эволюции GTR, в которой некоторые сайты инвариантны, а остальные следуют гамма-распределению. Надежность топологии дерева оценивалась с помощью метода приближенной оценки LRT IQ-TREE — aLRT (приближенный тест отношения правдоподобия), основанного на идее LRT с гипотезой о нулевой длине предполагаемой ветви. Анализ и визуализация результатов проводились с использованием оригинальных программ на языках программирования R и Python.

Предполагаемые филогении были визуализированы с помощью программы FigTree версии 1.4.4 и Splitstree версии 5.0.20. На полученном филогенетическом дереве идентичности геномов были выделены разными цветами в соответствии с таксономической принадлежностью к одному из четырех родов коронавирусов (рисунок 3.8.А) и типом вызываемого ими заболевания (рисунок 3.8.Б). Таксономическую принадлежность и тип заболевания определяли по аннотации в NCBI GenBank с учетом доступных публикаций и первичных описаний.

Во втором подходе каждый геном рассматривался как последовательность из четырех букв алфавита $\mathcal{X} = \{A, C, G, T\}$; L – длина последовательности. Для данной последовательности строились частотные словари триплетов и геному ставилось в соответствие множество точек в 64-мерном пространстве триплетов.

Исследовалась близость геномов с помощью евклидова расстояние между ними в 64-мерном пространстве триплетов, наиболее вероятного мутационного расстояние между двумя геномами или патристического расстояния. Попарные патристические расстояния между всеми геномами, участвующими в анализе, рассчитывали из филогенеза с использованием библиотеки Python ete3. Евклидово расстояние между точками на «упругой карте» использовалось для сравнения с патристическим расстоянием. Для группировки последовательностей использовались два признака: таксономическая идентичность вирусов была выбрана как предположительно наиболее филогенетически информативная, а вид

вызываемого заболевания, являющийся вторым признаком, считался наиболее практически важным.

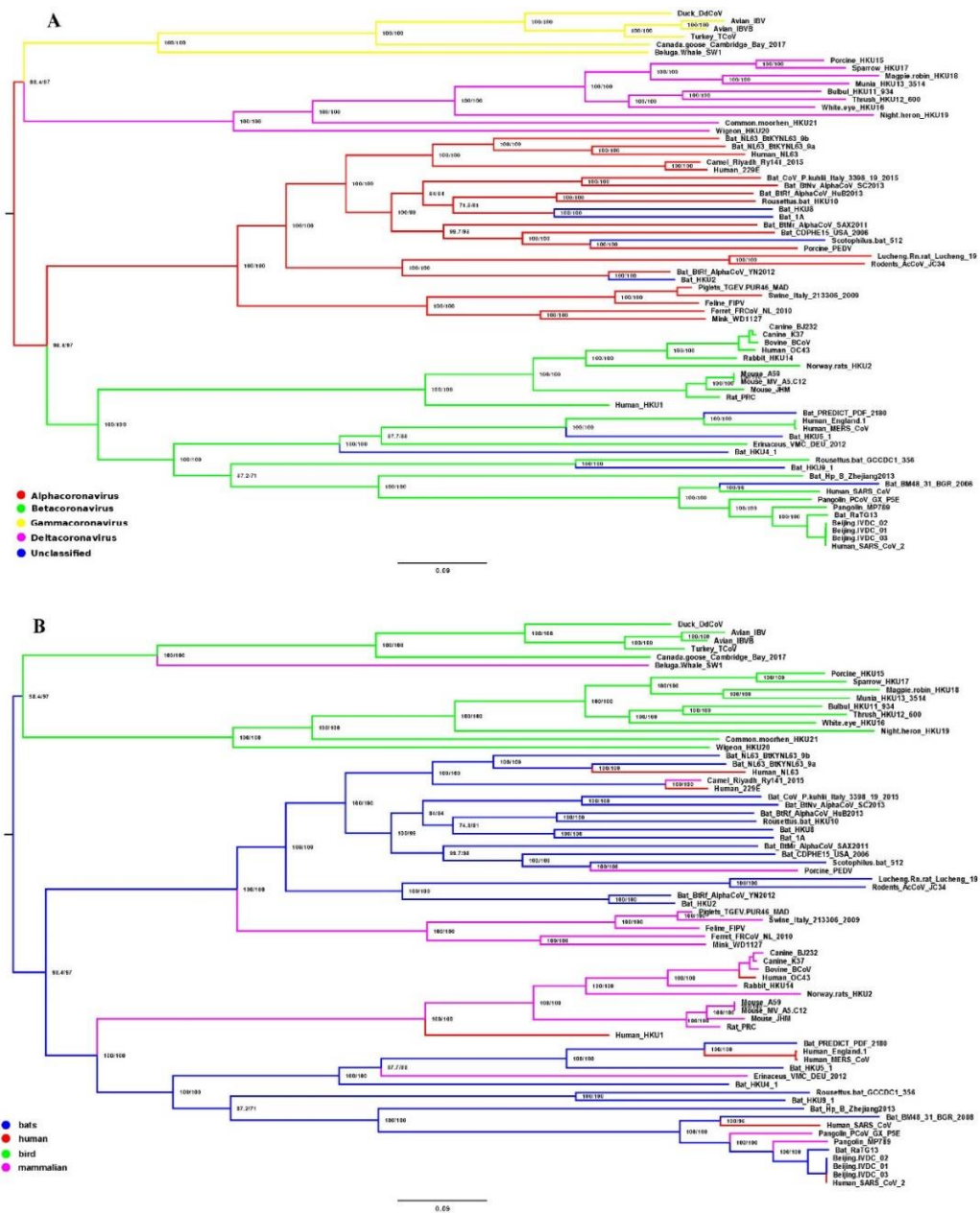


Рисунок 3.8 – Филогенетическое дерево, основанное на выравнивании 69 полногеномных последовательностей коронавируса

Проводилась кластеризация полученных точек методом k-средних. Ключевым вопросом исследования была связь между составами классов, наблюдаемых для различных значений k . Кластеры, выделенные по филогенетическому дереву на основе множественного выравнивания последовательностей, хорошо согласовывались с классами, выделенными по к-

средним, а слоистый граф, полученный из набора классификаций с увеличением числа классов, представлял собой структуру, полностью естественную с биологической точки зрения.

3.5. Разработка методики синтеза структуры статистических моделей сложных динамических систем на основе непараметрических алгоритмов автоматической классификации, распознавания образов и «быстрых» процедур их оптимизации для условий больших объёмов статистических данных

В современной теории принятия решений одной из основных проблем является моделирование сложных временных систем в условиях априорной неопределённости. При выполнении проекта развит непараметрический подход построения статистических моделей временных систем, контролируемых в дискретном времени. Предполагается, что исследуемые временные процессы являются повторяющимися. Подобные условия характерны при анализе медико-биологических систем и природных объектов по данным дистанционного зондирования в условиях больших объёмов статистической информации.

Статистическая модель временной системы с дискретным контролем её переменных в условиях априорной неопределённости представлена множеством непараметрических алгоритмов распознавания образов в пространстве внешних воздействий. Её применение позволяет прогнозировать траектории смены состояния системы в дискретные интервалы времени, которые соответствуют заданным последовательностям внешних воздействий. Основным показателем эффективности статистической модели изучаемой системы является вероятность смены её состояний, принадлежащих различным интервалам времени. Установлено, что скорость асимптотической сходимости этого показателя стремится к пределу, что согласуется с предельной теоремой Маркова для цепных зависимостей.

Под состоянием статистической модели временной системы понимается область в пространстве её выходных переменных, соответствующая одномодальному фрагменту плотности вероятности. Подобное определение класса впервые было введено в работах академика Я.З. Цыпкина. Разработан модифицированный непараметрический алгоритм автоматической классификации в условиях больших объёмов статистических данных. Он основан на сжатии исходной информации путём декомпозиции в массив данных, элементы которого соответствуют координатам центров многомерных интервалов и соответствующих им частотам принадлежности случайных величин. Алгоритм автоматической классификации формируется на основе регрессионной оценки плотности вероятности и последовательной

процедуре обнаружения ситуаций, принадлежащих классам. Непараметрический алгоритм автоматической классификации в условиях больших объёмов статистических данных реализован в программе NAC v.2.0 (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619023 от 18.05.2022). Применение предлагаемого метода позволяет в 2 раза сократить время классификации при использовании многопоточной технологии обработки данных, что подтверждается результатами обработки спектральных данных дистанционного зондирования лесных массивов. Результаты автоматической классификации показывают преимущество непараметрического алгоритма по сравнению с методом программного продукта ArcGIS ArcMap.

Развита методика быстрой оптимизации непараметрических статистик ядерного типа, что особенно актуально при обработке многомерных статистических данных большого объёма. Первые результаты решения этой проблемы основывались на анализе оптимального коэффициента размытости ядерных функций в непараметрической оценке плотности вероятности при её известном виде (Silverman B.W., Scott D.W., Sheather S.J.). В отличие от традиционного подхода предложена методика оценивания оптимального коэффициента размытости ядерных функций непараметрической оценки плотности вероятности с использованием числовых характеристик случайных величин (коэффициенты контрэксцесса и асимметрии). Полученные результаты обобщены при быстрой оптимизации непараметрических оценок плотностей вероятностей многомерных независимых случайных величин и ядерной оценки уравнения разделяющей поверхности в двухальтернативной задаче распознавания образов.

Разработанные алгоритмические и программные средства использовались при исследовании состояния лесных массивов, повреждённых сибирским шелкопрядом и полиграфом уссурийским. Исходную информацию составляли данные дистанционного зондирования территорий Ирбейского и Дзержинского районов Красноярского края. По результатам автоматической классификации и их картирования определены участки лесных территорий с различной степенью повреждения насекомыми и их площади.

В 2023 году получены следующие результаты в направлении «Быстрые алгоритмы оптимизации непараметрических решающих функций ядерного типа».

Непараметрические оценки плотности вероятности $\bar{p}(x)$ являются основой синтеза алгоритмов принятия решений при априорной неопределённости о виде законов

распределения $p(x)$ случайных величин x . При $x \in (x_v, v = \overline{1, k})$ непараметрическая оценка плотности вероятности представляется в виде

$$\bar{p}(x) = \sum_{i=1}^n \prod_{v=1}^k \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v} \right) / \left(n \prod_{v=1}^k c_v \right)$$

где n – объём исходных статистических данных $V = (x^i, i = \overline{1, n})$; ядерные функции

$$\frac{1}{c_v} \prod_{v=1}^k \Phi \left(\frac{x_v - x_v^i}{c_v} \right)$$

удовлетворяют условиям симметричности относительно x_v^i и нормированности; c_v – коэффициенты размытости ядерных функций. Статистика $\bar{p}(x)$ обладает свойствами асимптотической сходимости к $p(x)$ при $n \rightarrow \infty$.

Традиционный подход оптимизации непараметрической оценки плотности вероятности $\bar{p}(x)$, например, для одномерной случайной величины осуществляется из условия минимума $\bar{W}(c)$ – оценки среднего квадратического отклонения $\bar{p}(x)$ от $p(x)$.

С увеличением размерности случайной величины x и объёма n статистических данных V реализация процедуры поиска коэффициента размытости c ядерных функций при минимизации $\bar{W}(c)$ требует значительных временных затрат. Появляется задача «обхода» возникающей проблемы. Первые её решения основывались на анализе оптимального коэффициента размытости ядерных функций в непараметрической оценке плотности вероятности при заданном виде $p(x)$ (Silverman B.W., Scott D.W., Sheather S.J.).

В ходе исследований развита методика быстрой оптимизации непараметрических оценок плотности вероятности. Основу методики составляют оценки зависимости нелинейных функционалов плотности вероятности от коэффициентов контрэксцесса компонент случайных величин в формулах оптимальных коэффициентов размытости ядерных функций непараметрических статистик.

Полученные результаты обобщены при синтезе непараметрического решающего правила в двухальтернативной задаче распознавания образов, соответствующего критерию максимального правдоподобия. В этой задаче ядерная оценка уравнения разделяющей поверхности между классами определяется выражением

$$\bar{f}_{12}(x) = \bar{p}_2(x) - \bar{p}_1(x),$$

которое является линейным функционалом от непараметрических оценок плотностей вероятностей $\bar{p}_v(x)$ в классах Ω_v , $v = 1, 2$. При синтезе непараметрических оценок $\bar{p}_v(x)$ используется исходная обучающая выборка $V = (x^i, \mu(i), i = \overline{1, n})$, где $\mu(i)$ – указания «учителя» о принадлежности ситуации x^i к одному из двух классов.

Полученные результаты аналитических и вычислительных исследований быстрого выбора коэффициента размытости ядерной оценки одномерной плотности вероятности и непараметрического алгоритма распознавания образов обобщены на многомерные случайные величины $x \in (x_v, v = \overline{1, k})$.

Разработанные алгоритмические и программные средства быстрой оптимизации непараметрических оценок плотности вероятности дополняют функциональные возможности программы NAC v.2.0 (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619023 от 18.05.2022). В отчётный период она использована при автоматической классификации спектральных данных дистанционного зондирования лесных массивов, повреждённых уссурийским полиграфом.

Территория исследования определялась юго-западной частью Дзержинского района Красноярского края. На этой территории преобладают пихтовые, кедровые и еловые древостои, встречаются берёзы и осины. Высота территории варьируется в диапазоне от 370 до 610 метров над уровнем моря.

Исходная информация формировалась по данным дистанционного зондирования аппаратом Европейского космического агентства Sentinel-2A за 23 мая 2022 года. Снимки получены с геопортала Earth Explorer, из которых вырезан тестовой участок в 6 тысяч гектаров (рисунок 3.9).

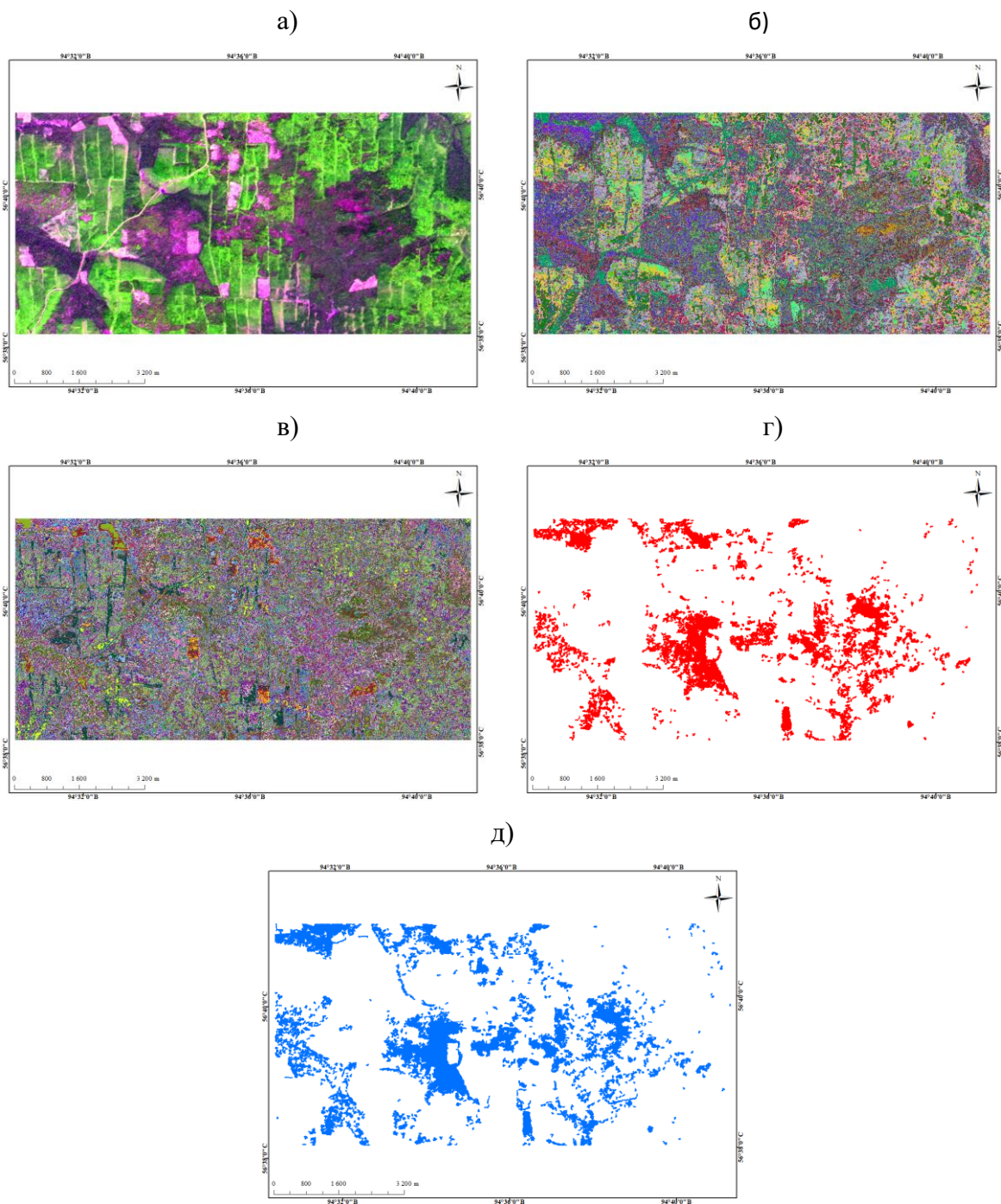


Рисунок 3.9 – Сопоставление исходного снимка (а) с результатами автоматической классификации непараметрическим алгоритмом при быстрой процедуре его оптимизации (б) и методом ISODATA (в). Приведено соответствующее им отображения лесных территорий (г), (д), повреждённых полиграфом уссурийским

Применение модифицированной программы NAC v.2.0 позволило в исходном изображении обнаружить 177 компактных групп точек (рисунок 3.9.б). Обнаруженные классы соответствуют лесным массивам с различной степенью поражения уссурийским

полиграфом, усохшим и лиственным древостоям, травяно-кустарниковым сообществам и вырубкам различной давности.

Полученные классы позволили рассчитать площадь повреждений полиграфом уссурийским лесных насаждений исследуемой территории. Модифицированная программа NAC v.2.0 дала площадь повреждений 635,0 га, а алгоритм ISODATA – 795,4 га. Пространственное распределение обнаруженных классов различается на участках, характеризующих вырубки, переход от повреждённых лесных насаждений к здоровым и открытые почвы.

Предлагаемый непараметрический алгоритм автоматической классификации при использовании быстрой процедуры оптимизации достаточно полно выделяет зоны повреждённых древостоев, разделяет темнохвойные и лиственные породы, определяет участки с открытой почвой, территории вырубок различной давности. Алгоритм ISODATA в этих условиях показал схожий результат классификации. Отличие наблюдаются на участках вырубок и повреждённых лесных насаждений, что вызывает разницу в их итоговой расчётной площади.

3.6. Алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений

Объектом исследования является информационная поддержка управления природно-техногенной безопасностью территорий. Научные работы в данной области концентрируются на довольно узком сегменте ситуаций большого масштаба и малой вероятности, для которых доступны данные мониторинга, модель прогноза или модель распространения опасных факторов. Обоснование необходимости и эффекта превентивных мероприятий снижения рисков чрезвычайных ситуаций, проявлений опасностей и угроз может быть реализовано на основе интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий.

Разработка алгоритмов формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий имеет междисциплинарный характер. Предметная сторона исследований – логическое продолжение работ по обеспечению безопасности сложных технических систем и объектов. Методологический аспект заключается в интеграции гетерогенных данных многолетних наблюдений за состоянием окружающей среды, функционировании объектов техносферы, каталогов опасных события с экспертными оценками.

Разработан «сквозной» метод оценки территориальных рисков, включающий обработку данных мониторинга, представление результатов для разных уровней управления, формирование рекомендаций по проведению превентивных мероприятий. В отличие от известных методов оценивания, имеющих фрагментарный характер, предлагаемый подход предусматривает замкнутый цикл выработки, реализации и контроля эффективности решений. Использование гетерогенных информационных ресурсов с возможностью их обработки разными технологиями реализована за счёт оригинальной организации консолидации и хранения данных. Практическая апробация метода проведена для базовых рисков территорий Сибири.

Схема формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий показана на рисунке 3.10.

На первом этапе количество и состав источников данных многолетних наблюдений определяется непосредственно аналитиком и лицами, принимающими решения. Включение озёр данных (2) позволяет смягчить требования к исходным данным и исследовать их структуру после регламентированной актуализации. Для этого используются средства работы с метаинформацией (3), например, Amundsen.

Средства формализации (4), (5) представляют собой расширенный вариант ETL с набором процедур контроля и обогащения. Реализовано несколько независимых аналитических сервисов (6), ориентированных на решение задач управления конкретного вида. Разведочный анализ с использованием OLAP применяется для предварительной оценки факторов рисков и поиска аномалий. Причинно-следственный анализ необходим для детального исследования нелинейности вкладов в величины базовых территориальных рисков. Кластерный анализ позволяет группировать территории по многомерным метрикам. Например, муниципалитеты Красноярского края разделены по категориям: городские агломерации, районы с развитым сельским хозяйством и лесоперерабатывающей промышленностью, ресурсодобывающие, отдалённые и Арктические территории. Регрессионный анализ позволяет оценить тренды для среднесрочного прогноза рисков и скорректировать модели управления. На примере прогноза количества техногенных и бытовых пожаров апробировано применение методов машинного обучения для сферы управления безопасностью территорий.

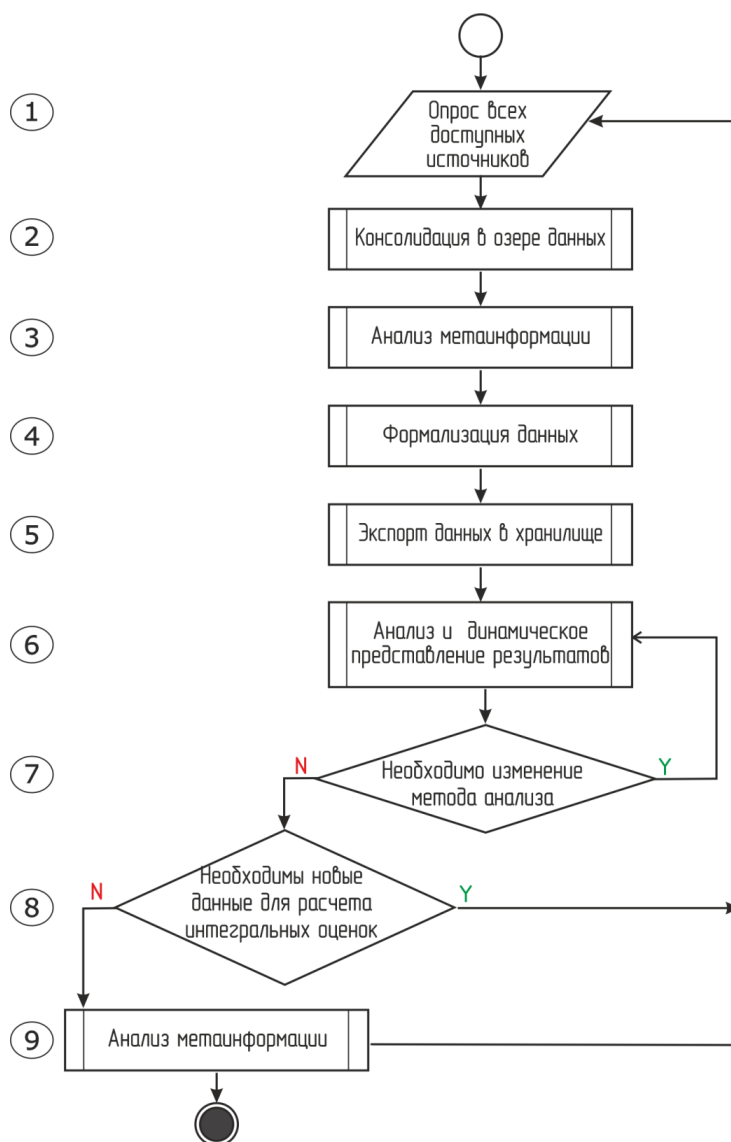


Рисунок 3.10 – Формирование интегрированных оценок

Процесс формирования информационной базы реализован в несколько этапов. По мере подключения новых источников информации разработаны и верифицированы аналитические модели. Часть из них использованы для контроля качества сырых данных. Аналитические модели поддержки принятия решений разработаны с привлечением экспертов. Обосновано применение графовых моделей для исследования факторов, влияющих на состояние безопасности. С их помощью определены источники данных мониторинга, приемлемый регламент их обновления; детализированы факторы до показателей и отдельных полей в сущностях хранилища данных; определены виды управленческих воздействий с ожидаемыми эффектами; корректность применения

экспертными оценкам. Например, факторам, влияющими на вероятность возникновения ландшафтных пожаров, являются урбанизированность территорий, вид деятельности в лесу, информированность и обученность населения мерам пожарной безопасности. Результаты пространственного анализа, социологических опросов сильно зависят от выбранного метода исследования. Однако комплексное их использование в информационно-аналитических платформах позволяет определить чувствительность интегральных оценок к этим параметрам. Причём отложенный эффект в оценках воздействия мероприятий на уровень риска на конкретной территории можно обойти, используя поиск аналогов в больших данных.

На основе развития и адаптации метода интегрального оценивания природно-техногенной безопасности территорий предложена концепция и метод рейтингового оценивания качества жизни муниципальных образований в разрезе реализации национальных проектов.

Разработано концептуальное обоснование инструментария для оценки достижения целевых показателей качества жизни в муниципальных образованиях, основанное на исследовании структурных характеристик территорий и особенностей реализации мероприятий национальных и региональных проектов. Основное назначение разрабатываемого инструментария – мониторинг влияния результатов реализации национальных проектов на повышение качества жизни населения и повышение эффективности управления в муниципальных образованиях региона за счет выявления проблемных и перспективных направлений экономики и социальной сферы территорий.

Разработана иерархическая система показателей для измерения качества жизни в муниципальных образованиях региона в разрезе реализации национальных проектов. Иерархия содержит два типа показателей: базовые – нижний уровень иерархии и комплексные – промежуточный и верхний уровни иерархии. Базовые показатели представляют собой показатели социально-экономического развития территорий, характеризующие качество жизни и ориентированные на достижение целевых показателей национальных проектов. Комплексные показатели – уровни агрегирования базовых показателей, соответствующие важнейшим направлениям развития экономики и социальной сферы в муниципальных образованиях. Разработанная иерархическая система содержит более 70 базовых показателей.

Разработан метод формирования рейтинговой оценки качества жизни муниципальных образований, обеспечивающий формирование комплексного показателя на основе иерархии

оценок показателей социально-экономического развития территорий с учетом их взаимного влияния и возможности качественной интерпретации. Формирование оценки качества жизни на уровне муниципальных образований выполняется на основе нормативной модели и содержит основные этапы:

- формирование оценок базовых показателей – расчет оценок базовых показателей социально-экономического развития территорий;
- формирование оценок комплексных показателей – расчет оценок комплексных показателей национальных проектов на основе оценок базовых показателей;
- интерпретация оценок показателей – преобразование количественных значений оценок в эквивалентные качественные значения.

Разработан метод построения территориально-ориентированной нормативной модели, обеспечивающий формирование критериев оценивания, принципов обобщения оценок и шкал их интерпретации с учетом социально-экономических и физико-географических особенностей территорий, который содержит следующие этапы:

- формирование иерархической системы базовых и комплексных показателей, соответствующих уровням агрегирования базовых показателей;
- определение коэффициентов значимости показателей, характеризующих вклад показателей нижнего уровня иерархии в показатели верхнего уровня;
- определение нормативных значений показателей, отражающих характерное для территории состояние;
- определение коэффициентов чувствительности оценок, позволяющих регулировать скорость изменения оценок при отклонении фактических значений от заданного норматива;
- формирование оценочной шкалы для отображения количественных значений оценок в их качественные выражения: «Улучшенный», «Хороший», «Приемлемый», «Удовлетворительный», «Пониженный», «Низкий», «Критический».

Выполнена апробация предложенных методов для формирования рейтинговых оценок качества жизни муниципальных образований Красноярского края. На рисунке 3.11 представлены результаты оценивания качества жизни по данным за 2021 год. Результаты оценки показали, что большинство районов Красноярского края демонстрируют удовлетворительный и пониженный уровень качества жизни, 18 и 27 районов края соответственно. Наихудший уровень качества жизни зафиксирован в Северо-Енисейском районе.

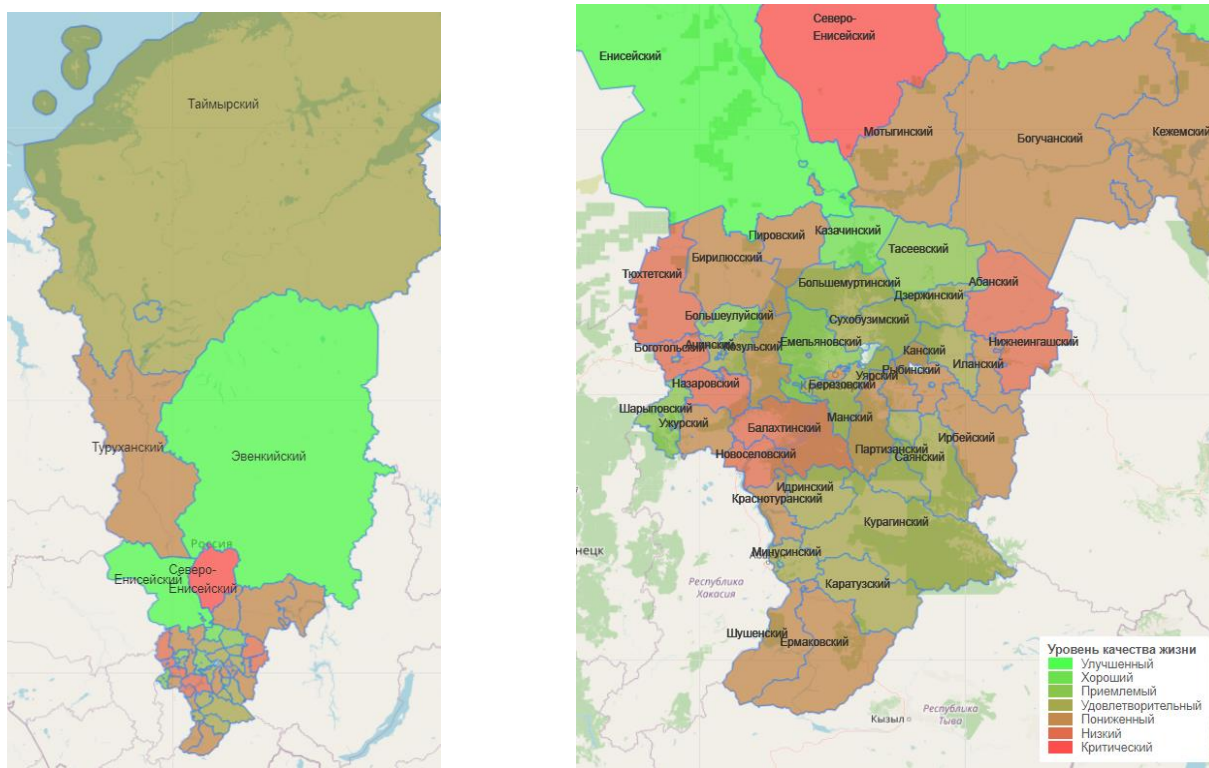


Рисунок 3.11 – Результаты оценивания качества жизни муниципальных образований Красноярского края по данным за 2021 год

Предложенный метод позволяет сформировать иерархию оценок, характеризующих уровень качества жизни, получать обобщенные оценки развития территории и в случае необходимости детализировать их до конкретных показателей, что дает возможность определять первопричины текущей ситуации и формировать целевые управляющие воздействия. Построенная иерархическая система показателей качества жизни территорий позволяет обеспечить мониторинг реализации национальных проектов и их влияние на качество жизни каждой территории.

3.7. Метамоделю и алгоритмы детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий

В рамках развития метода интегрального оценивания состояния территорий разработана метамоделю детализации интегральных оценок для определения причин состояния природно-техногенной безопасности территорий. Она является основой информационной поддержки по планированию мероприятий долгосрочного развития территорий и формированию стратегий снижения рисков чрезвычайных ситуаций (ЧС). Выполнен анализ связей «причина отклонения от нормы – рекомендуемые превентивные

мероприятия». Это позволяет завершить цикл получения и обработки данных комплексного мониторинга до формирования управляющих воздействий с учётом особенностей территорий.

Комплексный показатель природно-техногенной безопасности территорий формируется путём построения иерархического представления оценок показателей, характеризующих природные и техногенные факторы риска возникновения ЧС. Расчёт оценок выполняется на основе территориально-ориентированной нормативной модели, которая определяет «стандартный» уровень безопасности с учетом индивидуальных особенностей территорий. Нормативная модель включает иерархическую систему показателей, коэффициенты значимости показателей, функции агрегирования оценок, нормативные значения показателей и коэффициенты чувствительности оценок.

Определение причин текущего состояния природно-техногенной безопасности территорий основано на анализе сложившейся ситуации по результатам интегрального оценивания. Поскольку возникновение проблемных ситуаций отражается в оценках комплексных показателей, метамодель определения причин состояния безопасности территорий строится на основе иерархии оценок. Метамодель представляет собой когнитивную карту, позволяющую анализировать сложившуюся ситуацию с выделением конкретных проблем и причин. Под «ситуацией» понимается сочетание условий и обстоятельств, создающих определённую обстановку, в которой возникла «проблема» – несоответствие желаемого и фактического уровней достижения целей, возникшее в результате определенных «причин». Для определенного сочетания проблем и причин формируются управляющие рекомендации, направленные на достижение желаемого уровня. Особенность метамодели состоит в применении иерархических зависимостей между причинами возникновения проблемных ситуаций.

В когнитивной модели используется два типа причинно-следственных связей: положительные (+) и отрицательные (–), которые соответствуют состоянию показателей: «норма» и «не норма».

В основу алгоритма детализации интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий положен «дедуктивный» принцип реализации стратегического управления безопасностью территорий. На начальном уровне определяются территориальные приоритеты на основе расчета оценок интегральных показателей и составления картограмм снижения рисков. Формирование рекомендаций по планированию управляющих мероприятий выполняется с привлечением специалистов муниципальных

образований. Затем осуществляется распределение опасностей по видам ситуаций. Такая детализация позволяет определить зону ответственности ведомств и отраслей. Далее анализируются факторы, являющиеся причинами опасных событий или возникновения ЧС. На основе выявленных факторов риска проводится обоснование объемов планируемых мер и управляющих мероприятий.

Работа алгоритма заключается в определении причин возникновения проблемы путем проверки значений интегральных оценок на соответствие «норме» и формировании рекомендаций по нивелированию негативных факторов. Сначала проверяется соответствие значений интегральных оценок для показателей «проблема». При несоответствии показателей «проблема» запускается «маршрут» движения по уровням иерархии показателей «причина» с проверкой значений их оценок на каждом уровне. После проверки всех показателей «причина», выполняется формирование управляющих рекомендаций. Накопленные данные мониторинга опасных событий и паспорта безопасности территорий позволяют обосновать применение рекомендаций для конкретного объекта, оценить необходимые ресурсы и ожидаемый эффект.

Предложенные метамодель и алгоритм на основе иерархии интегральных оценок позволяют проанализировать текущее состояние природно-техногенной безопасности территорий, выявить причины возникновения проблемных ситуаций и сформировать обоснованные управляющие рекомендации. С использованием предложенной модели были сформированы рекомендации по корректировке региональной программы обеспечения пожарной безопасности и мероприятий подготовки к предстоящему лесопожарному сезону.

4. Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ

4.1. Методы, алгоритмы и программное обеспечение для реализации стандартизированного обмена данными между гетерогенными системами

Предложен технологический подход к организации обмена данными между гетерогенными системами. Он заключается в применении иерархической унифицированной модели, в терминах которой можно представить любую структуру данных и выполнять преобразования унифицированных структур. Предложены формальная и концептуальная модели унифицированного обмена данными, определяющие основные составляющие и логику процесса. Предложена архитектура программных средств, обеспечивающая организацию унифицированного обмена данными.

Обмен данными между системами характеризуется рядом параметров: способ хранения данных, параметры доступа к данным, канал связи и др. Процесс унифицированного обмена данными заключается в преобразовании информационного объекта «отправителя» в информационный объект «получателя» на основе формирования промежуточного унифицированного представления структур данных.

В соответствии с предложенной моделью разработана архитектура программных средств, обеспечивающая организацию унифицированного обмена данными. На рисунке 4.1 представлена диаграмма, описывающая основные модули и их взаимодействие. На диаграмме «отправитель» и «получатель» данных представлены UML-элементами типа «актор» – «*Data supplier*» и «*Data recipient*» соответственно. Процесс унифицированного обмена данными между гетерогенными системами условно делится на два этапа: подготовка и применение. Этап подготовки (верхняя часть диаграммы) включает процессы описания структуры данных и взаимного соответствия элементов структур данных.

Этап применения (нижняя часть диаграммы) направлен непосредственно на преобразование данных. Формирование объекта информационного обмена «получателя» выполняется на стороне «получателя». Представленная архитектура программных средств обеспечивает унифицированный обмен данными между гетерогенными системами с учетом вариативности форматов хранения данных и условий функционирования взаимодействующих систем.

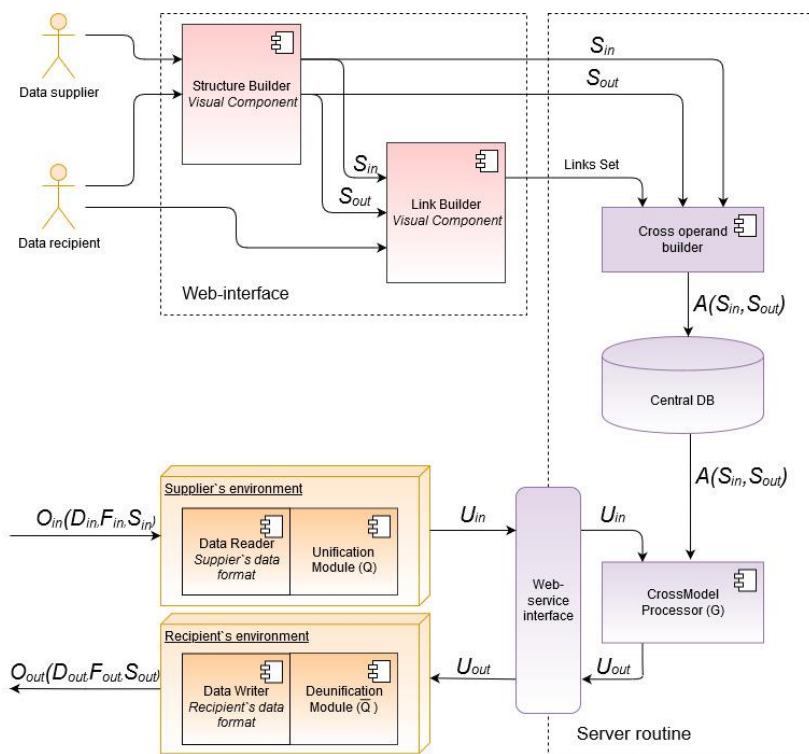


Рисунок 4.1 – Архитектура программных средств организации унифицированного обмена данными

4.2. Методические и программные средства поддержки оперативной аналитической обработки данных научных исследований в рамках модельно-ориентированных систем сбора данных

В условиях обилия информационных потоков, возрастающих вычислительных мощностей и повышения требований к обоснованности принимаемых решений, приобретают актуальность отчетные формы, позволяющие пользователям оперативно получать аналитические данные, не беспокоясь о возможном изменении программного кода и манипуляциях с данными. Это особенно необходимо в критически важных областях деятельности. Несмотря на повсеместное внедрение оперативных информационных панелей и дашбордов, автоматически обновляемых в момент поступления новых данных, важной частью тактического и стратегического управления являются регламентированные срочные аналитические отчетные формы.

Современное решение данной проблемы – это *low code/no code* системы (LC/NC), которые позволяют вносить изменения в клиентское приложение (системы) совсем без программирования или с незначительным объемом программного кода. Суть современной концепции заключается в тезисе: «если участие человека необходимо, то пусть это будет

аналитик, а не программист». Технологической основой разработки «без программирования» является модельно-ориентированный подход, который позволяет создавать системы за счет отделения бизнес-логики из программного кода в метаданные и формирования алгоритмов построения прикладных систем под управлением этих метаданных. Структура метаданных задает потенциальную функциональность системы, а данные, хранящиеся в этой структуре, определяют тематику системы, ее объем и информационное наполнение.

С целью создания «*no-code*» платформы для создания систем сбора данных на основе модельно-ориентированного подхода ранее предложена авторская реализация классического процесса *Model-driven development (MDD)*, в которой объединены процессы формирования управляющей и прикладной моделей. Объединенный процесс предполагает, что управляющая модель системы формируется пользователем с помощью интерфейса самой системы. При этом автоматически изменяется структура базы данных и сохраняется формальное описание моделей. Процесс автоматической трансформации прикладных моделей добавлен в пользовательский интерфейс модельно-ориентированной системы, что позволяет выполнять динамическую интерпретацию метамодели. Благодаря этому, интерфейс системы в части ввода данных перестраивается автоматически, в соответствии с изменениями, внесенными пользователем в управляющую модель. В основе авторской реализации, как и в основе классического подхода, лежит концептуальная мета-метамодель, определяющая основные классы сущностей и связи между ними для построения управляющих моделей.

Для решения задачи разработки типовых модельно-ориентированных систем консолидации данных предложена мета-метамодель сбора данных, которая является спецификацией для создания управляющих и прикладных моделей проектируемых систем, обеспечивает динамическую интерпретацию метамодели и генерацию форм сбора данных (рисунок 4.2). Мета-метамодель содержит три класса объектов: «*Объект*», «*Атрибут*» и «*Группа*». Объекты класса «*Атрибут*» описываются свойствами: наименование, тип, и флаг темпоральности атрибута. В рамках мета-метамодели задан ряд отношений, определяющих связи между экземплярами классов модели.

Реализованный в платформе модельно-ориентированный подход применен к генерации аналитических отчетов. Информация о структуре и наполнении отчетов представляется как метаданные, а в программный код, отвечающий за формирование отчетов на основе метамодели, включается унифицированный модуль генерации отчета.

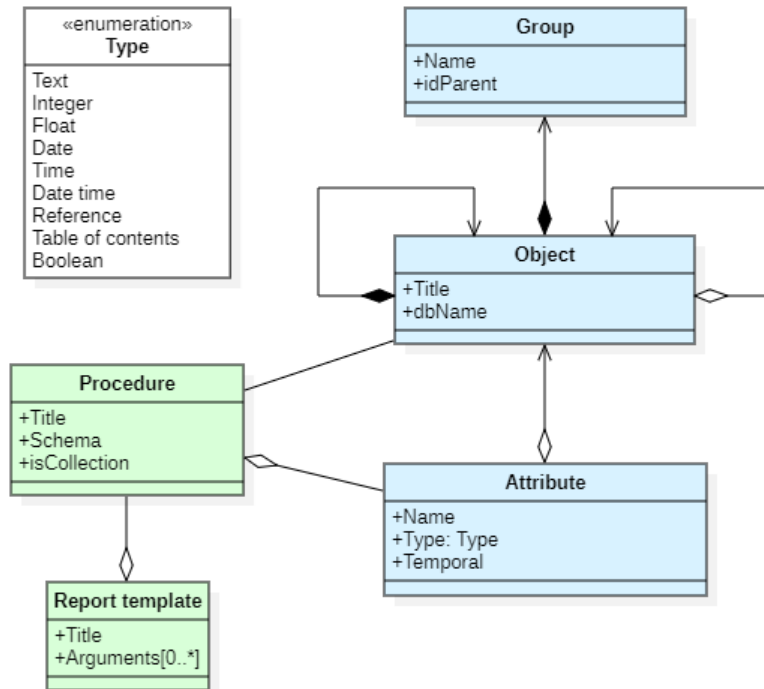


Рисунок 4.2 – Модифицированная мета-мета-модель модельно-ориентированной платформы (новые классы мета-модели окрашены зеленым)

Модификация заключается во внесении в структуру метаданных сущностей, без которых процесс генерации отчетов невозможен. Отчет принято разделять на статическую и динамическую составляющие. Статическая часть – шаблон отчета – определяет индивидуальную структуру отчета в соответствии с назначением документа: заголовок и параметры генерации, блоки, составляющие отчет, их наполнение. Динамическая часть формируется в момент генерации отчета по заданному шаблону. В мета-мета-модель введены такие сущности, как «шаблон» и «процедура», отвечающие за статическую и динамическую составляющие отчета соответственно. Процедуры переносят сбор и группировку данных из программного кода в базу данных.

Апробация выполнена на примере оперативной сводки, формируемой Центром обеспечения реализации полномочий в областях гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций Красноярского края (Центра ГО и ЧС). В зависимости от сезона в аналитическом отчете меняется перечень контролируемых обстановок: подтопления и лесные пожары характерны для весенне-летнего периода, а зимой необходим мониторинг ледовых переправ. С окончанием отчетного года в некоторые разделы добавляются новые столбцы для сопоставления показателей в предшествующие отчетные периоды. Применение новых

инструментов не требует непосредственного участия человека для адаптации и настройки новой версии аналитического отчета.

4.3. Программное обеспечение трансформации данных различных форматов путем сопоставления структурных элементов и выполнения преобразований по установленным взаимным отношениям

Большинство существующих бизнес-информационных систем реализует традиционный подход к аналитической обработке данных, который заключается в извлечении, трансформации и загрузке необходимых данных в централизованное хранилище и построение витрин данных, которые соответствуют одной аналитической задаче и, как правило, создаются специалистами по анализу данных. Конечный пользователь работает с уже подготовленным и предобработанным фрагментом информации и может строить произвольные аналитические запросы и определять способ визуализации результатов анализа. Инструменты бизнес-аналитики применяются для детального изучения данных, планирования и прогнозирования, выявления изменений, обнаружения закономерностей и формирования аналитической отчетности. Однако проблема заключается в том, что пользователю все еще приходится разбираться в структуре и свойствах информации, то есть обладать дополнительной квалификацией и навыками обработки данных для того, чтобы для своих данных построить инфографическую модель.

Предлагается следующая последовательность построения многомерной модели.

1. Поиск показателей – выбор числовых атрибутов с интервальным и нормативным типом шкал.
2. Из числа номинальных и порядковых атрибутов выбрать те, которые могут быть категориями для анализа – измерениями.
3. Номинальные и порядковые атрибуты, число уникальных значений у которых близко к числу строк во фрейме, относятся к описательным атрибутам.
4. Определить ключ исследуемого реляционного набора данных путем поиска функциональной зависимости с минимальным детерминантом, которая содержит все атрибуты фрейма. Детерминант функциональной зависимости и становится ключом.
5. Выстроить иерархию среди выявленных измерений путем выявления между ними функциональных зависимостей, начиная с ключевых атрибутов.

Построенная таким образом структура задает многомерную модель для реляционного набора данных. Формально многомерная модель данных можно представить в графическом

виде как «модель факт-измерение». На рисунке 4.3 представлен пример графического представления многомерной модели для задачи анализа подтоплений в Красноярском крае.



Рисунок 4.3 – Графическое представление многомерной модели для задачи анализа подтоплений в Красноярском крае

Информация о количестве подтопленных объектов – это то, на чем концентрируется многомерная модель (факт). Атрибуты, которые могут играть роль показателей, представлены оранжевым цветом. Из оставшихся атрибутов, которые имеют номинальный и порядковый тип шкал, выбраны измерения для анализа, отмеченные черным цветом.

Библиотеки на языке Python, совместимые с объектами pandas, предоставляют широкий спектр возможностей по отображению наборов данных.

В зависимости от аналитических свойств исходных данных можно формально задать процесс трансформации реляционного набора данных в многомерную модель, а затем в инфограмму.

На вход алгоритма подается множество измерений и множество показателей. Для начала проверяется количество измерений. На основе всех входных данных алгоритм предлагает один из типов диаграмм и автоматически настраивает ее параметры. Работа алгоритма заканчивается определением заголовка инфографической модели, сохранением выявленных соответствий между метамоделью датасета и свойствами выбранного способа визуализации. На основе исследования визуальных компонентов отображения данных одной из библиотек интерфейсных элементов удалось разработать общий алгоритм нативной

поддержки пользователя при выборе диаграммы, наилучшим образом отражающей содержимое данных.

Разработанное алгоритмическое и программное обеспечение применяется к построению аналитических моделей и для графической визуализации результатов аналитической обработки данных различных форматов.

4.4. Прототип цифровой платформы для поддержки полного цикла обработки и интеллектуального анализа данных

Разработан прототип цифровой аналитической платформы для формирования и оценивания комплексных показателей социально-экономического развития в задачах территориального управления. Платформа предназначена для решения задач комплексного анализа состояния территорий на основе методов интегрального оценивания. К числу таких задач относятся: оценивание качества жизни населения в разрезе реализации национальных проектов; оценивание природно-техногенной безопасности территорий; анализ социального благополучия территорий; анализ показателей устойчивого развития территорий. Платформа позволяет выполнять полный цикл обработки и интеллектуального анализа данных – от формирования проблемно-ориентированной иерархической системы показателей до интегрального оценивания комплексных показателей, их интерпретации и визуализации.

На рисунке 4.4 схематически представлена функциональная архитектура цифровой аналитической платформы. Платформа включает разнообразные аналитические инструменты и средства создания проблемно-ориентированных информационных ресурсов.

Инструменты построения иерархии показателей позволяют в интерактивном визуальном режиме формировать дерево показателей, на нижнем уровне которого определяются базовые статистические показатели. Затем определяются комплексные показатели: каждый комплексный показатель обобщает несколько показателей предыдущего уровня иерархии. На верхнем уровне иерархии располагается целевой интегральный показатель: в соответствии с решаемой задачей: «Качество жизни», «Природно-техногенная безопасность», «Социальное благополучие» и др. Именно оценивание и сравнительный анализ значений интегрального показателя в разрезе территорий (муниципальных образований, социально-экономических кластеров, или регионов) является целью решаемой задачи. Но и другие комплексные показатели, как правило, представляют интерес для анализа. Например, оценка качества жизни в муниципальных образованиях региона включает оценки комплексных показателей «Человеческий капитал», «Комфортная среда»,

«Экономический рост». Построение иерархической системы показателей – начальный этап и необходимое условие для применения метода интегрального оценивания в конкретной задаче социально-экономического анализа состояния территорий.



Рисунок 4.4 – Архитектура аналитической цифровой платформы

Модуль, реализующий метод интегрального оценивания, содержит инструменты построения нормативной модели, расчета интегральных оценок комплексных показателей и интерпретации их значений на основе лингвистического шкалирования. Нормативная модель интегрального показателя территорий представляет собой территориально-ориентированную модель, обеспечивающую корректное измерение фактического уровня комплексного показателя относительно «стандарта», содержащего набор характеристик, учитывающих индивидуальные особенности каждой территории. Нормативная модель содержит коэффициенты значимости показателей, интервал нормативных значений показателей и коэффициенты чувствительности оценок. Нормативная модель разрабатывается на основе спецификаций территорий и условий их социально-экономического развития. Интегральное оценивание территорий заключается в пошаговом расчете оценки комплексного показателя –

«интегральной оценки». Она формируется путем агрегирования оценок вверх по дереву иерархии показателей социально-экономического развития территорий в соответствии с нормативной моделью.

В состав платформы включены инструменты расширенной аналитики, характерные для современных бизнес-информационных платформ: OLAP-моделирование, кластеризация, формирование решений, трассировка выводов, методы интеллектуального анализа. OLAP-моделирование реализовано как удобный инструмент визуального анализа многомерных данных в виде интерактивных перекрестных таблиц, которые применяются для представления иерархии показателей в нормативной модели, а также для сравнительного анализа оценок комплексных показателей. Инструменты нечеткой кластеризации применяются для качественной интерпретации результатов интегрального оценивания. Инструменты формирования решений и трассировки выводов находятся в стадии разработки: на данный момент они позволяют выполнять анализ и детализацию показателей для выявления причин получения конкретных значений оценок комплексных показателей, а также по результатам расчета оценок показателей формировать управляющие рекомендации на основе когнитивной карты ситуации. Инструменты, реализующие интеллектуальные методы, представляют значительный интерес для решения задач сопутствующего анализа и прогнозирования. На момент разработки прототипа платформы для их применения используется отдельное программное обеспечение, но в дальнейшем планируется включить эти инструменты в состав платформы.

Инструменты интерактивного визуального анализа обеспечивают динамическое картографирование и динамическое инфографическое представление результатов интегрального оценивания и результатов применения методов расширенной аналитики. Они позволяют строить различные виды картограмм, диаграмм, графиков и таблиц. К числу инструментов интерактивного визуального анализа можно отнести упомянутые перекрестные таблицы, обеспечивающие OLAP-анализ данных в различных разрезах с различных «точек зрения». Развитие платформы планируется за счет включения в состав инструментов наглядного представления данных в виде тепловых и упругих карт, инфографических моделей, а также средств формирования отчетов и дашбордов.

Важным элементом аналитической платформы являются инструменты формирования проблемно-ориентированных информационных ресурсов, которые позволяют выполнять импорт данных.

целом, и совокупность иерархически подчиненных показателей «причина», характеризующих состояние по основным показателям. Для уровня «проблем» и каждого уровня «причин» формируются общие рекомендации. Для каждой конкретной «причины», соответствующей базовому показателю на нижнем уровне иерархии, формируется индивидуальная рекомендация.

Например, для задачи оценивания качества жизни муниципальных образований, модель формирования решений будет иметь три уровня «причин»: уровень сфер качества жизни, уровень национальных проектов и уровень показателей социально-экономического развития. Региональные проекты содержат мероприятия, направленные на достижение национальных целей на конкретной территории. Индивидуальные рекомендации на уровне отдельных показателей формируются исходя из интервалов нормативных значений этих показателей, определенных в нормативной модели качества жизни территорий. Создание и редактирование нормативной модели реализовано в табличной форме с поддержкой фильтрации, поиска, сортировки, постраничной разбивки больших данных, редактирования и валидации вводимых пользователем значений.

Представление оценок показателей реализовано в виде кросс-таблицы, которая имеет сложную вертикальную и горизонтальную шапку и обеспечивает возможность исследования, сортировки, детализации и агрегации значений в разрезе территорий и показателей (рисунок 4.6).

	Комфортная среда		Человеческий капитал								Человеческий капитал Всего		Экономический рост		Итого
			Демография		Здравоохранение		Культура		Образование						
	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	Оценка	Вес	
Красноярск	0.975	0.35	1.162	0.3	1.116	0.35	1.000	1	1.000	1	1.089	0.35	1.097	0.3	1.052
Курагинский район	1.123	0.3	1.127	0.3	1.309	0.4	1.792	1	1.000	1	1.281	0.35	1.108	0.35	1.173
Лесосибирск	-0.260	0.35	1.040	0.3	0.981	0.35	1.000	1	1.000	1	1.006	0.35	1.046	0.3	0.575
Манский район	1.174	0.3	1.009	0.25	0.921	0.4	1.000	1	1.000	1	0.971	0.4	0.978	0.3	1.034
Минусинск	1.015	0.35	1.106	0.3	1.084	0.35	1.000	1	0.764	1	1.014	0.35	1.089	0.3	1.037
Минусинский район	1.086	0.3	0.797	0.25	1.052	0.4	1.000	1	1.000	1	0.970	0.4	0.921	0.3	0.990
Мотыгинский район	0.986	0.3	0.977	0.3	0.872	0.4	1.051	1	1.000	1	0.949	0.35	0.942	0.35	0.958
Назарово	0.882	0.35	1.524	0.3	1.149	0.35	1.000	1	1.000	1	1.210	0.35	1.051	0.3	1.047
Назаровский район	1.017	0.3	0.713	0.25	1.196	0.4	1.000	1	1.000	1	1.007	0.4	0.773	0.3	0.940
Нижнеингашский район	0.944	0.3	1.007	0.25	0.977	0.4	1.517	1	1.000	1	1.070	0.4	1.397	0.3	1.130
Новоселовский район	0.975	0.3	1.011	0.25	1.043	0.4	1.000	1	1.000	1	1.020	0.4	1.258	0.3	1.078
Норильск	1.059	0.35	1.639	0.3	1.141	0.35	1.000	1	1.000	1	1.241	0.35	1.087	0.3	1.131
Партизанский район	-3.156	0.3	1.210	0.25	0.667	0.4	1.000	1	1.000	1	0.919	0.4	0.993	0.3	-0.281
Пировский район	0.984	0.3	1.039	0.25	1.073	0.4	1.028	1	0.465	1	0.936	0.4	1.081	0.3	0.994

Рисунок 4.6 – Представление оценок показателей качества жизни муниципальных образований

Иерархия показателей определяет суть формируемых решений. Например, результаты оценивания качества жизни муниципальных образований Красноярского края за 2021 год показали, что наихудший уровень качества жизни зафиксирован в Северо-Енисейском районе, где интегральная оценка качества жизни 0.36 интерпретируется как «критический уровень». Согласно иерархии комплексных показателей, «проблема» связана со следующими причинами: «Человеческий капитал», «Комфортная среда» и «Экономический рост». В свою очередь для показателя «Человеческий капитал» определены «причины»: «Здравоохранение» и «Демография». Спускаясь ниже на уровень базовых показателей, для показателя «Здравоохранение» определены «причины»: «Обеспеченность врачами, на 10 тыс. человек населения», «Доля населения, охваченного профилактическими осмотрами» и «Число заболеваний, зарегистрированных у больных с впервые в жизни установленным диагнозом, на 1 тыс. человек населения». В этом случае примерами формулировок индивидуальных управляющих рекомендаций с учетом разницы фактических и нормативных значений показателей могут быть следующие: «Следует увеличить обеспеченность врачами не менее 6.85 чел. на 10 тыс. населения», «Следует обеспечить увеличение доли населения не менее 1.58%, охваченного профилактическими осмотрами» и «Следует обеспечить снижение числа заболеваний, зарегистрированных у больных с впервые в жизни установленным диагнозом, не менее 35.19 ед. на 1 тыс. человек населения». Общая рекомендация для уровня показателей «Здравоохранения», сформированная на основе паспортов региональных проектов для Красноярского края, может быть следующей: «Следует обеспечить увеличение укомплектованности фельдшерских пунктов, повысить обеспеченность населения врачами, оказывающими первичную медико-санитарную помощь, повысить обеспеченность медицинскими работниками, оказывающими скорую медицинскую помощь, повысить обеспеченность населения врачами, оказывающими специализированную медицинскую помощь, увеличить число специалистов, участвующих в системе непрерывного образования медицинских работников, в том числе с использованием дистанционных образовательных технологий, обеспечить цифровизацию здравоохранения и доступность гражданам цифровых сервисов, в том числе телемедицинских технологий, электронной записи к врачу, электронных рецептов». Аналогичным образом устанавливаются «причины» и формируются управляющие рекомендации для показателей «Комфортная среда» и «Экономический рост».

Для принятия решений в области природно-техногенной безопасности территорий разработана модель управления, позволяющая определять требования к составу информационных ресурсов, технологиям их разработки в зависимости от уровня принятия

решений и задач управления. Концептуально предметная область описана онтологией (рисунок 4.7).

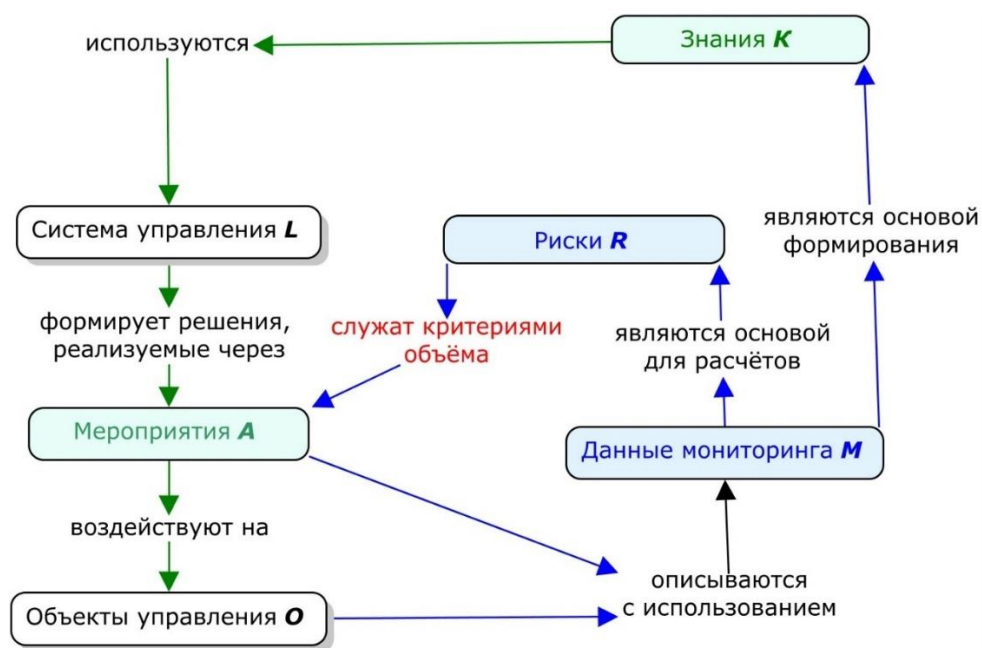


Рисунок 4.7 – Онтология информационной поддержки задач управления безопасностью территорий

Основные элементы модели: система управления L и объекты управления O логически связаны через мероприятия A , реализующие принимаемые решения. Система мониторинга M консолидирует характеристики O и их изменения. В результате формируется информационная база для оценивания территориальных рисков и формирования знаний. Например, вид ситуации и ее локализация позволяют сформировать сценарий реагирования, задействованные ресурсы и ожидаемые результаты. Сбор конструктивных данных – наличие ресурсов и объёмы выполняемых мероприятий, позволяет повысить достоверность информации.

Основной целью спроектированной интеллектуальной системы является поддержка задач стратегического управления. На примере мероприятий целевой программы «Защита от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и обеспечение безопасности населения Красноярского края» проведена апробация модели. Построены модели обратной связи, отражающие результаты профилактических и предупредительных мер, описаны процессы выработки согласованных решений на нескольких уровнях управления, выполнена

формализация этапов формирования решений по предупреждению ЧС и реагированию на масштабные ситуации.

4.6. Архитектура универсальной программной среды обработки данных на основе интеграции инструментов управления и анализа “больших данных”

Для исследования проблем, связанных с безопасностью «больших данных», создаваемых устройствами Интернета вещей (IoT), разработана архитектура имитационной среды, включающая измерительные и коммутационные устройства, а также отказоустойчивый кластер для сбора, интеграции, хранения и анализа данных. Архитектура содержит четыре функциональных уровня. Нижний уровень – сенсорный. Его составляют устройства, интегрированные с датчиками, обеспечивающими сбор информации о состоянии наблюдаемых объектов в реальном масштабе времени. Следующий уровень – транспортный, включает шлюзы и сети передачи данных. На этот уровень поступает большой объем данных, создаваемых устройствами IoT. Далее идет сервисный уровень, обеспечивающий хранение данных, аналитическую обработку и управление бизнес-процессами. Верхний уровень составляют проблемно-ориентированные приложения, решающие задачи конкретной предметной области. Схема предложенной архитектуры приведена на рисунке 4.8. Для имитации сенсорного уровня в технологических помещениях с телекоммуникационным оборудованием размещены измерительные устройства IoT, выполняющие мониторинг показателей температуры, влажности и PM2.5. Транспортный уровень обеспечивается устройствами корпоративной сети Красноярского научного центра СО РАН.

Для организации сервисного уровня хранения и анализа данных спроектирован кластер Kubernetes (K8s) на 10 узлов. Вычислительная структура кластера включает 3 физических сервера и отказоустойчивый кластер виртуальных машин. На двух физических серверах запущены 8 виртуальных машин (система виртуализации Hyper-v). Третий сервер используется как полноценный узел кластера. Дополнительный узел развёрнут на виртуальной машине отдельного кластера Hyper-v. Централизованное управление жизненными циклами контейнеров выполняется на платформе оркестрации Rancher. Для узлов кластера заданы функциональные роли, обеспечивающие распределение рабочих нагрузок: Worker – «Рабочее приложение» ETCD – «Хранилище ключей» и Controllers – «Поддержка управления».

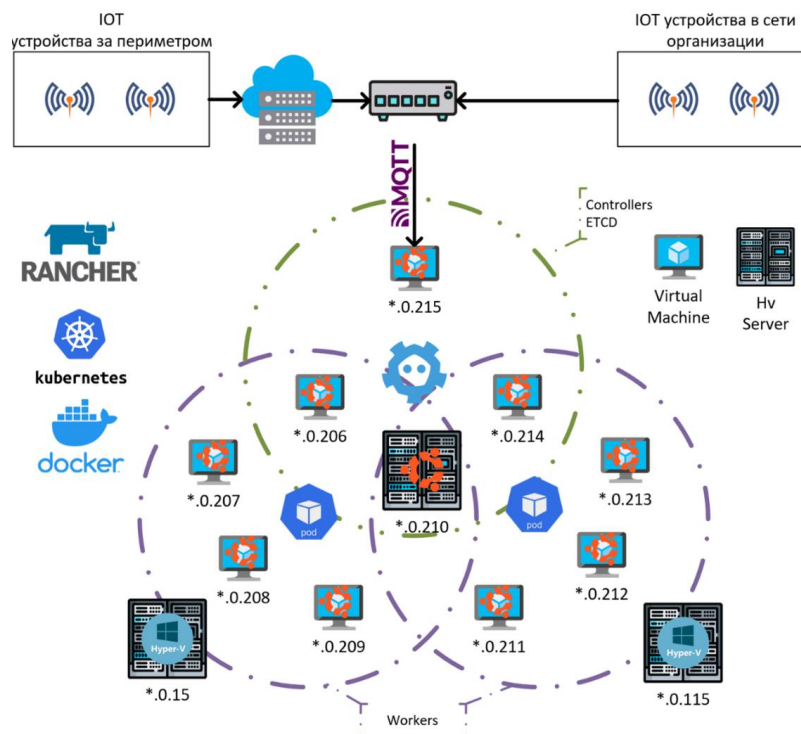


Рисунок 4.8 – Архитектура имитационной среды для сбора и анализа данных IoT

Уровень приложений реализован современными облачными решениями на основе Nadoor. Накопленные данные позволят выполнять анализ сетевых аномалий, отражающих такие угрозы как перехват данных и управляющих сообщений, подмена информации, перегрузка оборудования ложными пакетами, применяя для этого инструменты анализа «больших данных».

4.7. Безопасность облачной инфраструктуры Интернета вещей (IoT)

В отчётном периоде проводились исследования в области безопасности облачных вычислений для модели обслуживания SaaS (Software-as-a-Service) на основе телекоммуникационной инфраструктуры ФИЦ КНЦ СО РАН и реализованного технологического стенда Интернета вещей (IoT). В рамках исследований были налажены сбор и обработка данных взаимодействия различных сервисов, предложены методы анализа и выявления рисков киберугроз.

В состав сетевой инфраструктуры Интернета вещей входят устройства сенсорного уровня, маршрутизаторы трафика из внешней сети, узлы кластера с контейнерами приложений, брокеры данных, базы данных, средства анализа и визуализации. Инфраструктура основана на инструментах, входящих в международную ассоциацию

нативных облачных вычислений Cloud Nativ Computing Foundation (CNCF), что обеспечивает совместимость разработанных методов с другими облачными сервисами. Архитектура IoT-сети ФИЦ КНЦ СО РАН приведена на рисунке 4.8.

Сеть построена по схеме информационного взаимодействия «Издатель-Брокер-Подписчик». Издатели представлены измерительными устройствами CL-210-E (производства ICP DAS), выполняющими мониторинг показателей температуры, влажности, точки росы и концентрации мелкодисперсной пыли (PM2.5). Для реализации функций Брокеров развёрнут кластер Kubernetes (K8s) на 10 узлов, включающий несколько физических серверов и виртуальных машин с системой виртуализации Hyper-V. Централизованное управление жизненными циклами контейнеров выполняется на платформе Rancher. Подписчиками выступает программное обеспечение системы мониторинга безопасности.

Исследование схемы сбора данных IoT-сети показало, что взаимодействие через сетевые инфраструктуры пространственно-распределённых узлов IoT на основе модели облачных вычислений может налагать существенные нагрузки на сети и подписчиков – потребителей информации. Для обеспечения безопасной работы облачных сервисов и снижения интенсивности сетевого трафика разработан «Метод адаптивных рассылок», позволяющий выполнять синхронизацию режимов информационного взаимодействия между источниками данных и средствами мониторинга на основании частотных характеристик наблюдаемых процессов.

Для формирования критериев настройки адаптивных рассылок выполняется исследование данных, получаемых от устройств IoT. Они представляют собой функцию дискретного аргумента. Разработан алгоритм для определения периода дискретизации на основе дискретного метода Фурье.

Апробация и внедрение метода адаптивных рассылок позволила сократить количество передаваемых данных и периодов активности устройств IoT в пять раз. Метод выполняется для каждого показателя, имеющего собственные спектральные характеристики.

В 2023 году продолжались исследования различных аспектов кибербезопасности, имеющих критическое значение для информационных систем, использующих модель облачных вычислений. Рассмотрены подходы к построению системы упреждающего поведения при эксплуатации устройств Интернета вещей.

Выполнено семантическое моделирование и построены цифровые профили устройств, содержащие статистические показатели журналов сетевых взаимодействий: интенсивность и продолжительность сеансов связи, характеристики передачи пакетов данных, а также

свойства процессов, контролируемых устройствами IoT-сети и прецеденты их аномального поведения.

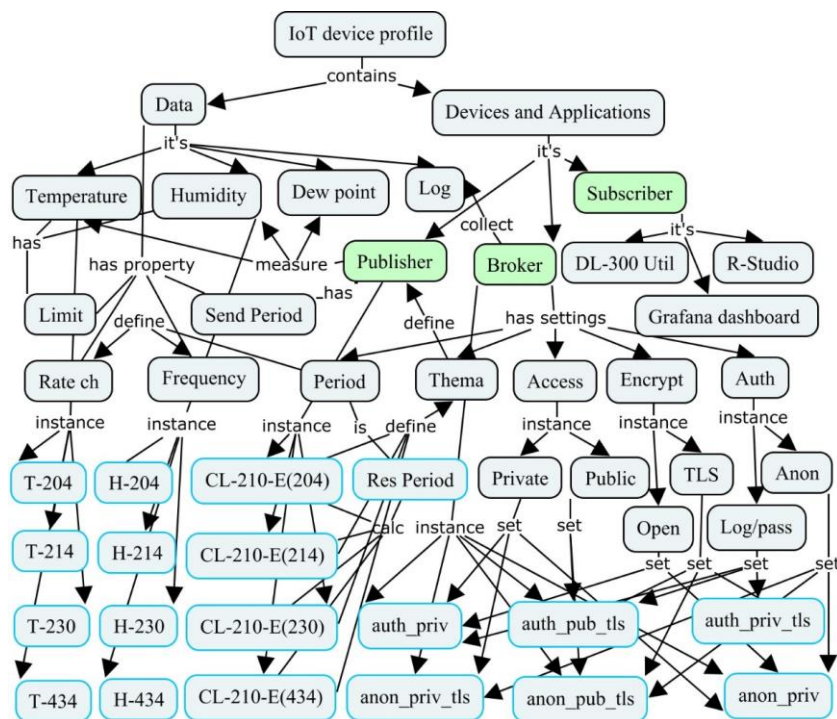


Рисунок 4.9 – Фрагмент графической структуры онтологии

В результате семантического моделирования создана онтология, представляющая собой категорированную иерархическую структуру, содержащую понятия (классы), свойства (функции и атрибуты), ограничения на свойства и экземпляры классов. Выполнен контроль полученной структуры и связей, проведён поиск и выявление скрытых зависимостей между экземплярами данных. На верхнем уровне иерархической структуры выделены классы – участники информационно взаимодействия, на последующих уровнях располагаются свойства и экземпляры классов. Фрагмент графической структуры онтологии приведён на рисунке 4.9.

Выбранная форма описания знаний о реализованной IoT-сети позволяет извлекать зависимости между классами, определять ограничения на свойства экземпляров классов и может использоваться для решения задач настройки и сопровождения устройств схемы информационного взаимодействия «Издатель-Брокер-Подписчик».

Каждый из экземпляров объектов в онтологии имеет своё цифровое представление в базах данных, включая результаты измерений, статистические и спектральные характеристики данных. Онтология содержит показатели сетевой активности и свойства

контролируемых процессов, что позволяет решать практические задачи создания систем мониторинга информационного взаимодействия в структуре IoT-сети. Собираемая статистика группируется по брокерам и издателям (источникам данных). Построены показатели, отражающие выявление нелегитимных обращений, их активность и распределение по периодам времени).

Анализ сетевых журналов, собранных за несколько лет, показывает рост количества сканирований устройств и сервисов, работающих по протоколам в технологии IoT. Соотнесение статистики нелегитимных обращений с поддерживаемыми политиками безопасности позволяет обосновано выполнять настройки брокеров данных.

Семантическое моделирование позволило связать источники данных, измеряемые параметры, их характеристики и ограничения, с брокерами, на которые поступают данные. Выполнив анализ зависимостей между экземплярами классов выбраны подмножества данных, на основе которых «Методом адаптивных рассылок» вычисляется период дискретизации и устанавливается периодичность публикации для нового брокера, так чтобы частота обновления соответствовала скорости изменения данных. При дальнейшей работе «Метод адаптивных рассылок» позволяет подстраивать характеристики выдачи в зависимости от собираемых данных. Полученные результаты позволяют сократить объем рассылок данных и уменьшить загрузку каналов связи при сохранении адекватности представления протекающих процессов. Проведённое семантическое моделирование позволило выполнить формализацию знаний для описания архитектуры сети Интернета вещей, выполняющей сбор, передачу данных, их хранение и обработку. Онтология консолидирует знания, позволяя рассматривать объекты с разных сторон. Например, для настройки брокера применяется не только статистика обращений, содержащаяся в сетевых журналах, но и характеристики, получаемые из анализа наблюдаемых IoT-устройствами процессов. Это позволяет сократить количество передаваемых данных и периодов активности устройств IoT в несколько раз, обеспечивая наблюдение за событиями в соответствии с динамикой их изменений.

Построенная онтология станет основой системы реагирования и превентивной защиты для обеспечения надёжности инфраструктуры Интернета вещей.

4.8. Кибербезопасность сервисов на примере корпоративной сети ФИЦ КНЦ СО РАН

В настоящее время веб-технологии активно используются для организации корпоративных облачных сервисов различного уровня (электронная почта, облачные диски, видеоконференции). Облачные сервисы используют технологии WWW и функционируют в открытой сети Интернет, поэтому они подвержены повышенным рискам информационной безопасности. В результате проведенных за ответный период исследований разработаны требования к моделям разграничения доступа облачных систем. предложена новая модель безопасности, которая учитывает особенности функционирования облачных веб-сервисов. Предложен подход для оценки кибербезопасности существующих облачных веб-систем на основе анализа журналов доступа. Проведена работа по анализу динамики интернет-угроз корпоративных веб-сервисов, в том числе облачных, на примере корпоративной сети Красноярского научного центра. Описан подход к анализу динамики функционирования веб-сервисов и выявлению рисков безопасности. Результаты полученного анализа позволили усилить меры противодействия кибератакам и повысить защищенность облачных систем. Сформулированы рекомендации для усиления защиты облачных веб-сервисов и снижения рисков кибербезопасности.

Одним из важных компонентов по обеспечению безопасности является анализ различных журналов активности. В частности, представляет интерес журналы веб-серверов nginx и apache, анализ которых позволяет выявить кибератаки, совершаемые на облачные системы.

При анализе журналов используются разные подходы. Один из самых популярных методов является сигнатурный анализ. В отличие от существующих работ, в проведенном исследовании анализ выполняется на длительных временных интервалах, что позволяет выявить динамику поведения веб-сервисов по часам, дням, месяцам и годам.

Для обработки данных разработан программный комплекс автоматизированной классификации кибератак на облачные веб-сервисы на основе сигнатурного метода. Проведенный анализ общего числа атак за 2020-2022 годы показывает, что в среднем их ежедневное количество меняется в небольших пределах (3% отклонения по годам). Вместе с тем, максимальное число атак изменяется в широких пределах от 8500 до 21000 за день, что свидетельствует об одновременном функционировании нескольких нескоординированных источников.

При переходе к детальному анализу атак выделяются явные тренды на увеличение количества атак отдельных типов, например POLICY/EXT_RESTR (запрещенное расширение) и WEB/FILE_INJ (инъекция файла). При детализации отчетливо видно увеличение интенсивности в 2 раза и более, незаметное при анализе общей динамики. При анализе агрегированных атак по дням, обнаруженный ранее восходящий тренд не проявляется. Таким образом, наиболее эффективным способом обнаружения повышения риска киберугроз является анализ классифицированных угроз с агрегацией до месяца.

Выявлено, что если при неклассифицированных атаках распределение имеет схожие параметры за разные годы, то в случае применения классификации параметры распределения изменяются существенно. Для выбора набора показателей была построена матрица корреляций их распределений по дням за весь наблюдаемый период 2020-2022 годы, показанная на рисунке 4.10. Большинство показателей имеют слабую корреляцию, за исключением WEB/CMD_INJ (инъекция команд), WEB/DIR_TRAVERSAL (просмотр директории) и WEB/JAVA_INJ (инъекция кода Ява), которые можно агрегировать.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. AUTO/CRAWLER		0,21	0,44	0,38	-0,34	0,10	-0,09	-0,10	-0,14	0,24	0,00	0,20	0,25	0,31	-0,20
2. AUTO/SCRIPT	0,21		0,10	-0,02	-0,06	-0,01	-0,15	-0,18	-0,34	0,13	-0,05	0,66	-0,34	0,28	-0,11
3. AUTO/SEC_SCAN	0,44	0,10		0,04	-0,24	-0,06	-0,30	-0,25	-0,29	-0,04	-0,22	0,09	0,17	0,29	-0,19
4. OTHERS	0,38	-0,02	0,04		-0,18	0,63	-0,08	-0,06	-0,09	0,23	-0,01	0,09	0,06	0,52	0,01
5. POLICY/EXT_RESTR	-0,34	-0,06	-0,24	-0,18		-0,09	0,55	0,60	0,46	0,12	0,50	-0,16	-0,09	-0,17	0,82
6. PROTOCOL	0,10	-0,01	-0,06	0,63	-0,09		0,20	0,18	0,06	0,09	0,28	0,41	-0,26	0,64	0,01
7. WEB/CMD_INJ	-0,09	-0,15	-0,30	-0,08	0,55	0,20		0,99	0,73	0,04	0,97	0,11	-0,11	-0,10	0,47
8. WEB/DIR_TRAVERSA	-0,10	-0,18	-0,25	-0,06	0,60	0,18	0,99		0,75	0,07	0,96	0,05	-0,06	-0,15	0,52
9. WEB/FILE_INJ	-0,14	-0,34	-0,29	-0,09	0,46	0,06	0,73	0,75		0,31	0,62	-0,11	0,07	-0,40	0,59
10. WEB/HEADER_INJ	0,24	0,13	-0,04	0,23	0,12	0,09	0,04	0,07	0,31		-0,01	-0,02	0,28	0,08	0,15
11. WEB/JAVA_INJ	0,00	-0,05	-0,22	-0,01	0,50	0,28	0,97	0,96	0,62	-0,01		0,22	-0,13	0,00	0,42
12. WEB/PHP_INJ	0,20	0,66	0,09	0,09	-0,16	0,41	0,11	0,05	-0,11	-0,02	0,22		-0,27	0,41	-0,13
13. WEB/RFI	0,25	-0,34	0,17	0,06	-0,09	-0,26	-0,11	-0,06	0,07	0,28	-0,13	-0,27		-0,26	-0,11
14. WEB/SQL_INJ	0,31	0,28	0,29	0,52	-0,17	0,64	-0,10	-0,15	-0,40	0,08	0,00	0,41	-0,26		-0,11
15. WEB/XSS	-0,20	-0,11	-0,19	0,01	0,82	0,01	0,47	0,52	0,59	0,15	0,42	-0,13	-0,11	-0,11	

Рисунок 4.10 – Матрица корреляций распределений классифицированных атак

На основе проведенного анализа предложен эвристический метод для оценки изменения рисков киберугроз, основанный на сравнении параметров распределений выборок. Метод не зависит от сравниваемых временных интервалов и объема выборок, поскольку основан на статистических показателях. Он может использоваться в других областях, в которых существует классификация показателей.

На основе расширенной ролевой модели разграничения доступа предложена новая модель безопасности, которая учитывает особенности функционирования облачных веб-сервисов. Полученная модель безопасности позволяет разграничивать доступ с использованием пути запроса (URI), параметров запроса, методов запроса, доменов с привязкой к конкретной облачной системе.

В 2023 году разработано программное обеспечение для распределенной обработки больших объемов данных, которое обладает возможностями масштабирования и может выполнять анализ данных в режиме реального времени. Программный комплекс разработан на языке Go и состоит из нескольких частей: клиент, брокер сообщений, вычислительный кластер. Структура комплекса изображена на рисунке 4.11.

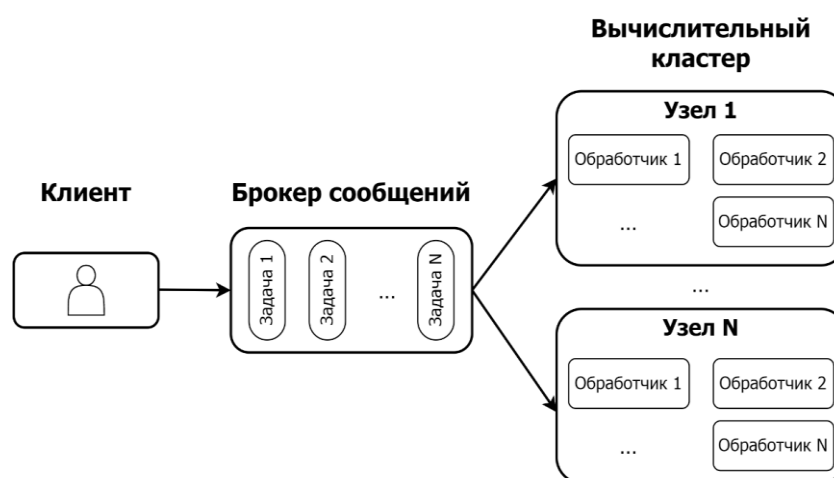


Рисунок 4.11 – Структура распределенного программного комплекса

Клиентская часть взаимодействует с брокером сообщений и позволяет отправлять задания на обработку в общую очередь заданий, серверная часть извлекает задание из очереди и запускает обработку с помощью обработчиков (workers). Серверная часть состоит из множества узлов вычислительного кластера, каждый узел может запускать несколько обработчиков (workers) параллельно, что обеспечивает параллельную обработку данных и позволяет уменьшить время выполнения заданий. Обработчик обращается к брокеру сообщений, получает новое задание, запускает его на выполнение, сохраняет результаты обработки, затем получает новое задание. Задание состоит из списка элементов <имя, значение>, которые включают источник данных, приемник данных, тип задания, параметры агрегации, начало и окончание временных интервалов, фильтр данных, селектор данных. Фильтр посредством специального языка позволяет задавать набор правил для фильтрации

данных. Селектор задает список полей, которые после фильтрации и агрегации будут извлечены и записаны как результат выполнения задания. Брокер сообщений использует СУБД Redis для обработки очереди заданий, для описания заданий используется язык YAML. Программный комплекс является кроссплатформенным и поддерживает работу в гетерогенных конфигурациях с операционными системами Linux, *BSD, Windows. Получено свидетельство о государственной регистрации программы.

Для оценки уровня риска киберугроз на основании принципов нормального функционирования различных протоколов были сформулированы эвристические критерии аномальности трафика. Эти критерии были формализованы в виде правил системы обработки первичного трафика согласно заданному синтаксису. После обработки первичных данных с помощью созданного программного обеспечения (ПО) были получены агрегированные данные для дальнейшего анализа. Дополнительно было рассчитано относительное увеличение стандартного отклонения показателей в 2022 году по сравнению с 2021 годом. Среднеквадратическое отклонение для большинства наборов данных за 2022 год имеет существенное увеличение по сравнению с 2021 годом, что свидетельствует об увеличении меры неопределенности появления различных компьютерных атак. Применяя предложенный выше метод сравнения рисков киберугроз, вычислено значение R оценки изменения рисков: $R(2021,2022) = 0.5$. Это можно проинтерпретировать, что риск в рамках исследуемых критериев в целом в 2022 году по сравнению с 2021 годом существенно вырос в 50% показателей. При сравнении интервалов за март 2021 года с мартом 2022 года значение $R = 0.43$. Таким образом, предложенный метод позволяет сравнивать риски как на больших временных интервалах (год), так и на средних, при условии наличия достаточной выборки.

Продолжены работы над методом кластеризации интернет-ресурсов на основе тематического моделирования. Вероятностные тематические модели осуществляют «мягкую» кластеризацию, позволяя документу или термину относиться сразу к нескольким темам с различными вероятностями. Документом в нашем случае является множество интернет-ресурсов, посещенных пользователем в течение сессии. Термином является сам интернет-ресурс, независимо от времени и пользователя его посетившего. В результате моделирования мы получаем наборы интернет-ресурсов, которые совместно встречались в разных сессиях.

Эксперт может на основании содержания наиболее популярных интернет-ресурсов группы присвоить ей тематику и определить степень опасности. Безопасные группы мы можем удалить из дальнейшего анализа, а самые опасные исследовать более детально.

В результате проведенного тематического моделирования удалось выделить потенциально опасные группы с малым количеством посещений и расположенные обособленно от прочих. В большинстве случаев это оказались ресурсы, связанные со специализированными задачами по загрузке или синхронизации информации через интернет-сеть. Получение информации о таких задачах позволило их упорядочить и регламентировать.

Заключение

По разделу «Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса» получены следующие результаты.

Построенные математические модели ионосферных электрических полей и токов могут стать фрагментами общих ионосферных моделей. Полные модели необходимы для прогнозирования состояния ионосферы, в частности, пространственно-временных вариаций электронной концентрации. Такое прогнозирование в настоящее время осуществляется на основе измерения и экстраполяции значений нескольких интегральных параметров. Полная физико-математическая модель ионосферы в ее взаимосвязи с магнитосферой и атмосферой позволит существенно уточнить прогнозы, необходимые для обеспечения радиосвязи и работы спутниковых навигационных систем, таких как ГЛОНАСС.

Исследованы условия генерации электрического поля в токовом слое на границе и хвосте магнитосферы на основе диссипативной МГД-модели с учетом аномальной проводимости плазмы и эффектов Холла.

Разработана математическая модель построения теплового поля электронных блоков по показаниям встроенных температурных датчиков. Модель обеспечивает расчет диапазона возможных температур в любой точке блока по показаниям датчиков на основе заданных ограничений на варьируемые параметры системы, при этом количество параметров может превышать количество датчиков. Экспериментальная проверка для типичных режимов электронных блоков показала приемлемые диапазоны возможных температур. Неопределенность выявляемого теплового поля увеличивается с уменьшением количества датчиков и снижается при добавлении дополнительных связей между значениями варьируемых параметров. Модель может быть использована как на стадии проектирования встроенных систем контроля для определения оптимальной расстановки и количества датчиков, так и для выявления тепловых полей с расчетной погрешностью по показаниям датчиков в ходе функционирования аппаратуры. Результаты исследований показали, что для характерных режимов функционирования электронных блоков можно достигать достаточно высокой точности выявления тепловых полей (на уровне $\sim 5^\circ\text{C}$) при использовании небольшого количества датчиков.

В рамках развития численных методов интегрирования уравнений возмущенного движения космического аппарата по орбите разработаны алгоритмы получения и исследования устойчивых схем предиктор-корректор на основе симметричных линейных многошаговых методов; продемонстрирована вычислительная эффективность разработанных

методов, проведено сравнение с используемым в настоящее время методом Эверхарта. Разработано, написано и отлажено базовое программное обеспечение на языке Си/Си++, предназначенное для формирования параметров радионавигационных сигналов. Программное обеспечение имитирует группировку навигационных космических аппаратов при их возмущенном движении по орбите совместно с движением приемника на поверхности Земли.

По разделу «Математическое моделирование физических процессов и устройств» получены следующие результаты.

С помощью теплофизической модели рассчитаны зависимости от силы тока холодопроизводительности и холодильного коэффициента, позволяющие определять значения силы тока, при которых реализуются режимы максимальной холодопроизводительности и максимального холодильного коэффициента. Получена номограмма холодопроизводительности, которая позволяет по значениям термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты определить холодопроизводительность блока охлаждения подводных и надводных судов. Теплофизическая модель дает возможность выбора режима работы блока охлаждения, обеспечивающего поддержание заданной температуры в холодильной камере и повышение эффективности охлаждения.

Разработан экспериментальный стенд для измерения температур и определения энергетических характеристик конструкционных узлов блока охлаждения: пластинчатого теплообменника и термосифонов. В ходе экспериментальных исследований определялась теплопередающая способность двухфазных термосифонов и энергетические характеристики теплообменника с учетом образования инея при различных параметрах процесса. В результате экспериментов получены значения термических сопротивлений узлов блока охлаждения, необходимые для проведения расчетов и оптимизации работы блока охлаждения в требуемом диапазоне тепловых нагрузок и температур охлаждающей воды.

Результаты исследований по определению оптимальной структуры метаповерхности из плазмонных материалов, обеспечивающей максимальное усиление локального поля, могут быть применены в разработке устройств для генерации лазерного излучения, анализа состава веществ методом SERS.

Построенные математические модели «тёмных» ловушек и сверхрешеток (индуцированных специальными суперпозициями квази-бездифракционных бихроматических косинус-Гауссовских оптических пучков) и выводы, вытекающие из исследования этих моделей могут быть использованы для разработки новых лазерных методов селективного извлечения сверхмалых примесей из газовых смесей и их

долговременного удержания, а также для разделения газов и изотопов (для лабораторных целей) с высоким коэффициентом разделения, значительно превышающем единицу.

В рамках сотрудничества с коллегами из Европейского центра передовых технологий водоподготовки (Wetsus) и Университета Твенте (Нидерланды) разработана модель транспорта ионов через полимерную мембрану обратного осмоса.

Предложена новая модель для потока раствора и задержания соли, которая может использоваться в широком диапазоне параметров – от случая незаряженной мембраны и раствора с нейтральным веществом до случая сильно заряженной мембраны и сильного водного электролита. Полученное уравнение для задержания соли применяется для описания нескольких наборов экспериментальных данных по фильтрации морской воды с помощью обратного осмоса и позволяет дать сравнительную оценку солевой проницаемости различных коммерчески доступных мембран.

По разделу «Исследование больших данных, обнаружение новых знаний и прогнозирование состояния сложных систем и объектов» получены следующие результаты.

Предложен алгоритм анализа полноты программ испытаний в технологическом процессе производства бортовой аппаратуры космического аппарата, позволяющий на основе построенных цифровых моделей выявлять неконтролируемые параметры функционирования технических систем, что способствует повышению качества и снижению затрат, связанных с подготовкой и проведением испытаний.

Для раннего обнаружения технологических нарушений в цикле производства алюминия, связанных с возникновением образования на подошве анода типа «конус», разработана модель прогнозирования нарушения по данным среднесуточного мониторинга. Прогноз формируется на результатах трех моделей: модели метаклассификации, модели голосования и модели на основе ассоциативных правил, которые путем выявления внутренних закономерностей в данных определяют состояние объекта, соответствующее возникновению нарушения.

Полученные результаты о генетических последовательностях могут дать дополнительную информацию и помочь в решении различных биологических задач. Методы сравнения без выравнивания, свободные от неформального получения знаний, обладают высокой вычислительной производительностью и дают альтернативную информацию, которая потенциально может быть важной для филогенетического анализа. Применение упругих карт приводит к кластеризации последовательностей ДНК могут отражать некоторые скрытые особенности и предоставлять дополнительную информацию для эволюционного анализа.

Происхождение и эволюция вирусов и их филогенетические взаимоотношения имеют большое значение для изучения их патогенности и разработки противовирусных препаратов и вакцин.

Разработан модифицированный непараметрический алгоритм автоматической классификации в условиях больших объёмов статистических данных. Развита методика быстрой оптимизации непараметрических оценок плотности вероятности и уравнения разделяющей поверхности двухальтернативной задачи распознавания образов. Эффективность полученных результатов подтверждена применением при анализе данных дистанционного зондирования лесных массивов, повреждённых уссурийским полиграфом.

Разработан «сквозной» метод оценки территориальных рисков, включающий обработку данных мониторинга, представление результатов для разных уровней управления, формирование рекомендаций по проведению превентивных мероприятий, который предусматривает замкнутый цикл выработки, реализации и контроля эффективности решений. Предложенный метод позволяет сформировать иерархию оценок, характеризующих уровень качества жизни, получать обобщенные оценки развития территории и детализировать их до конкретных показателей, что дает возможность определять первопричины текущей ситуации и формировать целевые управляющие воздействия.

В рамках этого метода предложены метамодель и алгоритм, позволяющие проанализировать состояние природно-техногенной безопасности территорий, выявить причины возникновения проблемных ситуаций и сформировать обоснованные управляющие рекомендации. С использованием предложенной модели были сформированы рекомендации по корректировке региональной программы обеспечения пожарной безопасности и мероприятий подготовки к предстоящему лесопожарному сезону.

По разделу «Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ» получены следующие результаты.

Разработан модельно-ориентированный подход «без программирования», который позволяет создавать системы за счет отделения бизнес-логики из программного кода в метаданные и формирования алгоритмов построения прикладных систем под управлением этих метаданных. Реализованный в платформе модельно-ориентированный подход применен к генерации аналитических отчетов. Информация о структуре и наполнении отчетов представляется как метаданные, а в программный код, отвечающий за формирование отчетов на основе метамодели, включается унифицированный модуль генерации отчета. Апробация выполнена на примере оперативной сводки, формируемой Центром обеспечения реализации

полномочий в областях гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций Красноярского края (Центра ГО и ЧС). В зависимости от сезона в аналитическом отчете меняется перечень контролируемых обстановок: летом – подтопления и лесные пожары, а зимой – мониторинг ледовых переправ. С окончанием отчетного года в некоторые разделы добавляются новые столбцы для сопоставления показателей в предшествующие отчетные периоды. Применение новых инструментов не требует непосредственного участия программиста для адаптации и настройки новой версии аналитического отчета.

Опыт применения разработанных методов и программного обеспечения реализован в проблемно-ориентированной платформе и показал преимущества при решении широкого класса задач аналитической поддержки территориального управления. Апробация модели проведена на примере мероприятий целевой программы «Защита от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и обеспечение безопасности населения Красноярского края».

Проведены исследования в области безопасности облачных вычислений для модели обслуживания на основе телекоммуникационной инфраструктуры ФИЦ КНЦ СО РАН и реализованного технологического стенда Интернета вещей (IoT). В рамках исследований были налажены сбор и обработка данных взаимодействия различных сервисов, предложены методы анализа и выявления рисков киберугроз.

Разработан метод классификации кибератак на основе сигнатурного анализа. Метод позволяет идентифицировать вид кибератак на облачные ресурсы на основе заранее заданных классов, а также выявлять зависимость между различными классами атак. Создано программное обеспечение для автоматизированной классификации кибератак. Разработан метод оценки изменения рисков киберугроз для информационно-телекоммуникационных систем, в том числе облачных. Разработано облачное программное обеспечение для распределенной обработки больших массивов данных, которое может использоваться для первичной обработки данных при анализе рисков киберугроз в информационно-телекоммуникационных сетях. Создана новая расширенная ролевая модель безопасности для облачных вычислений на основе классической модели RBAC, которая учитывает особенности функционирования облачных сервисов. Разработанные методы апробированы при анализе кибербезопасности и оценке рисков киберугроз корпоративной сети ФИЦ КНЦ СО РАН.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Научные статьи к отчету за 2021 год

1. Nesterov D.A., Derevyanko V.A., Suntsov S.B. Experimental investigations of flat T-shaped copper and titanium heat pipes // *App. Therm. Eng.* – 2021. – Vol. 198, № 5. – Art. 117454. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117454
2. Nesterov D.A., Derevyanko V.A., Suntsov S.B. Cooling of electronic components on the LTCC module with an embedded flat heat pipe // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 1139. – Art. 012002. DOI:10.1088/1757-899X/1139/1/012002
3. Sokolov N.Yu., Kulagin V.A., Nesterov D.A. Heat pipe system as a component of spacecraft electronics // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* – 2021. – Vol. 14, № 4. – P. 363–377. DOI: 10.17516/1999-494X-0317
4. Sokolov N.Yu., Kulagin V.A., Nesterov D.A. Mathematical modeling and optimization heat pipe systems // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol.* – 2021. – Vol. 14, № 7. – P. 860–879. DOI: 10.17516/1999-494X-0352
5. Kozlova S.V., Ryzhkov I.I., Bou-Ali M.M. Modeling of Separation in a Binary Mixture with Negative Soret Effect in a Cylindrical Thermogravitational Column // *J. Non-Equil. Thermodyn.* – 2021. – Vol. 46, № 2. – P 109-120; DOI: 10.1515/jnet-2020-0045.
6. Krom A.I., Ryzhkov I.I. Ionic Conductivity of Nanopores with Electrically Conductive Surface: Comparison Between 1D and 2D Models // *Adv. Theory and Simulation.* – 2021. – Vol. 4, Issue 10. – Art. 2100174. DOI: 10.1002/adts.202100174
7. Krom A.I., Medvedeva M.I., Ryzhkov I.I. Modelling the Ionic Conductivity of Nanopores with Electrically Conductive Surface // *J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* – 2021. – Vol. 14, № 1. – P. 74–86. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-1-74-86
8. Ryzhkov I.I., Kharchenko I.A., and others. Growth of carbon nanotubes inside porous anodic alumina membranes: Simulation and experiment // *International Journal of Heat and Mass Transfer.* – 2021. – Vol. 176. – Art. 121414. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121414
9. Ryzhkov I.I., Shchurkina M.A., and others. Switchable ionic selectivity of membranes with electrically conductive surface: Theory and experiment // *Electrochimica Acta.* – 2021. – Vol. 375. – Art. 137970. DOI: 10.1016/j.electacta.2021.137970
10. Lebedev D., Malyshev G., Ryzhkov I., and others. Focused ion beam milling based formation of nanochannels in silicon-glass microfluidic chips for the study of ion transport // *Microfluidics and Nanofluidics.* – 2021. – Vol. 25, Issue 6. – Art. 51. DOI: 10.1007/s10404-021-02450-x

11. Krasnov I.V. Three-dimensional Talbot optical superlattice produced by bichromatic cosine-Gaussian light beams // *Laser Physics Letters*. – 2021. – Vol. 18. – Art. 095501. DOI: 10.1088/1612-202X/ac191e
12. Karepova E.D., Adaev I.R., Shan'ko Yu.V. The Techniques for Constructing a Family of Symmetric Multistep Methods // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. – 2021. – Vol. 42, № 7. – P. 1675–1685. DOI: 10.1134/S1995080221070118
13. Васильев Е.Н. Регулирование режима охлаждения термоэлектрического блока // *Журнал СВУ. Техника и технологии*. – 2021. – Т. 14, № 4. – С. 416–423. DOI: 10.17516/1999-494X-0322
14. Korovinskiy D.B., Kiehas S.A., Panov E.V., Semenov V.S., Erkaev N.V., Divin A.V., Kubyshekin I.V. The Inertia-Based Model for Reconstruction of the Electron Diffusion Region. // *Journal of Geophysical Research*. – 2021. – Vol. 26, № 5. – Art. e2020JA029045. DOI: 10.1029/2020JA029045
15. Denisenko V.V., Lyakhov A.N. Comparison of ground-based and satellite data on spatiotemporal distribution of lightning discharges under solar minimum // *Solar-Terrestrial Physics*. – 2021. – Vol. 7, Iss. 4. – P. 104–112. DOI: 10.12737/stp-74202112.
16. Denisenko V. Statements of the boundary value problems in mathematical simulation of a quasistationary electric field in the atmosphere and ionosphere // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1715. – Art. 012016. DOI:10.1088/1742-6596/1715/1/012016
17. Nesterov S.A., Denisenko V.V. The influence of the magnetic field on the quasistationary electric field penetration from the ground to the ionosphere // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1715. – Art. 012020. DOI:10.1088/1742-6596/1715/1/012020
18. Boudjada M.Y., Galopeau P.H.M., Sawas S., Denisenko V., and others. Low-altitude frequency-banded equatorial emissions observed below the electron cyclotron frequency // *Annales Geophysicae*. – 2020. – Vol. 38, № 3. – P. 765-774. DOI: 10.5194/angeo-38-765-2020
19. Mikhalev A., Lugovaya N., Penkova T., Puzanov I., Zavadyak, A. Application of Ensemble Algorithms to Detect Anode Effects in Aluminum Production // *CEUR Workshop Proceedings*. – 2021. – Vol. 3047. – P. 79-85. DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-10
20. Isaeva O.S. Technology of spacecraft on-board equipment design support // *IOP Conf. Ser: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1047. – Art. 012115. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012115.

21. Isaeva O., Kulyasov N., Isaev S. Implementation of Digital Twins for the Analysis of Test Programs of Technical Systems // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 3047. – P. 57-63. DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-06
22. Senashova, M.Yu. Spatial Structure of Chloroplast Genes of Photosynthetic Systems I and II // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 3047. – P. 115-120. DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-17
23. Senashova, M.Yu. Unusual Distribution Structure of the Cyanobacteria Photosystem Genes in the Frequency Space of Triplets // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 3047. – P. 121-125. DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-18
24. Зеньков И.В., Лапко А.В., Лапко В.А. и др. Непараметрический алгоритм автоматической классификации многомерных статистических данных большого объёма и его применение // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45. №2. – С. 253-260. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-801
25. Lapko A.V., Lapko V.A. Modified Fast Algorithm for the Bandwidth Selection of the Kernel Density Estimation // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2020. – Vol. 56, № 6. – P. 566–572. DOI: 10.3103/S8756699020060102
26. Lapko A.V., Lapko V.A. Modified algorithm for rapid choice of spread coefficients for kernel estimates of multidimensional probability densities // Measurement Techniques. – 2021. – Vol. 63, № 11. – P. 856-861. DOI: 10.1007/s11018-021-01873-w
27. Лапко А.В., Лапко В.А. Модифицированный алгоритм быстрого определения коэффициента размытости ядерной оценки плотности вероятности // Автометрия. – 2020. – Т. 56, № 6. – С. 11-18. DOI: 10.15372/AUT20200602
28. Nozhenkova L., Penkova T., Morozov R., Nozhenkov A. Conception of Life Quality Estimation of the Municipal Territories in the Context of National Project Implementation // CEUR Workshop Proceedings. – 2021. – Vol. 3047. – P. 98-103. DOI: 10.47813/sibdata-2-2021-14.
29. Пенькова Т.Г., Кочетков С.Н. Технологический подход к организации унифицированного обмена данными между гетерогенными системами // Информационные технологии. – 2021. – Т.27, №1. – С. 25-31. DOI: 10.17587/it.27.25-31.
30. Maksimov D.N, Gerasimov V.S., and others. Refractive index sensing with optical bound states in the continuum // Optics Express. – 2020. – Vol. 28, № 26. – P. 38907-38916. DOI: 10.1364/OE.411749

31. Kostyukov A.S., Ershov A.E., Bikbaev R.G., Gerasimov V.S., Rasskazov I.L., Karpov S.V., Polyutov S.P. Substrate-mediated lattice Kerker effect in Al metasurfaces // J. Optical Society of America B. – 2021. – Vol. 38, № 9. – P. C78-C83. DOI: 10.1364/JOSAB.427939
32. Gerasimov V.S., Ershov A.E., and others. Plasmonic lattice Kerker effect in ultraviolet-visible spectral range // Physical Review B. – 2021. – Vol. 103, № 3. - Art. 035402. DOI: 10.1103/PhysRevB.103.035402
33. Васильев Е.Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 5. – С. 743-747. DOI: 10.21883/JTF.2021.05.50684.296-20

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Научные статьи к отчету за 2022 год

1. Denisenko V.V., Rycroft M.J. WWLLN Data Used to Model the Global Ionospheric Electric Field Generated by Thunderstorms // *Annals of geophysics*. – 2022. – Vol. 65. – Art. PA536. [Q3, web of science] DOI: 10.4401/ag-8821.
2. Erkaev N.V., Semenov V.S. About Petschek-Type Reconnection Driven by Inhomogeneous Plasma Resistivity // *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. – 2022. – Vol. Problems of Geocosmos. – 2020. – P. 397-412. [Scopus] DOI: 10.1007/978-3-030-91467-7_29
3. Schmid D., Lammer H., Plaschke F., Vorbürger A., Erkaev N.V., Wurz P., Narita Y., Volwerk M., Baumjohann W., Anderson B.J. (2022). Magnetic evidence for an extended hydrogen exosphere at Mercury // *J. Geophysical Research: Planets*. – 2022. – Vol. 127. – Art. e2022JE007462. [Q1, web of science]
<https://doi.org/10.1029/2022JE007462>.
4. Lammer H., Scherf M., Ito Y., Mura Ф., Vorbürger A., Guenther E., Wurz P., Erkaev N.V., Odert P. The Exosphere as a Boundary: Origin and Evolution of Airless Bodies in the Inner Solar System and Beyond Including Planets with Silicate Atmospheres // *Space Sci Rev*. – 2022. – Vol. 218. – Art. 15. [Q1, web of science]
<https://doi.org/10.1007/s11214-022-00876-5>
5. Gorbunova K.D., Erkaev N.V. Compact MacCormac-type schemes applied for atmospheric escape problem // *J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics*. – 2022. – Vol. 15, № 4. – P. 500-509. [Q, web of science] DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-4-500-509
6. Karepova E.D., Shan'ko Yu.V., Adaev I.R. Predictor-Corrector Mode for Symmetric Multistep Methods for the Numerical Modelling of Satellite Motion // *AIP Conference Proceedings*. – 2022. – V. 2522. – Art. 100006. [Scopus]
<https://doi.org/10.1063/5.0100843>
7. Kimani E.M., Pranić M., Porada S., Kemperman A.J.B., Ryzhkov I.I., van der Meer W.G.J., Biesheuvel P.M. The influence of feedwater pH on membrane charge ionization and ion rejection by reverse osmosis: An experimental and theoretical study // *J. Membrane Science*. – 2022. – V. 660. – Art. 120800. [Q1, web of science]
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120800>
8. Jia T., Li D., Du J., Fang X., Gerasimov V., Ågren H., Chen, G. A bimodal type of AgPd Plasmonic Blackbody Nanozyme with boosted catalytic efficacy and synergized photothermal

- therapy for efficacious tumor treatment in the second biological window // *J. Nanobiotechnology*. – 2022. – Vol. 20, Issue 1. – Art. 424. [Q1, web of science]
<https://doi.org/10.1186/s12951-022-01627-y>
9. Maksimov D.N., Gerasimov V.S., Bogdanov A.A., Polyutov S.P. Enhanced sensitivity of an all-dielectric refractive index sensor with an optical bound state in the continuum // *Physical Review A*. – 2022. – Vol. 105, Issue 3. – Art. 033518. [Q2, web of science]
<https://doi.org/10.1103/physreva.105.033518>
10. Kostyukov A.S., Gerasimov V.S., Ershov A.E., Bulgakov E.N. Ring of bound states in the continuum in the reciprocal space of a monolayer of high-contrast dielectric spheres // *Physical Review B*. – 2022. – Vol. 105, Issue 7. – Art. 075404. [Q2, web of science]
<https://doi.org/10.1103/physrevb.105.075404>
11. Kostyukov A.S., Isaev I.L., Ershov A.E., Gerasimov V.S., Polyutov S.P., Karpov S.V. Part I. Nanobubbles in pulsed laser fields for anticancer therapy: in search of adequate models and simulation approaches // *J. Physics D: Applied Physics*. – 2022. – Vol. 55, Issue 17. – Art. 175401. [Q2, web of science]
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac4c20>
12. Kostyukov A.S., Isaev I.L., Ershov A.E., Gerasimov V.S., Polyutov S.P., Karpov S.V. Part II. Nanobubbles around plasmonic nanoparticles in terms of modern simulation modeling: what makes them kill the malignant cells // *J. Physics D: Applied Physics*. – 2022. – Vol. 55, Issue 17. – Art. 175402. [Q2, web of science]
<https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac4c1f>
13. Lapko A.V., Lapko V.A., Bakhtina A.V. Optimization of the kernel probability density estimation of a two-dimensional random variable with independent components // *Measurement Techniques*. – 2021. – Vol.64, Iss.12. - P.958-962. [web of science] DOI: 10.1007/s11018-022-02029-0
14. Kalach A.V., Nicheporchuk V.V., Arifullin E.Z., Akulov A.Yu., Kulikova T.N. Systematization of the parameters of monitoring for situational modeling of response to emergency situations // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2022. – Vol. 1902. – Art. 12072. [web of science] DOI: 10.1088/1742-6596/1902/1/012072
15. Исаева О.С., Исаев С. В., Кулясов Н. В. Формирование адаптивных рассылок брокера данных интернета вещей // *Информационно-управляющие системы*. – 2022. – № 5 (120). – С. 23-31. [ядро РИНЦ] DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-23-31.

16. Isaeva O.S., Kulyasov N.V. Isaev S.V. Creation of a simulation stand for studying of the internet of things' technologies // AIP Conference Proceedings. – 2022. – No. 2647. – Art. 040030. [Scopus] DOI: 10.1063/5.0104342.
17. A.V. Vyatkin, V.V. Shaydurov, and E.V. Kuchunova Two finite volume schemes for advection equation // Lecture Notes in Computer Science and Engineering – 2022 – Vol.141. – P.545-561. [Scopus] DOI: 10.1007/978-3-030-87809-2_41
18. Лапко А.В., Лапко В.А., Бахтина А.В. Сравнение методики проверки гипотезы о независимости двумерных случайных величин, основанной на непараметрическом классификаторе // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2022. – №1. – С. 45 – 56. [ядро РИНЦ] DOI: 10.14357/20718594220105
19. Лапко А.В., Лапко В.А. Быстрый выбор коэффициентов размытости ядерной оценки плотности вероятности независимых случайных величин // Автометрия. – 2022. – Т. 58, № 1. – С. 33-39. [ядро РИНЦ] DOI: 10.15372/AUT20220104
20. Лапко А.В., Лапко В.А. Оценивание нелинейного функционала от плотности вероятности трёхмерной случайной величины для повышения вычислительной эффективности непараметрических решающих правил // Автометрия. – 2022. – Т. 58, № 2. – С. 93-103. [ядро РИНЦ] DOI: 10.15372/AUT20220211
21. Ronzhin N.O., Posokhina E.D., Mikhlina E.V., Shestakov N.P., Nemtsev I.V., Bondar V.S., Ryzhkov I.I. The effect of copper and iron adsorption on the catalytic performance of alumina nanofiber/nanodiamond composite in sensing applications // J. Physics and Chemistry of Solids. – 2022. – V. 167. – Art. 110785. [Q2, web of science] <https://doi.org/10.1016/j.jpcs.2022.110785>
22. Fadeeva P., Pavlov M.V., Kharchenko I.A., Simunin M.M., Shabanova K.A., Pavlov V.F., Ryzhkov I.I. High strength ceramic substrates based on perlite and foam silicates for filtration membranes // Membranes and membrane technologies. – 2022. – Vol. 4 (3). – P. 170-176. [Q, web of science] <https://link.springer.com/article/10.1134/S2517751622030040>
23. Vasil'ev E.N. Calculation and optimization of heat exchangers for thermoelectric cooling unit // Thermophysics and Aeromechanics. – 2022. – Vol. 29(3). – P. 401–410. [Q4, web of science] DOI: 10.1134/S0869864322030088
24. Shaidurov V., Novikov A. Difference schemes for second-order ordinary differential equations with corrector and predictor properties // Russian J. Numerical Analysis and Mathematical

- Modelling. – 2022. – Vol. 37, Iss. 3. – P. 175-187 [Q3, web of science] DOI: 10.1515/rnam-2022-0015
25. Petrakova V., Tsipotan A., Slabko V. The mathematical model of quantum dots pair orientation under laser radiation field // Computer optics – 2022. – Vol. 46, Iss. 4. – P. 555-560 [Q, web of science] DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1062
26. Захарова О.С., Брацун Д.А., Рыжков И.И. Конвективная неустойчивость в многокомпонентных смесях с эффектом Соре // Вычислительная механика сплошных сред. – 2022. – Т. 15, Вып. 1. – С. 67-82 [ядро РИНЦ] DOI: 10.7242/1999-6691/2022.15.1.6
27. Vasil'ev E.N. Numerical Simulation of Temperature and Thermal Stress Fields in a Carbon Block under External Thermal Effect // J. Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2022. – Vol. 15, Iss. 3. – P. 267-272 [Q, web of science] DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-3-267-272
<https://elib.sfu-kras.ru/handle/2311/145513>
28. Vasil'ev E.N. Modeling of the Ice Cover Dynamics of a Freshwater Reservoir // Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. – 2022. – Vol. 15, Iss. 6. – P. 753-762 [Q, web of science] DOI: 10.17516/1997-1397-2022-15-6-753-762
<https://elibrary.ru/item.asp?id=49833998>
29. Васильев Е.Н., Емельянов Д.П., Нестеров Д.А. Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2022. – Т. 15, Вып. 1. – С. 24-34 [ядро РИНЦ] DOI: 10.17516/1999-494X-0371
<https://elibrary.ru/item.asp?id=48184458>
30. Васильев Е.Н., Емельянов Д.П. Влияние угла наклона щелевого канала на стекание воды // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2022. – Т. 15, Вып. 5. – С. 526-533 [ядро РИНЦ] DOI: 10.17516/1999-494X-0413.
<https://elibrary.ru/item.asp?id=49371587>
31. N. V. Erkaev, C. Weber, J.-M., Griemeier, H. Lammer, V.A. Ivanov, and P. Odert Can Radio Emission Escape from the Magnetosphere of Andromedae b - A New Method to Constrain the Minimum Mass of Hot Jupiters // MNRAS. – 2022. – Vol. 512, Iss. 4, – P. 4869-4876 [Q1, web of science] DOI: 10.1093/mnras/stac767
32. Isaeva O.S., Kulyasov N.V. Isaev S.V. Infographic method to support testing of spacecraft onboard systems based on knowledge base // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta-Upravlenie vychislitel'naja tehnika i informatika-Tomsk state university journal of control and

computer science. – 2021. – Vol. 57, – P. 22-33 [Q, web of science] DOI:
10.17223/19988605/57/3

<https://elibrary.ru/item.asp?id=48008259>

33. Krasnov I.V. Opto-thermophoretic superlattice for atoms // Laser Physics Letters. – 2022. – Vol. 19, Iss. 9. – Art. 95501 [Q3, web of science] DOI: 10.1088/1612-202X/ac81bc

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Научные статьи к отчету за 2023 год

1. Reushev M.Yu., Podoprigora V.G., Makarov D.S., Kharlamov D.V., Vasiliev E.V. Interaction of Satellite Navigation Signals with Forest and Snow-Ice Layers // Russian Physics Journal. – 2023. – Vol.66, Iss.6. – P.706-711. [WoS Q4] DOI: 10.1007/s11182-023-02996-z
2. Vasiliev E.V. On the importance of thermal resistances of the cooling system when choosing a thermoelectric module // Technical Physics. – 2023. – Vol.68, Iss.5. – P.574-579. [WoS Q4] DOI: 10.21883/TP.2023.05.56062.13-23
3. Васильев Е.Н. Моделирование теплопередачи в устройстве подвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2023. – Т.16, Вып.1. – С.82-91.
4. Васильев Е.Н., Емельянов Д.П., Нестеров Д.А. Экспериментальное исследование двухфазных термосифонов термоэлектрического блока охлаждения // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2023. – Т.16, Вып.8. – С.904-911.
5. Karepova E.D., Adaev I.R., Shan'ko Yu.V. Predictor-corrector mode for symmetric multistep methods with non-vanishing interval of periodicity // Lobachevskii Journal of Mathematics. – 2023. – Vol.44, Iss.1. – P.313-324. DOI: 10.1134/S1995080223010171
6. Petrakova V. Application of Machine Learning methods to correct the readings of low-cost air pollution sensors // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol.381. – Art.1052. DOI: 10.1051/e3sconf/202338101052
7. Криворотько О.И., Кабанихин С.И., Петракова В.С. Идентифицируемость математических моделей эпидемиологии: туберкулез, ВИЧ, COVID-19 // Математическая биология и биоинформатика. – 2023. – Т.18, Вып.1. – С.177-214. DOI: 10.17537/2022.18.177
8. Кононов Д.Д., Исаев С.В. Анализ киберугроз корпоративной сети на основе параллельной обработки данных Netflow // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2023. – Т.24, Вып.4. – С.663-672. DOI: 10.31772/2712-8970-2023-24-4-663-672
9. Исаев С.В., Донцов Д.Ю. Выделение групп используемых интернет-ресурсов для обнаружения внутренних источников киберугроз // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – Вып.4. – С.170-181.

10. Исаева О.С. Построение цифрового профиля устройств Интернета вещей // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2023. – Вып.2 (30). – С.36-44. DOI: 10.25729/ESI.2023.30.2.004
11. Медиевский А.В., Кириллова С.В., Кириллов К.А, Зотин А.Г., Симонов К.В. Вейвлет-анализ электроэнцефалограмм пациентов с эпилепсией // Информатизация и связь. – 2023. – Вып.3. – С.13-21. DOI: 10.34219/2078-8320-2023-14-3-13-21
12. Медиевский А.В., Хомколов И.В., Зотин А.Г., Симонов К.В. Алгоритмическое обеспечение обработки и анализа изображений медицинского эксперимента // Медицина и высокие технологии. – 2023. – Вып.3. – С.29-37. DOI: 10.34219/2306-3645-2023-13-3-29-37
13. Molokeev M.S., Kostyukov A.S., Ershov A.E., Maksimov D.N., Gerasimov V.S., and Polyutov S.P. Infrared bound states in the continuum: random forest method // Optics Letters. – 2023. – Vol.48, Iss.17. – P.4460-4463. [WoS Q2] DOI: 10.1364/OL.494629
14. Semina P.N., Isaev I.L., Komogortsev S.V., Klyuchantsev A.B., Kostyukov A.S., Blagodatova A.V., Khrennikov D.E., Kichkailo A.S., Zamay T.N., Lapin I.N., Sokolov A.E., Polyutov S.P., Karpov S.V. Towards understanding the triggering of the malignant cell death in high-efficiency magneto-mechanical anticancer therapy // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2023. – Vol.56, Iss.6. – Art.65401. [WoS Q2] DOI: 10.1088/1361-6463/acb0dd
15. Shadrina G.V., Bulgakov E.N., Sadreev A.F., Pichugin K.N. Exceptional points in periodic array of silicon rods // Applied Physics Letters. – 2023. – Vol.123. – Art.211104. [WoS Q2] DOI: 10.1063/5.0173550
16. Denisenko V.V., Rycroft M.J. Seasonal Dependence of the Equatorial Electrojets Generated by Thunderstorms // Advances in Space Research. – 2023. – In Press. [WoS Q2] DOI: 10.1016/j.asr.2023.08.017
17. Erkaev N.V., Gorbunova K.D. Magnetic barrier in front of exoplanets interacting with stellar wind // Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. – P.251-265. DOI: 10.1007/978-3-031-40728-4_18
18. Erkaev N.V. About the magnetic barrier of Venus // Planetary and Space Sciences. – 2024. – Vol. 240. – Art. 105834 [WoS Q3]
19. Kubyshkina D., Fossati L., Erkaev N. Precise photoionisation treatment and hydrodynamic effects in atmospheric modelling of warm and hot Neptunes // Astronomy & Astrophysics. – 2023. – Art. [WoS Q1]

20. Seta B., Errarte A., Ryzhkov I.I., Bou-Ali M.M., Shevtsova V. Oscillatory instability caused by the interplay of Soret effect and cross-diffusion // *Physics of Fluids*. – 2023. – Vol.35. – Art.21702. [WoS Q1] DOI: doi: 10.1063/5.0139711
21. Seta B., Errarte A., Mialdun A., Ryzhkov I.I., Bou-Ali M.M., Shevtsova V. Cross diffusion governs an oscillatory instability in a ternary mixture with the Soret effect // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2023. – Vol.25. – Art.15715. [WoS Q2] DOI: 10.1039/d3cp01848b
22. Biesheuvel P.M., Rutten S.B., Ryzhkov I.I., Porada S., Elimelech M. Theory for salt transport in charged reverse osmosis membranes: Novel analytical equations for desalination performance and experimental validation // *Desalination*. – 2023. – Vol. 557. – Art.116580. [WoS Q1] DOI: 10.1016/j.desal.2023.116580
23. Petrov K.V., Mao M., Santoso A., Ryzhkov I.I., Vermaas D.A. Design criteria for selective nanofluidic ion-exchange membranes // *Journal of Membrane Science*. – 2023. – Vol.688. – Art.122156. [WoS Q1] DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122156
24. Krasnov I.V. A hybrid mechanism of 3D optical trapping of particles immersed in a cold buffer gas // *Laser Physics*. – 2023. – Vol.33, Iss.9. – P.1-9. [WoS Q4] DOI: 10.1088/1555-6611/ace9d0
25. Lapko A.V., Lapko V.A. Fast Selection of Bandwidths for Nonparametric Estimation of the Probability Density of a Two-Dimensional Random Variable with Dependent Components // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. – 2023. – Vol.59, Iss.2. – P.193-199. DOI: 10.3103/S875669902302005X
26. Lapko A.V., Lapko V.A. Modification of a nonparametric procedure for testing the hypothesis about the distributions of random variables // *Measurement Techniques*. – 2023. – Vol.66, Iss.4. – P.223-230. DOI: 10.1007/s11018-023-02214-9
27. Lapko A.V., Lapko V.A., Tuboltsev V.P. Nonparametric System for Automatic Classification of Large-Scale Statistical Data // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2023. – Vol.33, Iss.3. – P.576-583. DOI: 10.1134/S1054661823030252
28. Morozov R., Nicheporchuk V., Perevalov I. Prototype of Urban Transport Passenger Accounting System // *Transportation Research Procedia*. – 2023. – Vol.68. – P.468-474. DOI: 10.1016/j.trpro.2023.02.063
29. Nicheporchuk V., Postnokova U. Technologies of information support of territorial safety management // *Reliability: Theory & Applications*. – 2023. – Vol.19, Iss.5 (75). – P.349-355. DOI: 10.24412/1932-2321-2023-575-349-355

30. Ноженкова Л.Ф., Ничепорчук В.В. Технологии комплексной поддержки управления природно-техногенной безопасностью // Вычислительные технологии. – 2023. – Т.28, Вып.4. – С.109-121. DOI: 10.25743/ICT.2023.28.4.009
31. Батуро А.Н., Ничепорчук В.В., Бутузов С.Ю., Гилек С.А. Управление пожарной обстановкой на основе риск-ориентированного подхода // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2023. – Вып.1. – С.67-80. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.29.76.003
32. Lapin A., Shaydurov V., Yanbarisov R. Finite difference scheme for a non linear subdiffusion problem with a fractional derivative along the trajectory of motion // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2023. – V. 38, Iss. 1. – P. 23 35.
33. Шайдуров В.В., Чередниченко О.М. Полулагранжевы аппроксимации оператора конвекции в симметричной форме // Вычислительные технологии. – 2023. – Т. 28, № 3. – С. 101-116.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ за 2021-2023 годы

1. Кононов Д. Д. Программный комплекс автоматизированной распределенной обработки журналов сетевой активности // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2023681874 от 19.10.2023. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
2. Петракова В.С. Модуль для анализа и корректировки показаний сенсорных датчиков, фиксирующих концентрацию PM2.5 в пограничном слое атмосферы // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2023619751 от 15.05.2023. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
3. Кононов Д. Д. Программный комплекс автоматизированной классификации кибератак на веб-сервисы // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022680902 от 08.11.2022. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
4. Вяткин А.В., Мальцев А.Д. Консервативный полулагранжевый метод для решения одномерного уравнения неразрывности на двух пространственных сетках с общими границами и с разными шагами по времени // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022680628 от 03.11.2022. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
5. Морозов Р. В., Ноженков А.И., Пенькова Т.Г., Ноженкова Л.Ф., Метус А.М. Веб-сервис анализа качества жизни территорий // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022666045 от 24.08.2022. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
6. Ноженков А.И., Морозов Р.В., Пенькова Т.Г., Ничепорчук В.В., Л.Ф., Метус А.М. Модуль расчета рейтинговых оценок качества жизни территорий // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022665828 от 22.08.2022. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
7. Кононов Д. Д. Система защищенного облачного пакетного транспорта на основе веб-протоколов // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022610479 от 12.01.2022. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.
8. Пенькова Т.Г., Михалев А.С., Коробко А.В., Метус А.М., Баранова Н.М., Баранов В.А., Коробко А.А., Сенашова М.Ю. Инструменты оперативного контроля снижения производительности и выявления технологических нарушений в цикле производства алюминия // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2022610237 от 10.01.2022. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.

9. Кононов Д. Д. Система организации и проведения открытых электронных торгов в сети Интернет // Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2021681607 от 23.12.2021. – Правообладатель: ФИЦ КНЦ СО РАН.