

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
Д.С.-Х.Н.
_____ А.А. Шпедт
«___» _____ 2022 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

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

Направление фундаментальных и поисковых исследований
1.1.3. Математическое моделирование
(№ 0287-2021-0003)

Руководитель НИР
руководитель научного направления
«математическое моделирование»,
член-корреспондент РАН

_____ В.В. Шайдуров

Красноярск 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы член-корреспондент РАН	_____	В.В. Шайдуров (Раздел 1)
Исполнители:		
зам. директора по научной работе ИВМ СО РАН, к.т.н.	_____	С.В. Исаев (Раздел 4)
зам. директора по научной работе ИВМ СО РАН, к.ф.-м.н.	_____	Д.А. Нестеров (Раздел 1, 2)
зав. отд., д.ф.-м.н.	_____	Н.В. Еркаев (Раздел 2)
зав. отд., к.ф.-м.н.	_____	Е.Д. Кареева (Раздел 1)
зав. отд., д.т.н.	_____	Л.Ф. Ноженкова (Раздел 3)
г.н.с., д.т.н.	_____	А.В. Лапко (Раздел 3)
в.н.с., д.ф.-м.н.	_____	В.В. Денисенко (Раздел 2)
в.н.с., д.ф.-м.н.	_____	И.В. Краснов (Раздел 2)
в.н.с., д.т.н.	_____	В.А. Лапко (Раздел 3)
в.н.с., д.ф.-м.н.	_____	И.И. Рыжков (Раздел 3)
уч. секр., к.ф.-м.н.	_____	А.В. Вяткин (Раздел 1)
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	Е.Н. Васильев (Раздел 1, 2)
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	В.С. Герасимов (Раздел 2)
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	В.А. Деревянко (Раздел 1, 2)
с.н.с., к.ф.-м.н.	_____	А.Е. Ершов (Раздел 2)

С.Н.С., К.Т.Н.	(подпись, дата)	О.С. Исаева (Раздел 3, 4)
С.Н.С., К.Т.Н.	(подпись, дата)	А.В. Коробко (Раздел 3)
С.Н.С., К.Т.Н.	(подпись, дата)	Т.Г. Пенькова (Раздел 3)
С.Н.С., К.Ф.-М.Н.	(подпись, дата)	М.Ю. Сенашова (Раздел 3)
Н.С., К.Ф.-М.Н.	(подпись, дата)	Л.В. Гилева (Раздел 1)
Н.С., К.Ф.-М.Н.	(подпись, дата)	И.Л. Исаев (Раздел 4)
Н.С., К.Ф.-М.Н.	(подпись, дата)	Л.П. Каменщиков (Раздел 2)
Н.С., К.Т.Н.	(подпись, дата)	В.В. Морозов (Раздел 3)
Н.С., К.Т.Н.	(подпись, дата)	А.И. Ноженков (Раздел 3)
Н.С.	(подпись, дата)	Д.Д. Кононов (Раздел 4)
М.Н.С., К.Ф.-М.Н.	(подпись, дата)	В.В. Деревянко (Раздел 1, 2)
М.Н.С., К.Х.Н.	(подпись, дата)	Е.В. Михлина (Раздел 1)
М.Н.С.	(подпись, дата)	В.И. Закомирный (Раздел 2)
М.Н.С.	(подпись, дата)	С.В. Козлова (Раздел 1)
М.Н.С.	(подпись, дата)	В.С. Петракова (Раздел 1)
М.Н.С.	(подпись, дата)	Н.П. Фадеева (Раздел 2)
М.Н.С.	(подпись, дата)	М.В. Якубович (Раздел 1)
прогр. 1-ой кат.	(подпись, дата)	А.А. Коробко (Раздел 3)

прогр. 1-ой кат.	(подпись, дата)	Н.В. Кулясов (Раздел 4)
прогр. 1-ой кат.	(подпись, дата)	И.А. Ларионова (Раздел 4)
прогр. 1-ой кат.	(подпись, дата)	А.В. Малышев (Раздел 4)
прогр. 1-ой кат.	(подпись, дата)	А.С. Михалев (Раздел 3)
прогр. 1-ой кат.	(подпись, дата)	А.М. Метус (Раздел 3)
ведущий инженер	(подпись, дата)	А.В. Макуха (Раздел 1, 2)
старший инженер	(подпись, дата)	Д.П. Емельянов (Раздел 1, 2)
старший инженер	(подпись, дата)	С.В. Кукушкин (Раздел 1, 2)
старший инженер	(подпись, дата)	А.А. Пустынский (Раздел 1, 2)
старший инженер	(подпись, дата)	А.А. Сиротинин (Раздел 1, 2)
старший инженер	(подпись, дата)	И.В. Тимошина (Раздел 1)
инженер-исследователь	(подпись, дата)	И.Р. Адаев (Раздел 1)
инженер-исследователь	(подпись, дата)	И.А. Харченко (Раздел 1)
инженер	(подпись, дата)	Р.А. Голубев (Раздел 1)
нормоконтроль	(подпись, дата)	А.В. Вяткин

РЕФЕРАТ

Отчёт 65 с., 29 рис., 1 табл., 1 прил.

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

В соответствии с планом работ на 2021 год исследования проводились по четырем разделам.

В разделе «Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса» рассмотрены математические модели для выявления тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры по показаниям встроенных датчиков с целью локализации положения и источника возникающих отклонений. Представлены также математические модели диффузии и термодиффузии в тройных смесях, проводимых в наземных и космических условиях, для создания и тестирования молекулярно-кинетических и термодинамических моделей. Выполнено математическое моделирование разделения бинарной смеси в колонне и его устойчивости для случая аномального эффекта Соре, когда тяжелый компонент накапливается вблизи горячей стенки и в верхней части колонны.

В разделе «Математическое моделирование физических процессов и устройств» рассмотрена математическая модель блока охлаждения для надводных и подводных судов. Кроме того, 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.

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. Представлены алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений. Разработаны методы выявления особенностей структурирования и связей выделенных структурных единиц с биологическими свойствами носителей генетической информации (таксономия, функция и т.п.).

В разделе «Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ» представлена архитектура имитационной среды для исследования проблем, связанных с безопасностью «больших данных», создаваемых

устройствами Интернета вещей (IoT); выявлены особенности функционирования облачных сервисов различных видов. Разработаны требования к моделям разграничения доступа для облачных сервисов, созданные на основе требований расширенной ролевой модели безопасности для веб-сервисов. Представлена 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 в течение двух лет и выявлению рисков безопасности, а также влияние пандемии COVID-19 на использование интернет-сервисов. Даны рекомендации для усиления защиты облачных веб-сервисов и снижения рисков кибербезопасности.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса.....	11
1.1 Математические модели для выявления тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры по показаниям встроенных датчиков с целью локализации положения и источника возникающих отклонений.....	11
1.2 Математические модели диффузии и термодиффузии в тройных смесях, проводимых в наземных и космических условиях, для создания и тестирования молекулярно-кинетических и термодинамических моделей.....	16
2 Математическое моделирование физических процессов и устройств.....	23
2.1 Математическая модель блока охлаждения для надводных и подводных судов.....	23
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.....	26
3 Исследование больших данных, обнаружение новых знаний и прогнозирование состояния сложных систем и объектов.	29
3.1 Алгоритмы выявления аномальных изменений контролируемых параметров, свидетельствующих о нарушении технологического процесса.....	29
3.2 Алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений.....	37
3.3 Методы выявления особенностей структурирования и связей выделенных структурных единиц с биологическими свойствами носителей генетической информации.....	44
4 Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ..	48
4.1 Архитектура универсальной программной среды обработки данных на основе интеграции инструментов управления и анализа “больших данных”.....	48
4.2 Методы, алгоритмы и программное обеспечение для реализации стандартизированного обмена данными между гетерогенными системами.....	49
4.3 Анализ моделей и методов безопасности при разработке систем облачных вычислений.....	53

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ А	62

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с планом работ на 2021 год по теме "Комплексное математическое, информационное, вычислительное моделирование сложных технических, физических, производственных процессов и систем" исследования проводились по следующим разделам.

1. Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса.

В этом разделе рассмотрены математические модели для выявления тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры по показаниям встроенных датчиков с целью локализации положения и источника возникающих отклонений, а также математические модели диффузии и термодиффузии в тройных смесях, проводимых в наземных и космических условиях, для создания и тестирования молекулярно-кинетических и термодинамических моделей.

2. Математическое моделирование физических процессов и устройств.

Здесь рассмотрена математическая модель блока охлаждения для надводных и подводных судов и экспериментальный стенд для проверки энергетических характеристик конструкционных узлов. 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.

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

В разделе представлены алгоритмы выявления аномальных изменений контролируемых параметров, свидетельствующих о нарушении технологического процесса. Проведен структурный анализ матрицы межгеномных связей разных штаммов вируса CoVID-19. Представлены алгоритмы формирования интегральных оценок состояния природно-техногенной безопасности территорий на основе многолетних наблюдений.

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

Здесь представлена архитектура имитационной среды для исследования проблем, связанных с безопасностью «больших данных», создаваемых устройствами Интернета вещей (IoT); выявлены особенности функционирования облачных сервисов различных видов. Разработаны требования к моделям разграничения доступа для облачных сервисов, созданные на основе требований расширенной ролевой модели безопасности для веб-

сервисов. Представлен результат анализа 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 в течение двух лет и выявлению рисков безопасности, а также влияние пандемии COVID-19 на использование интернет-сервисов. Даны рекомендации для усиления защиты облачных веб-сервисов и снижения рисков кибербезопасности.

1 Математическое моделирование процессов и устройств в условиях ближнего космоса

1.1 Математические модели для выявления тепловых полей блоков бортовой радиоэлектронной аппаратуры по показаниям встроенных датчиков с целью локализации положения и источника возникающих отклонений

Блок бортовой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) содержит источники тепла: электрорадиоизделия (ЭРИ), тепловыделяющие проводники и др. Тепло отводится по конструкциям модуля к теплоотводящему основанию. На платах и элементах модуля устанавливается некоторое распределение температуры, зависящее от режимов работы аппаратуры, условий отвода тепла и других факторов, которые могут меняться со временем. Для контроля теплового режима модуля в конструкцию встраиваются температурные датчики. Возникает задача выявления тепловых полей блока и температур ЭРИ по показаниям встроенных датчиков. Важной особенностью задачи является условие, что количество неизвестных изменяющихся параметров системы, таких как мощности ЭРИ, потоки тепла на границах, температура внешней среды и др., больше числа встроенных датчиков. Поэтому в качестве решения задачи определяется не точное значение температуры, а диапазон возможных значений температур в каждой точке блока, для полученных показаний датчиков.

Тепловое поле блока $T(P)$ является непрерывным распределением температуры, которое задается в конечном наборе узлов с правилом межузловой интерполяции. В составе модуля установлены температурные датчики в некоторых местах P_j . Индекс $j = 1, \dots, N_j$ обозначает номер датчика. Значения температур в точках расположения датчиков равны $T_1, T_2, \dots, T_{N_j}$.

Для описания процессов передачи тепла по блоку используется математическая модель M , обеспечивающая решение прямой теплофизической задачи, то есть нахождение температурного поля модуля $T(P)$ по набору входных параметров $\mathbf{q} = (q_1, q_2, \dots, q_{N_i})$. Индекс $i = 1, \dots, N_i$ обозначает номер параметра модели M . В качестве параметров $\mathbf{q}$ выступают любые непрерывные величины, которые могут изменяться в ходе работы аппаратуры и влиять на тепловое поле $T(P)$. Это мощности ЭРИ, температура окружающего воздуха, теплофизические характеристики материалов и другие величины.

Для всех значений параметров $\mathbf{q}$ должны быть заданы ограничения на нижнюю и верхнюю границы (максимум и минимум): $\mathbf{q}_{\min} \leq \mathbf{q} \leq \mathbf{q}_{\max}$. Тогда значение T в каждой точке P также будет ограничено: $T_{\max}(P) \leq T(P) \leq T_{\min}(P)$. Введем понятие неопределенности температуры в каждой точке P :

$$\Delta T(P) = T_{\max}(P) - T_{\min}(P). \quad (1.1)$$

При отсутствии температурных датчиков неопределенность температуры в каждой точке P максимальна. При установке датчика в какую-либо точку P_d значение температуры в этой точке становится известной: $T_d = T(P_d)$, а неопределенность равна погрешности датчика. Значения температур близких точек связаны между собой законами теплопередачи, которые отражает модель M . Поэтому установка датчика и получение его показания в точке P_d снижает неопределенность (разброс) возможных значений T и в других (близких) точках. Использование нескольких датчиков, установленных в разных точках, позволяет уменьшить неопределенность температуры в большем количестве точек блока. Задачей является расчет минимального и максимального значения температур в каждой точке блока P в зависимости от показаний датчиков T_j , расположенных в точках P_j : $T_{\min}(P, T_1, \dots, T_{N_j})$ и $T_{\max}(P, T_1, \dots, T_{N_j})$. Неопределенность (разброс) выявленного температурного поля соответственно определяется как разность

$$\Delta T(P, T_1, \dots, T_{N_j}) = T_{\max}(P, T_1, \dots, T_{N_j}) - T_{\min}(P, T_1, \dots, T_{N_j}). \quad (1.2)$$

Опишем алгоритм расчета минимальной $T_{\min}$ и максимальной $T_{\max}$ температур в каждой точке поля (и, соответственно, значение неопределенности ΔT) по показаниям датчиков $T_1, \dots, T_{N_j}$ для расположения P_j .

Описание алгоритма.

В первую очередь с помощью теплофизической модели M находится тепловое поле $T_0(P)$ для некоторого характерного набора параметров $\mathbf{q}_0$. Это поле будем рассматривать как базовое, относительно которого будут рассматриваться отклонения: все значения температур T и значения параметров q_j будут рассматриваться как отклонения от базовых значений.

Введем коэффициенты чувствительности температуры T в каждой точке P к изменению значений параметров:

$$\alpha_i(P) = \frac{\partial T(P)}{\partial q_i}. \quad (1.3)$$

Таким образом, для каждой точки P имеется набор α в количестве N_j .

Далее используются два допущения: 1) связь между параметрами q_j и температурами T близка к линейной зависимости, 2) разные параметры q_j влияют на температуру T

независимо (аддитивность). Тогда значение температуры можно выразить через значения параметров следующим образом (в терминах отклонения от базовых значений $T_0(P)$ и $\mathbf{q}_0$):

$$T(P) = \sum_i q_i \alpha_i(P). \quad (1.4)$$

Аналогичным образом показания температурных датчиков T в заданных точках P_j порождают набор неравенств (для каждого датчика j):

$$T(P_j) - TD \leq \sum_i q_i \alpha_i(P_j) \leq T(P_j) + TD, \quad (1.5)$$

где величина TD – погрешность датчиков. Неравенства (1.5) являются ограничениями для значений параметров q_i , которые в свою очередь ограничивают значения температуры $T(P)$ в любой точке P . Таким образом, задача сводится к определению такого максимально и минимально возможного значения $T(P)$, которое соответствует этим неравенствам.

Описанная задача представляет собой задачу линейного программирования, для решения которой эффективным является известный симплекс-метод. В данном случае требуется применять двухфазный симплекс метод, поскольку начальное приближение (так называемый нулевой вектор) может не удовлетворять ограничивающим неравенствам. Таким образом, задача определения теплового поля, а именно максимально и минимально возможной температуры в каждой точке блока для полученных показаний датчиков сводится к последовательному решению для каждой точки P двух задач линейного программирования. При этом предварительно должно быть найдено базовое решение $T_0(P)$ при параметрах $\mathbf{q}_0$ с помощью модели M (решение прямой задачи) и найдены коэффициенты чувствительности $\alpha_i(P)$. Значение коэффициентов α определяются численно. Для этого выполняется последовательное отклонение значения каждого параметра на некоторое Δq_i ; далее решается прямая задача и вычисляется изменение температуры в каждой точке относительно базового значения.

Дополнительно с помощью аналогичного подхода можно определять диапазон значений самих параметров $q_{i,min}$ и $q_{i,max}$, удовлетворяющих ограничениям (1.5). В этом случае в качестве функционалов вместо (1.4) нужно использовать непосредственно значения q_i . Для этого потребуется решить еще $2 \cdot N_i$ задач линейного программирования. Так по показаниям датчиков кроме поля температур может быть дополнительно получена важная информация о текущих значениях (о диапазонах возможных значений)

параметров: мощностей ЭРИ, тепловых потоков, температуры теплоотводящего основания под блоком и т.д.

Полезным свойством метода является возможность простого учета в модели известных дополнительных связей между значениями параметров. Например, исходя из электрической схемы электронного блока, может быть известно, что сумма мощностей тепловыделения некоторых элементов не превышает некоторого значения. Такого рода связи могут быть учтены добавлением соответствующих равенств (или неравенств) к системе (1.5).

Сравнение с экспериментом

Разработанная модель запрограммирована и проверена экспериментально на макете радиоэлектронного блока. Макет представляет собой алюминиевую рамку размером 231 мм × 174 мм толщиной 1.1 мм, на которую наклеена плата с ЭРИ (рисунок 1.1). Часть

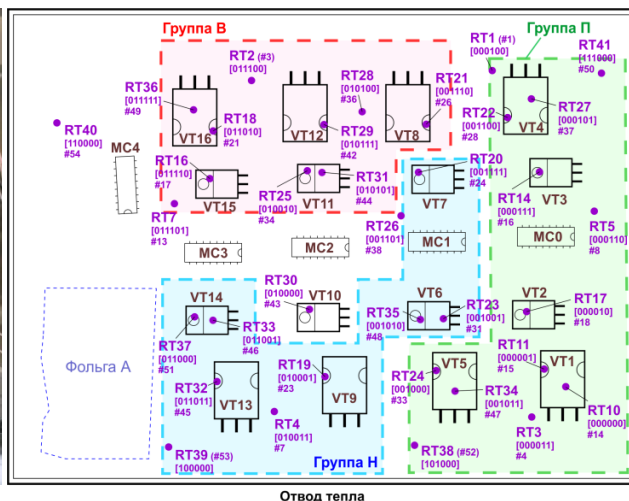
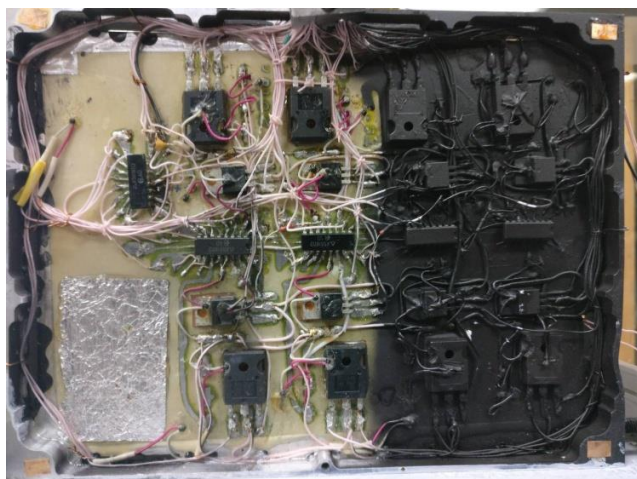


Рисунок 1.1 – Внешний вид макета электронного блока

Рисунок 1.2 – Схема макета блока (сторона А)

ЭРИ представляет собой силовые транзисторы (16 шт.), которые могут управляться независимо друг от друга и являются основными источниками выделения тепла. Макет устанавливается нижней частью на теплоотводящее основание с заданной температурой. На макете установлено 35 температурных датчиков (рисунок 1.2): на каждом транзисторе и на поверхности платы. Для работы с макетом использовался экспериментальный стенд, который обеспечивает поддержание заданной температуры теплоотводящего основания, управление нагревателями макета по заданной программе, получение показаний датчиков и термограмм.

В экспериментах с макетом задавались режимы работы нагревателей подобно режимам работы на реальных блоках. Были выбраны три группы элементов «В», «П» и

«Н» (рисунок 1.2), имитирующие три независимых функциональных узла электронной схемы. В каждой группе задано по два маломощных элемента по 0.5 Вт и по три мощных элемента: 2, 3 и 4 Вт. Группы включались как по отдельности, так и вместе во всех комбинациях. При достижении стационарного состояния считывались показания датчиков, а по модели определялось температурное поле и сравнивалось с измеренными значениями. Для выявления поля варьировалось 18 параметров (мощности ЭРИ, температуры холодильника и воздуха, поток тепла от кабелей сверху макета). Сравнения с экспериментом проводились для поверхности платы по 65 точкам по термограммам и для температур ЭРИ по установленным на них датчикам.

В таблице 1 показано сводные данные 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 – 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 28 датчиков отклонение рассчитанного температурного поля по модели довольно близко к измеренным значениям, поскольку количество варьируемых параметров (18 шт.) меньше количества датчиков и определяется погрешностью датчиков (заданной в модели ± 1 °С).

При использовании 12 датчиков (расположенных только на плате) количество варьируемых параметров становится больше количества датчиков, поэтому расчетная неопределенность температурного поля по плате и на ЭРИ возрастает соответственно до 7.4 °С и до 22.8 °С. Реальное отклонение в максимуме не превышало 3.7 °С по плате и 18.4 °С по ЭРИ.

Для третьего варианта было использовано только 4 датчика (три из них на ЭРИ, см. рисунок 4). 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.

Для четвертого варианта было использовано также 4 датчика, но заданы дополнительные связи для значений параметров (9 шт.) Используемые ограничения имитируют связи на значения мощностей тепловыделения элементов, включенных в определенную электронную схему:

$$\begin{aligned} Q_{VT1} &= Q_{VT4}, Q_{VT6} = Q_{VT14}, Q_{VT12} = Q_{VT15}, 3 \cdot Q_{VT2} = 2 \cdot Q_{VT3}, \\ 3 \cdot Q_{VT7} &= 2 \cdot Q_{VT9}, 3 \cdot Q_{VT7} = 2 \cdot Q_{VT9}, 3 \cdot Q_{VT11} = 2 \cdot Q_{VT16}, \\ 4 \cdot Q_{VT2} &= 2 \cdot Q_{VT5}, 4 \cdot Q_{VT7} = 2 \cdot Q_{VT13}, 4 \cdot Q_{VT11} = 2 \cdot Q_{VT8}. \end{aligned}$$

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 показано на рисунках 1.3 и 1.4.

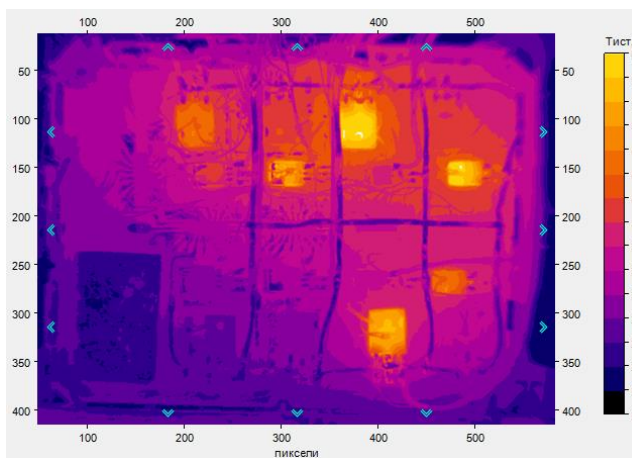


Рисунок 1.3 – Термограмма поверхности блока

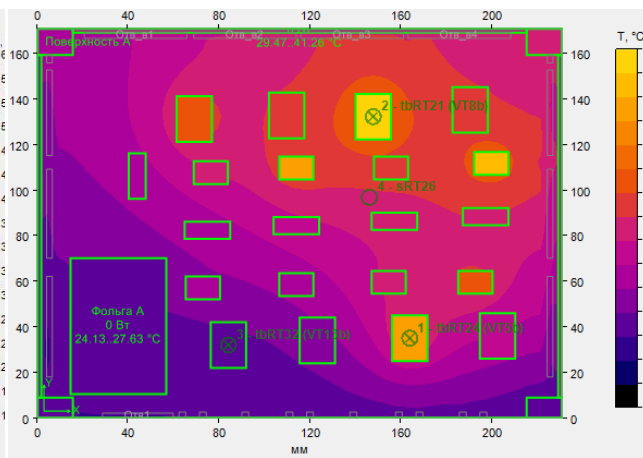


Рисунок 1.4 – Выявленное температурное поле

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

1.2.1. Исследование устойчивости 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 проводятся, в частности, в лаборатории Университета Мондрагона (Испания). В ИВМ СО РАН выполнено математическое моделирование процессов разделения, которые изучаются в указанной лаборатории, с целью более глубокого понимания и прогнозирования конвективной устойчивости течений в колонне.

В колонне смесь расположена в зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. Стенки поддерживаются при постоянных температурах $T_0 \pm \Delta T/2$, внутренний цилиндр является нагретым. 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 (13.5 К для данной смеси) конвективное течение остается устойчивым, а 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 1.6 и 1.7 иллюстрируют распределение концентрации этанола в продольном сечении колонн I и II

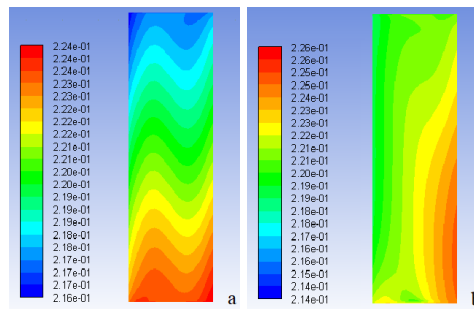


Рисунок 1.6 – Поле концентрации этанола в сечении rz в колонне I для $\Delta T = 13.5$ К: (а) 20 мин, (б) 120 мин. Левая стенка является внутренним цилиндром, колонна сжата в 100 раз.

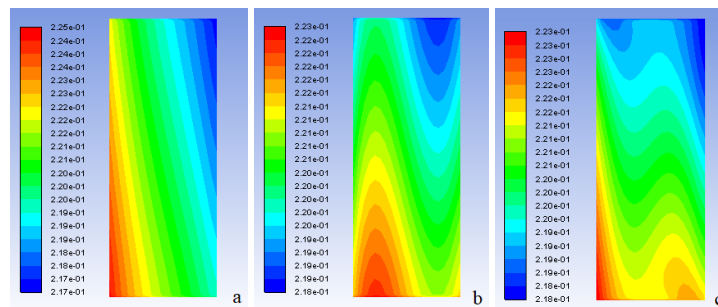


Рисунок 1.7 – Поле концентрации этанола в сечении rz в колонне II для $\Delta T = 13.5$ К: (а) 40 мин, (б) 45 мин, (с) 120 мин.

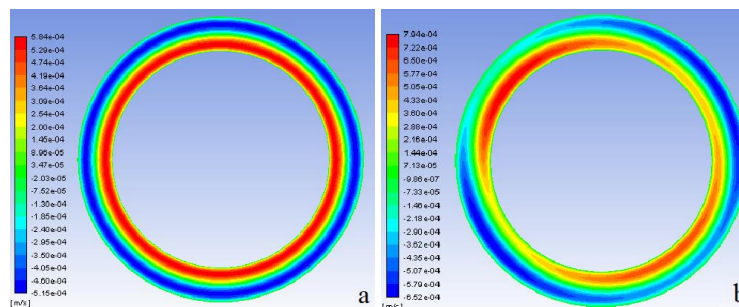


Рисунок 1.8 – Распределение модуля скорости в направлении z в колонне I при $\Delta T = 10.8$ К в сечении $z = 0$: (а) 10 мин, (б) 160 мин.

соответственно при $\Delta T = 13.5$ К в разные моменты времени (этанол является легким компонентом). Как видно из рисунка 1.6, 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 1.8 для случая $\Delta T = 10.8$ К. Видно, что с течением времени структура течения из двух встречных потоков (рисунок 1.8а) нарушается вследствие развития конвективной неустойчивости. В колонне II, наоборот, со временем наблюдается установление стационарного распределения концентрации этанола (рисунок 1.7).

Различие результатов численного моделирования и эксперимента (Phys. Rev. E. 1999. V. 59. № 1. pp. 1250–1252), объясняется 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).

1.2.2. 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 1.9) в определенном диапазоне концентраций. При приближении к этой зоне происходит уменьшение коэффициентов диффузии компонентов и соответственное увеличение коэффициента $Core$.

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 $Core$). 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 1.9 (а). На рисунке 1.9 (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)). 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

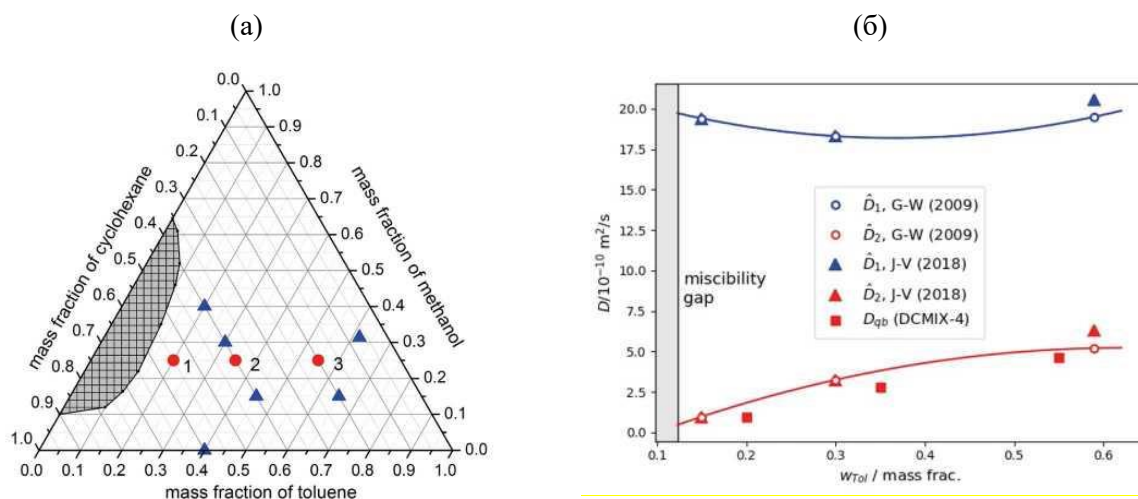


Рисунок 1.9 – Карта концентраций для смеси толуол / метанол / циклогексан (а). Образцы из ячеек DCMIX–4 указаны цифрами 1,2,3. Серым цветом показана область фазового расслоения. Зависимость наименьшего собственного значения диффузионной матрицы от концентрации толуола (красные квадраты) в сравнении с данными литературы.

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 смешения; во-вторых, два собственных значения сильно различаются: для смеси, бедной толуолом, они отличаются более чем в десять раз.

1.2.3. Транспорт ионов в нанопористых мембранах с электропроводящей поверхностью.

Процессы, основанные на мембранном разделении смесей, востребованы во многих отраслях промышленности. Перенос ионов через нанопоры мембран возникает при разделении смесей, преобразовании энергии, изготовлении химических сенсоров и т.д., что актуализирует задачи теоретического исследования данных процессов. В частности, большой интерес представляет изучение мембран, способных менять свои селективные свойства под действием внешних сил, например, электрического поля.

Рассмотрен процесс электромиграции и диффузии ионов в нанопористой мембране для трехкомпонентной смеси вода – катион (K^+) – анион (Cl^-). Мембрана разделяет два резервуара с заданными концентрациями ионов. Перенос ионов и воды происходит под действием электрического поля, определяемого различными значениями потенциала в резервуарах. Электропроводящая поверхность мембраны позволяет управлять зарядом поверхности путем приложения к ней заданного потенциала. Если размер поры сравним с длиной Дебая, то при отрицательном (положительном) заряде поверхности в поре будет

наблюдаться повышенная концентрация катионов (анионов). Это позволяет управлять транспортом ионов через поры посредством изменения поверхностного потенциала.

Мембрана с электропроводящей поверхностью моделируется как массив параллельных цилиндрических нанопор, что позволяет рассматривать перенос ионов в одной нанопоре. Предполагается, что двойной электрический слой вблизи стенок нанопоры состоит из диффузного слоя и слоя Штерна. Для исследования ионной проводимости нанопоры была построена модель пространственного заряда, основанная на стационарных уравнениях Навье-Стокса, Нернста-Планка и Пуассона. Удельная проводимость нанопоры (См/м) определяется как

$$\kappa = -\frac{I}{U} \frac{L}{A},$$

где I – ионный ток, $A = \pi R_p^2$ – площадь поперечного сечения поры.

Безразмерные функции потенциала, концентраций и давления внутри цилиндрической нанопоры ищутся в специальном виде

$$\begin{aligned}\varphi(r, z) &= \phi(z) + \psi(r, z), \quad c_{\pm}(r, z) = c_v(z) \exp(\mp \psi(r, z)), \\ p(r, z) &= p_v(z) + 2c_v(z) \cosh(\psi(r, z)),\end{aligned}$$

где функция ψ определяется из уравнения Пуассона-Больцмана. При данных допущениях связь между потоками ионов и их движущими силами записывается в виде феноменологического формализма «сила – поток». Дополняя полученную систему граничными условиями в резервуарах, разделяемых мембраной (заданные концентрации ионов, заданные (нулевые) давления и различные потенциалы) получаем двумерную задачу, для которой был разработан и реализован алгоритм численного решения (2D SC модель). В случае, когда радиус поры не превосходит длины Дебая, можно считать, что функции концентраций, давления и потенциала однородны по радиальной компоненте. Данный подход называется моделью однородного потенциала (1D UP модель).

В отчетном периоде были проведены расчеты ионной проводимости для пор различного радиуса: $R_p=2$ нм и 10 нм. Рассмотрим случай постоянного заряда на стенке поры ($\Sigma_e = \text{const}$), рисунок 1.10. При высоких концентрациях толщина диффузного слоя намного меньше, чем радиус поры, поэтому проводимость совпадает с проводимостью

исходного раствора, которая линейно зависит от логарифма концентрации

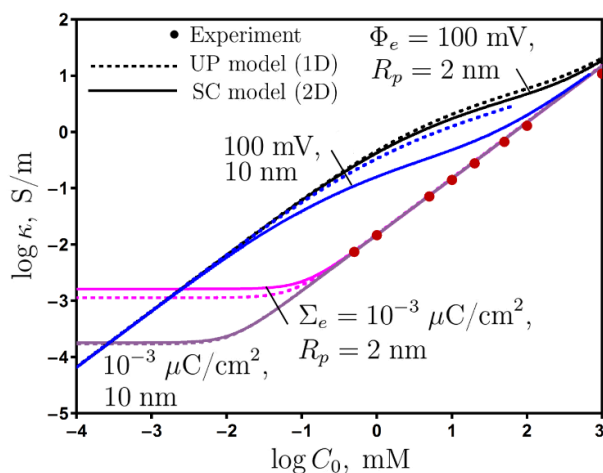


Рисунок 1.10 – Зависимость ионной проводимости нанопоры от логарифма концентрации KCl для случаев постоянного потенциала и постоянного заряда на стенке поры.

(см. экспериментальные данные на рисунке 1.10). Когда концентрация падает ниже порогового значения, проводимость становится постоянной. В этом случае диффузные слои полностью перекрываются, поэтому концентрация противоионов в нанопоре определяется поверхностной плотностью заряда и больше не зависит от объемной концентрации. Пороговое значение ниже для большего радиуса нанопор (10 нм по сравнению с 2 нм), поскольку для полного перекрытия диффузных слоев требуется большая длина Дебая. Заметим, что модель 1D UP дает несколько заниженные значения ионной проводимости по сравнению с моделью 2D SC.

Если на стенке нанопоры поддерживается постоянный поверхностный потенциал ($\Phi_e = \text{const}$), то зависимость проводимости от логарифма концентрации имеет иной характер. При низкой концентрации она линейна, но при повышении концентрации она становится нелинейной и стремится к проводимости исходного раствора. Этот переход реализуется при более низких концентрациях для нанопор с большим радиусом (10 нм в сравнении с 2 нм), поскольку в этом случае отношение дебаевской длины к радиусу поры меньше. Следует отметить, что модель 1D UP дает завышенные значения проводимости по сравнению с моделью 2D SC, особенно для нанопор радиусом 10 нм.

2 Математическое моделирование физических процессов и устройств

2.1 Математическая модель блока охлаждения для надводных и подводных судов

При создании систем охлаждения холодильных камер подводных лодок одним из требований является бесшумный режим работы. Ему удовлетворяют термоэлектрические холодильники. Актуальной задачей является создание тепловых затворов, препятствующих проникновению тепла внутрь холодильных камер при отключении термоэлектрических модулей или их выхода из строя. В этом разделе представлена математическая модель блока охлаждения, которая включает в себя расчетные алгоритмы, позволяющие получать характеристики отдельных узлов и всего блока в целом.

Конструкция термоэлектрической холодильной установки для надводных и подводных судов имеет блочную структуру; каждый блок охлаждения содержит 8 термоэлектрических модулей (ТЭМ), к которым присоединены устройства подвода и отвода теплоты. Устройство подвода теплоты осуществляет теплопередачу из охлаждаемого объема к холодной стороне ТЭМ и состоит из воздушного пластинчатого радиатора и термосифонов. От горячей стороны ТЭМ теплота отводится с помощью жидкостного теплообменника, охлаждаемого забортной водой. Регулирование работы блока охлаждения осуществляется с помощью управления силой тока питания ТЭМ, которая определяет основные характеристики процесса охлаждения.

Основными характеристиками, определяющими выбор режимов работы блока охлаждения, являются холодопроизводительность Q , потребляемая электрическая мощность W и холодильный коэффициент ε . Расчет характеристик блока охлаждения проводился с учетом рабочих характеристик ТЭМ с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад $\Delta T_e = T_1 - T_0$ с перепадами температур на отдельных элементах блока

$$\Delta T_e = R_T Q + R_s (Q + W) - \Delta T_{\text{ТЭМ}} = (R_s + R_T) Q + R_s U(I, Q) I - \Delta T_{\text{ТЭМ}}(I, Q).$$

Здесь T_1 , T_0 – значения температуры воздуха в камере и забортной воды; $\Delta T_{\text{ТЭМ}}$ – перепад температуры между горячей и холодной сторонами ТЭМ; U , I – напряжение и сила тока электропитания ТЭМ. 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. Решение нелинейной алгебраической системы уравнений для заданных значений R_s , R_T , ΔT_e и I позволяет рассчитать величины Q , W и ε .

Для температурных условий в провизионной камере ($T_p = +3\text{ }^{\circ}\text{C}$) зависимости $Q(I)$ рассчитаны для одного ТЭМ и отображены на рисунке 2.1. Графики $Q(I)$ соответствуют следующим значениям: $R_T = 0.5\text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1\text{ К/Вт}$ (линия 1), $R_T = 0.4\text{ К/Вт}$, $R_S = 0.1\text{ К/Вт}$ (линия 2), $R_T = 0.5\text{ К/Вт}$, $R_S = 0.08\text{ К/Вт}$ (линия 3). Зависимости $Q(I)$ принимают положительные значения, начиная с $I_1 \approx 0.8\text{ А}$, причем принимают максимумы, отличающиеся расположением и величиной. Зависимости холодильного коэффициента $\varepsilon(I)$ для провизионной камеры приведены на рисунке 2.2. Они также принимают положительное значение при $I > 0,8\text{ А}$ и имеют максимумы при сравнительно низких значениях силы тока $I_2 = 1.6 - 1.7\text{ А}$.

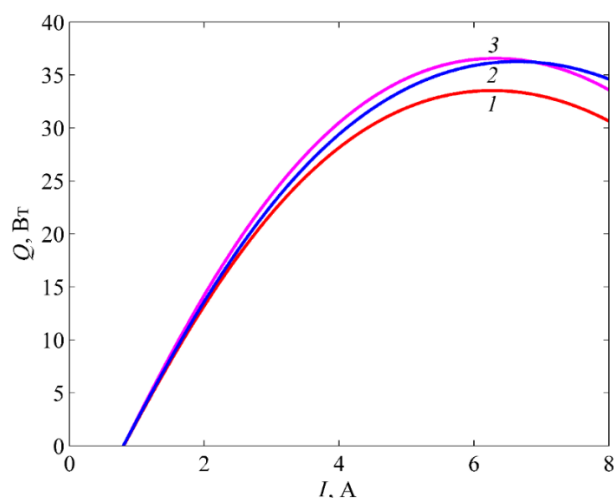


Рисунок 2.1 – Зависимости холодопроизводительности $Q(I)$ для провизионной камеры при следующих значениях термических сопротивлений: 1 – $R_T = 0,5\text{ К/Вт}$, $R_S = 0,1\text{ К/Вт}$; 2 – $R_T = 0,4\text{ К/Вт}$, $R_S = 0,1\text{ К/Вт}$; 3 – $R_T = 0,5\text{ К/Вт}$, $R_S = 0,08\text{ К/Вт}$

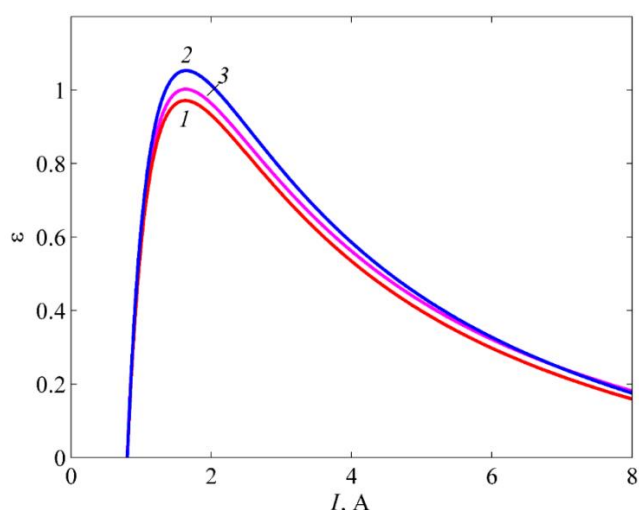


Рисунок 2.2 – Зависимости холодильного коэффициента $\varepsilon(I)$ для провизионной камеры при следующих значениях термических сопротивлений: 1 – $R_T = 0,5\text{ К/Вт}$, $R_S = 0,1\text{ К/Вт}$; 2 – $R_T = 0,4\text{ К/Вт}$, $R_S = 0,1\text{ К/Вт}$; 3 – $R_T = 0,5\text{ К/Вт}$, $R_S = 0,08\text{ К/Вт}$

Проведем анализ режимов охлаждения при значениях термического сопротивления $R_T = 0.4 \text{ K/W}$ и $R_S = 0.1 \text{ K/Wt}$ для провизионной камеры, в которой должна поддерживаться температура $T_p = +3^\circ\text{C}$ ($\Delta T_e = -17^\circ\text{C}$). Во всем диапазоне возможных значений силы тока ($0 - 7.9 \text{ A}$) для рассматриваемого ТЭМ выделим три характерных значения. При силе тока, превышающей $I_1 = 0.8 \text{ A}$, зависимость $Q(I)$ принимает положительные значения (рисунок 2.1, линия 2). Холодильный коэффициент достигает максимальное значение $\varepsilon_{\max} = 1.05$ при $I_2 = 1.64 \text{ A}$ (рисунок 2.2). Режиму максимальной холодопроизводительности соответствует сила тока $I_3 = 6.31 \text{ A}$. При этом для одного ТЭМ $Q_{\max} = 36.6 \text{ Вт}$, а суммарная холодопроизводительность блока составляет 292.8 Вт . Интервал значений $I_1 - I_3$ определяет рабочий диапазон токов питания ТЭМ, поскольку при значениях $I > I_3$ холодопроизводительность ТЭМ снижается в сочетании с одновременным ростом потребляемой мощности, а при $I < I_1$ охлаждение вообще сменяется на нагрев.

Выбор величины тока производится в диапазоне $I_1 - I_3$ и зависит от среднего значения температуры в провизионной камере. Режим максимальной холодопроизводительности требует самых высоких значений тока и потребляемой мощности. Такой режим должен задаваться только когда необходимо наиболее интенсивное охлаждение объема провизионной камеры, например, при загрузке новой партии продуктов. В обычных условиях для эксплуатации блока охлаждения целесообразны более экономичные режимы работы. Пологий характер зависимости $Q(I)$ позволяет существенно повысить экономичность охлаждения при незначительном снижении холодопроизводительности. Например, величина $Q = 0.9$ при $Q_{\max} = 32.9 \text{ Вт}$ обеспечивается при силе тока $I = 4.36 \text{ A}$. При этом значение холодильного коэффициента возрастет на 77% (с 0.3 при $I = 31 \text{ A}$ до 0.53). Температурные условия в объеме провизионной камеры характеризуются величиной $\Delta T_p = T_1 - T_p$, определяющей отклонение текущей средней температуры от заданного значения $T_p = +3^\circ\text{C}$. По мере уменьшения ΔT_p силу тока следует плавно уменьшать до значения $I_2 = 1.64 \text{ A}$, соответствующего режиму работы блока с максимальным холодильным коэффициентом. Этот режим оптимален при малых положительных значениях $\Delta T_p \approx 0 - 2^\circ\text{C}$. Величина этого интервала может меняться в зависимости от технических требований к провизионной камере. Близкие к нулю и отрицательные температуры недопустимы для хранения многих продуктов (овощи, фрукты и др.), поэтому при достижении значения температуры $T_1 = T_p$ величина силы тока должна быть уменьшена вплоть до значения I_1 , при котором дальнейшее охлаждение и снижение температуры в провизионной камере прекращается.

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) (Krasnov I.V.: Laser Phys. – 2016. – V. 26; – 2017. – V. 27), 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 (рисунок 2.3): отражение достаточно холодных частиц от односторонних

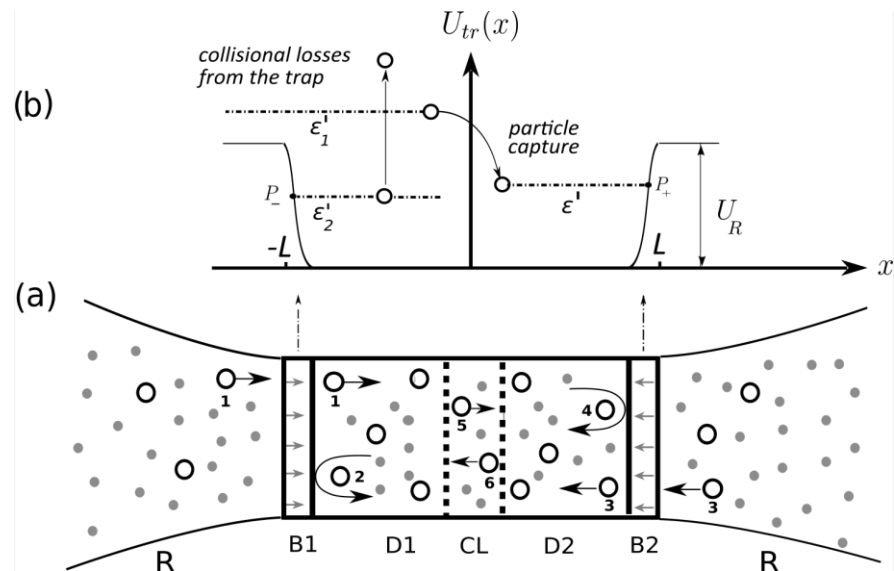


Рисунок 2.3 – Тёмная оптическая ловушка в равновесном буферном газе с резонансными примесными атомами. (а) Схематическое изображение принципа работы ловушки и основных её элементов. Области локализации светового поля B1, B2 и CL играют роль односторонних потенциальных барьеров и охлаждающего слоя соответственно, D1 и D2 – «тёмные» области, свободные от излучения, с размерами значительно больше ширины слоёв B1, B2 и CL; R – резервуар, заполненный смесью газов. (б) Захват пролётных резонансных примесных атомов в ловушку при прохождении оптического охлаждающего слоя CL с последующим пленением в области между светоиндуцированными односторонними потенциальными барьерами B1 и B2; U_R (x) – потенциал оптических сил.

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 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 $\gtrsim 10^3$. Этот коэффициент определяется как отношение количества пленённых этой ловушкой частиц к аналогичной величине для традиционно используемых консервативных тёмных оптических ловушек (при одинаковых глубинах этих ловушек). В так называемой 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%). То есть БТОЛ можно использовать как эффективное устройство для разделения газов (отделение резонансных частиц от нерезонансных в смеси газов). С практической точки зрения очень важно, что достижение этих эффектов не требует охлаждения резервуара до очень низких температур (как в традиционных подходах) и осуществимо при комнатных температурах (расчёты проводились при температуре буферного газа $T_0 = 300$ K). При этом пленённые в БТОЛ частицы имеют температуры на четыре порядка величины меньше, $T=0.05$ K. 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 (рисунок 2.3).

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 первоначальным прогнозам), что темп уменьшения времени разрушения рассматриваемой линейной

цепочки холодных ионов из-за действия квантовых флуктуаций существенно замедляется с увеличением количества ионов (рисунок 2.4).

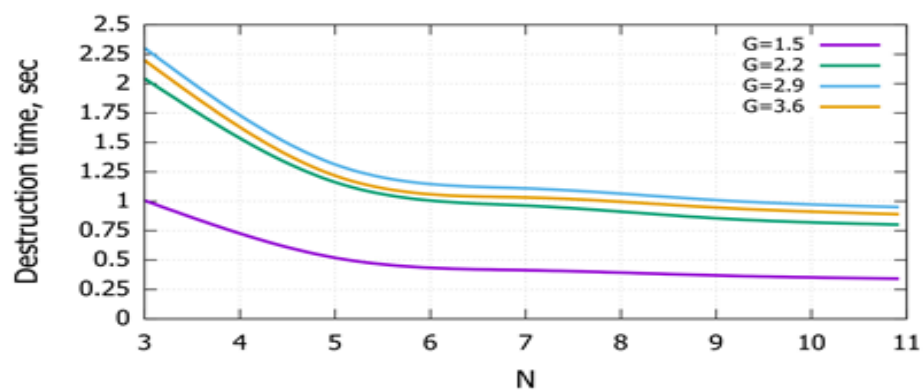


Рисунок 2.4 – Зависимость времени разрушения линейной цепочки сильно взаимодействующих ионов, удерживаемых полихроматическим световым полем от количества ионов N . G -безразмерный параметр оптической сверхрешётки с периодом $L=0.35$ мм, пропорциональный интенсивности лазерного излучения.

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. Алгоритмы выявления аномальных изменений контролируемых параметров технологического цикла производства алюминия

С целью раннего выявления отклонений в технологическом процессе и превентивной оценки рисков снижения производительности в цикле производства алюминия разработаны алгоритмические средства, позволяющие обнаруживать и прогнозировать технологические нарушения по значениям контролируемых параметров с помощью совокупности методов математической статистики, интеллектуального анализа данных и машинного обучения.

На основе применения ансамблевых алгоритмов к данным среднесуточного мониторинга разработаны прогностические модели «метаклассификации» и «голосования», которые путем выявления внутренних закономерностей в данных определяют состояние объекта, соответствующее возникновению следующих нарушений в технологическом процессе: «анодный эффект» и образование на подошве анода типа «конуса». Построение моделей включает три основных этапа: предварительная обработка данных мониторинга, прогнозирование на основе алгоритмов классификации и формирование обобщенного прогноза. Предварительная обработка данных содержит восстановление пропущенных значений, поиск и удаление аномальных значений, а также балансировку данных (когда число записей «без нарушений» значительно превышает число записей «с нарушениями»). По результатам исследования комплекса алгоритмов и анализа метрик их точности, выбраны следующие 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 метамодели. В качестве метамодели для объединения результатов прогнозирования базовых моделей используется *Logistic Regression*. На основе анализа метрик точности для прогнозирования технологического нарушения типа «конус» выбран метод *Meta Classifier*, объединяющий пять базовых алгоритмов: *Additional trees algorithm*, *Balanced Random Forest Classifier*, *XGB Classifier*, *AdaBoost Classifier* и *Balanced Bagging Classifier*. На рисунке 3.1 представлены результаты апробации модели «метаклассификации» для прогнозирования нарушения «конус» в виде матрицы ошибок для опытного участка (корпус 9 и корпус 10, РА-300, Саяногорский алюминиевый завод). Результаты апробации демонстрируют 70% истинно-положительных прогнозов; ошибки первого и второго рода приняты допустимыми для применения модели.

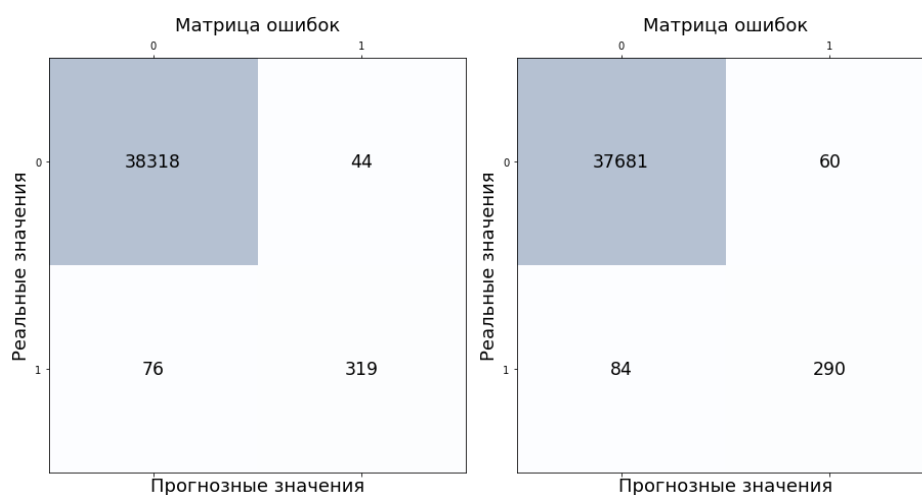


Рисунок 3.1 – Матрица ошибок для модели «метаклассификации» при прогнозировании технологического нарушения типа «конус» на опытном участке РА-300 Саяногорского алюминиевого завода (слева – корпус 9, справа – корпус 10)

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 технологических нарушений типа «конус» выбран метод *Voting Classifier*, объединяющий три базовых алгоритма: *Balanced Random Forest Classifier*, *Balanced Bagging Classifier* и *Gaussian naive Bayes algorithm*. На рисунке 3.2 представлены результаты апробации модели «голосования» для прогнозирования нарушения «конус» в виде матрицы ошибок для опытного участка (корпус 9 и корпус 10, РА-300, Саяногорский алюминиевый завод).

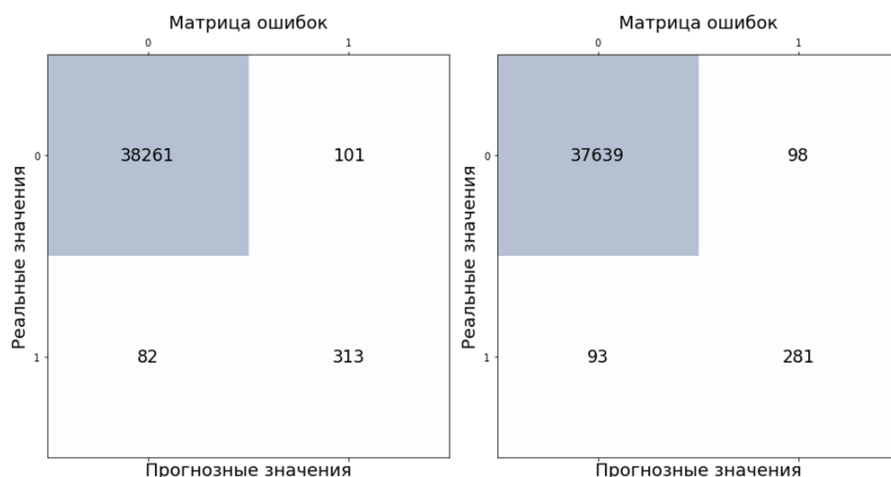


Рисунок 3.2 – Матрица ошибок для модели «голосования» при прогнозировании технологического нарушения типа «конус» на опытном участке РА-300 Саяногорского алюминиевого завода (слева – корпус 9, справа – корпус 10)

Результаты апробации также демонстрируют высокий процент истинно положительных решений и допустимые для применения модели ошибки первого и второго рода.

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 3.3 представлен график примера обнаружения нарушения, где

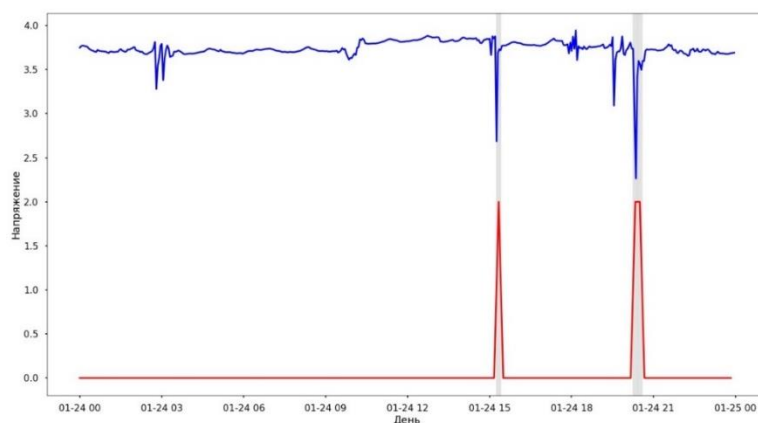


Рисунок 3.3 – Пример обнаружения нарушения «анодный эффект» на электролизере № 5 РА-550 Саяногорского алюминиевого завода

синим цветом выделены фактические значения напряжения, а красным – значение индикаторной функции:

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

Здесь $P(A)$ – вероятность обнаружения нарушения типа «анодный эффект».

На рисунке 3.4 представлены результаты апробации модели в виде матрицы ошибок для опытного участка – РА-550 Саяногорского алюминиевого завода. При классификации, как правило, используется пороговое значение 0.5. Однако оно не всегда оказывается оптимальным, особенно при дисбалансе классов, наблюдаемых в исходных данных. Пороговое значение классификатора влияет на соотношение ложноположительных и ложноотрицательных прогнозов. Чтобы увеличить количество ложноположительных (и уменьшить количество ложноотрицательных) прогнозов, величина порога уменьшена до 0.3. Результаты апробации демонстрируют высокий процент истинно положительных решений и допустимые для применения модели ошибки первого и второго рода.

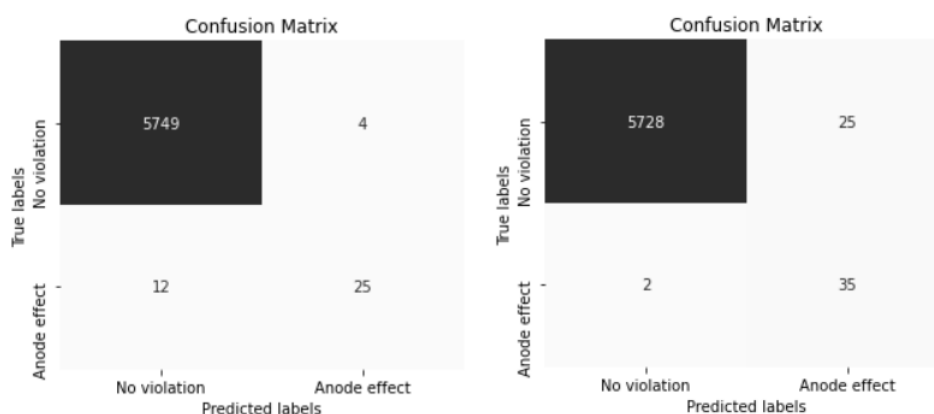


Рисунок 3.4 – Матрица ошибок для модели прогнозирования анодного эффекта на опытном участке РА-550 Саяногорского алюминиевого завода (слева – пороговое значение 0.5, справа – пороговое значение 0.3)

На основе применения технологии ассоциативных правил к данным среднесуточного мониторинга разработана модель, которая путем анализа событий-прецедентов и выявления причинно-следственных связей в данных формирует правила, определяющие состояние технологии и вероятность возникновения нарушений типа «конус». Построение модели включает два основных этапа: бинаризацию исходных данных и генерацию ассоциативных правил. Бинаризация позволяет получать множество элементов, характеризующих состояние технологии в определенный день. Сначала выполняется разделение значений каждого контролируемого параметра на непересекающиеся диапазоны, затем формируется бинарная матрица путем классификации данных по вхождению в установленные диапазоны. При определении диапазонов использовалось два подхода: общий, когда данные по электролизерам рассматриваются совместно, и индивидуальный, когда диапазоны значений параметров рассчитываются отдельно для

каждого электролизера. В качестве критериев разделения значений на диапазоны рассматривались: статистические нормы (STDDEV), квартили (QUARTILES) и характерные для возникновения нарушений диапазоны (HISTOGRAMS). В качестве дней с нарушением выбирались дни, когда были зарегистрированы нарушения, и пять предшествующих им.

Процесс генерации ассоциативных правил состоит из двух шагов: поиск в данных сочетаний элементов, встречающихся с заданной частотой – *itemset*, и формирование из найденных наборов правил вида: «Если <событие X> то <событие Y>». В качестве основных критериев оценки правил используются: поддержка (*support*) и уверенность (*confidence*). Поддержка показывает насколько часто сочетание встречается в полной выборке. Уверенность позволяет оценить, насколько часто левая часть правила встречается вместе с правой. Основными параметрами настройки модели являются: подход формирования правил (общий или индивидуальный), способ бинаризации (STDDEV, QUARTILES, HISTOGRAMS), полнота данных (с учетом или без учета пустых значений) и диапазон значений (с учетом или без учета «штатных» значений параметров). На основе анализа метрик точности для прогнозирования возникновения технологических нарушений типа «конус» выбрана модель, реализующая индивидуальный подход с бинаризацией QUARTILES, не учитывающая пустые значения и учитывающая «штатные» значения. На рисунке 3.5 представлены результаты апробации выбранной модели для

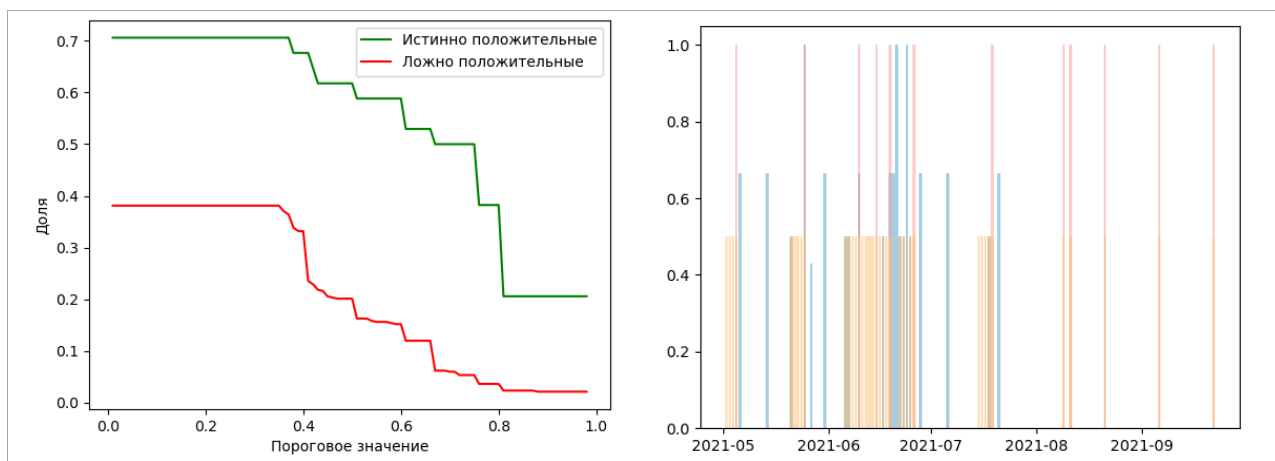


Рисунок 3.5 – Результаты апробации модели на основе ассоциативных правил для опытного участка – электролизер №7, РА-300 Саяногорского алюминиевого завода

опытного участка – электролизер №7, РА-300, Саяногорский алюминиевый завод. Период обучения: 2021.05.01 – 2021.06.30; количество нарушений в обучающей выборке – 1550; тестовый период: 2021.07.01 – 2021.09.26; количество нарушений в тестовой выборке – 479. Слева на рисунке 3.5 представлен график изменения доли истинно положительных и

ложноположительных прогнозов в зависимости от порогового значения коэффициента уверенности. При пороговом значении уверенности правил 0.4 процент истинно положительных прогнозов составляет около 70%, а ложноположительных – 10%. Справа на рисунке представлена диаграмма сопоставления прогнозов (оранжевый цвет) с фактическими нарушениями (синий цвет) и предшествующими состояниями (красный цвет).

С учетом взаимного влияния технологических параметров и особенностей функционирования комплекса производства алюминия для выявления отклонений в технологическом процессе по данным мгновенного мониторинга разработан алгоритм идентификации изменений значений контролируемых параметров «шум» и «ток на аноде». По фиксируемым значениям параметров определяются стадии развития технологических нарушений. Основываясь на результатах исследования событий возникновения технологических нарушений, диапазон значений для параметра «шума» разбивается на три интервала: $[0; 0.03)$, $[0.03; 0.06)$ и $[0.06; \infty]$. Первый интервал определяет «штатный режим» технологического процесса; второй интервал определяет процесс, протекающий с возможными нарушениями; третий интервал характеризует процесс, протекающий с явными нарушениями. После идентификации для параметра «шум» значений, характеризующих возникновение нарушений, выполняется поиск «проблемных» анодов по параметру «ток на аноде» с помощью оценок 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 – «синий» – норма; 1 – «желтый» – развитие технологических нарушений; 2 – «красный» – возникновение технологических нарушений. Обработка индикаторов выполняется последовательно. Сначала проверяется индикатор по «шуму», а 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.

3.1.2. Алгоритм анализа нарушений 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.

3.1.2.1. 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 базе прецедентов. Полученная база знаний будет эталонной для проведения анализа; обозначим её R_E .

3.1.2.2. Автоматическое построение базы знаний из программ испытаний

Из формальных описаний испытательных процедур в базу знаний записываются правила: передачи команды (передающие устройства, интерфейсы, время ожидания); приёма команды (принимающие устройства, интерфейсы, структура телекоманд, пакет данных, критерии выбора обрабатываемого 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). Сложность этого шага линейно зависит от числа критериев анализа отработки команд, заданных в испытательных процедурах. Обозначим построенную базу знаний как R_N .

3.1.2.3. Сопоставление баз знаний на основе заданных критериев анализа

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

3.1.2.4. Графическая визуализация результатов анализа

Выполняется визуализация зависимостей и ошибок в базах знаний. На рисунке 3.6 приведён фрагмент графа, узлы которого обозначают структуры правил.

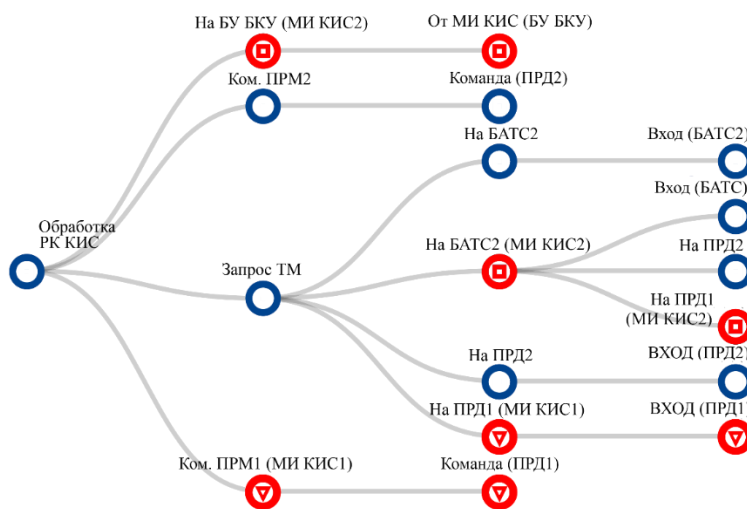


Рисунок 3.6 – Графическая визуализация результатов сопоставления баз знаний

На рисунке 3.6 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 – .

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 3.7. Отсутствующие в программах испытаний действия с командами отображаются пунктирной линией.

Предложенный алгоритм обеспечивает выявление аномалий технологического процесса испытаний. Он отличается такими свойствами, как конструктивность (легко

В настоящее время в рамках цифровизации экономики активно внедряются технологии озёр данных, облачного хранения, распределённых вычислений. В российской и международной практике отсутствуют единые требования к составу и качеству информационной базы, алгоритмам обработки данных, позволяющих обосновывать конкретные решения и контролировать ход их выполнения. Необходимы единые критерии сравнения разных оценок, применимые для территорий любых масштабов – от промышленных площадок и малых поселений до стран в целом. Важными задачами являются: создание датасетов для машинного обучения и тиражируемых аналитических моделей оценки рисков, формализация процессов управления рисками и формирование распределённых баз знаний.

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 попытке интеграции гетерогенных данных многолетних наблюдений за состоянием окружающей среды и функционированием объектов техносферы, каталогов опасных событий с экспертными оценками. Именно формализованные мнения экспертов позволяют учесть дефицит данных мониторинга и важные, но не измеряемые характеристики сложных объектов и получить интегральные оценки состояния безопасности территорий.

В результате исследований предложен «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 реализовано 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 3.8. Количество и состав источников данных многолетних наблюдений (1) определяется непосредственно аналитиком и лицами, принимающими решения исходя из задач управления территориями. Включение озёр данных (2) позволяет смягчить требования к исходным данными и исследовать их

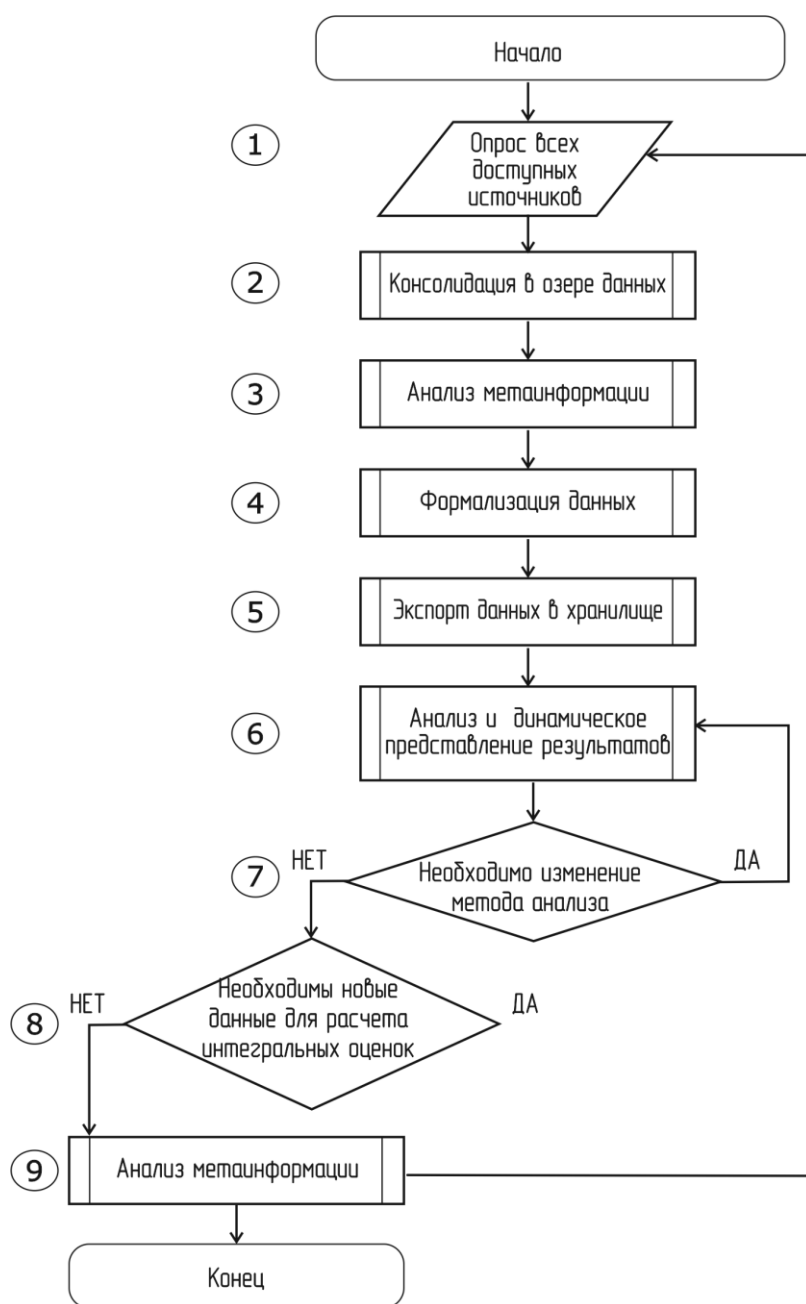


Рисунок 3.8 – Процесс получения интегрированных оценок

регламентированной актуализации. Для этого используются средства работы с метаданными (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, поиска аномалий и т.п.

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. Соответственно, расчётные методы и рекомендации по управлению рисками адаптированы для каждой категории.

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.

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 экспертных оценок. Например, факторами, 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 методы 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 – промежуточные и верхний уровень 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 включает более 70 базовых показателей. Система показателей построена на основе детального анализа паспортов, целевых показателей и планируемых результатов региональных проектов Красноярского края, учитывались национальные цели и целевые показатели федеральных и региональных проектов. Определены источники и способы получения (расчета) каждого показателя.

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 включает основные этапы:

- формирование оценок базовых показателей – расчет показателей социально-экономического развития территорий, характеризующих соответствие фактических значений нормативу и позволяющих оценить степень изменения показателей по отношению к интервалу нормативных значений;
- формирование оценок комплексных показателей – расчет показателей национальных проектов на основе оценок базовых показателей с учетом их значимости;

- интерпретация оценок показателей – преобразование количественных значений оценок в эквивалентные качественные значения в соответствии с оценочной шкалой.

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. Формирование нормативной модели включает основные этапы:

- формирование иерархической системы показателей: базовых показателей и комплексных показателей, соответствующих уровням агрегирования базовых показателей;
- определение коэффициентов значимости показателей, характеризующих вклад показателей нижнего уровня иерархии в показатели верхнего уровня; коэффициенты значимости определяются для каждой территории с учетом её физико-географических и социально-экономических особенностей;
- определение нормативных значений показателей, отражающих характерное для территории состояние, которые определяются по результатам статистического анализа накопленных данных с помощью статистических характеристик медианы и среднеквадратического отклонения;
- определение коэффициентов чувствительности оценок, позволяющих регулировать скорость изменения оценок при отклонении фактических значений от заданного норматива; выбор этих коэффициентов зависит от физико-географических и социально-экономических особенностей территорий;
- формирование оценочной шкалы для отображения количественных значений оценок в их качественные выражения.

Для лингвистической переменной «Уровень качества жизни» задается множество значений: «Улучшенный», «Хороший», «Приемлемый», «Удовлетворительный», «Пониженный», «Низкий», «Критический». Каждому значению ставится в соответствие количественное значение оценки показателя, которое с вероятностью 100% соответствует данному значению лингвистической переменной и которое служит для определения вероятности принадлежности любого другого значения количественной оценки данному значению лингвистической переменной. Формирование значений оценочной шкалы выполняется с помощью аппарата нечеткой логики и нечеткой кластеризации.

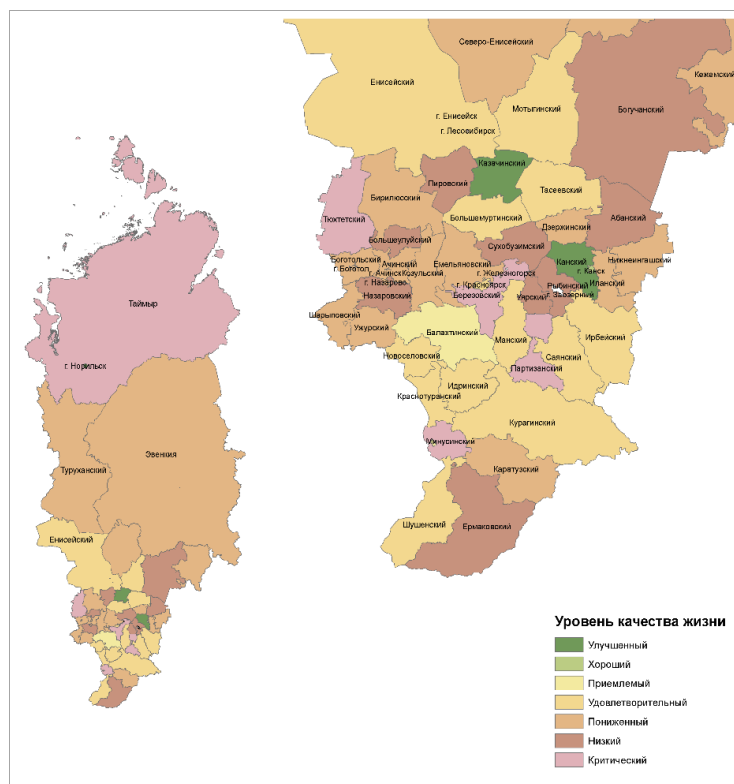


Рисунок 3.9 – Результаты оценивания качества жизни муниципальных образований Красноярского края по данным за 2020 год

Выполнена апробация предложенных методов для формирования рейтинговых оценок качества жизни муниципальных образований Красноярского края. На рисунке 3.9 представлены результаты оценивания качества жизни муниципальных образований по данным за 2020 год. Результаты показали, что большинство территорий Красноярского края демонстрируют «удовлетворительный» и «низкий» уровень качества жизни. Наиболее высокие оценки наблюдаются в Казачинском, Канском районах и Норильске. Наиболее низкие оценки наблюдаются в Минусинском, Тюхтетском, Березовском, Партизанском районах, Лесосибирске и на Таймыре. Результаты сравнения оценок с 2019 годом показали, что в 24% случаев динамика положительная; в 41% случаев динамика отрицательная. Отрицательная динамика наблюдается по показателям «Здравоохранение», «Производительность труда и поддержка занятости» и «Образование» для 52, 33 и 30 территорий соответственно.

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. Нормативная модель представляет собой информационную базу для оценивания качества жизни территорий. Предложенные принципы формирования

элементов нормативной модели могут рассматриваться в качестве универсальной методики для разработки стандарта качества жизни территорий различных уровней. Построенная иерархическая система показателей качества жизни территорий позволяет обеспечить мониторинг реализации национальных проектов и их влияние на качество жизни каждой территории.

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 $\mathfrak{M} = \{A, C, G, T\}$. Если последовательность содержит символы, отличающиеся от символов алфавита $\mathfrak{M}$, то они удаляются из последовательности, а ее длина уменьшается на число таких символов. Каждой из этих последовательностей мы будем ставить в соответствие частотный словарь толщины 3. Частотный словарь толщины 3 символьной последовательности, соответствующей ДНК — это 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 :

$$f_\omega = \frac{n_\omega}{N} \quad (3.1)$$

Всякий частотный словарь W_3 отображает символьную последовательность в 64-мерное метрическое пространство; близость двух геномов задается естественным образом — например, как близость двух точек в Евклидовой метрике:

$$\rho(W_3^1, W_3^2) = \sqrt{\sum_{\omega=AAA}^{TTT} (f_\omega^1 - f_\omega^2)^2}. \quad (3.2)$$

Для выявления структуры в наборе генов проводилась предварительная обработка, которая ставила в соответствие данному набору символьных последовательностей множество точек в 64-мерном пространстве триплетов. Каждому гену соответствует своя

точка. 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.

Для каждого гена был построен частотный словарь $W_{(3,3)}$. Частотный словарь $W_{(3,3)}$ представляет собой множество частот триплетов, причем триплеты в гене брались без пересечения троек символов. Для генов, находящихся в обратном стренде, частотный словарь строился с учетом того, что символьная последовательность, относящаяся к таким генам, инвертировалась. Частотный словарь соответствует точке в 64-мерном пространстве. Таким образом, каждому гену соответствует точка в пространстве частот триплетов. Для визуализации пространственной структуры, образованной множеством этих точек, была построена проекция в пространство первых трех главных компонент.

Были рассмотрены 570 геномов хлоропластов и 45 геномов цианобактерий. Из полных геномов были выделены гены фотосистем. Было рассмотрено распределение точек, соответствующих генам, в пространстве частот триплетов. Обнаружено, что и гены хлоропластов и гены цианобактерий образуют два больших кластера, один из которых включает точки, относящиеся к генам прямого стренда (обозначены красным цветом), а другой – точки, относящиеся к генам обратного стренда (обозначены зеленым цветом) (рисунок 3.10 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.

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 3.10б) 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.

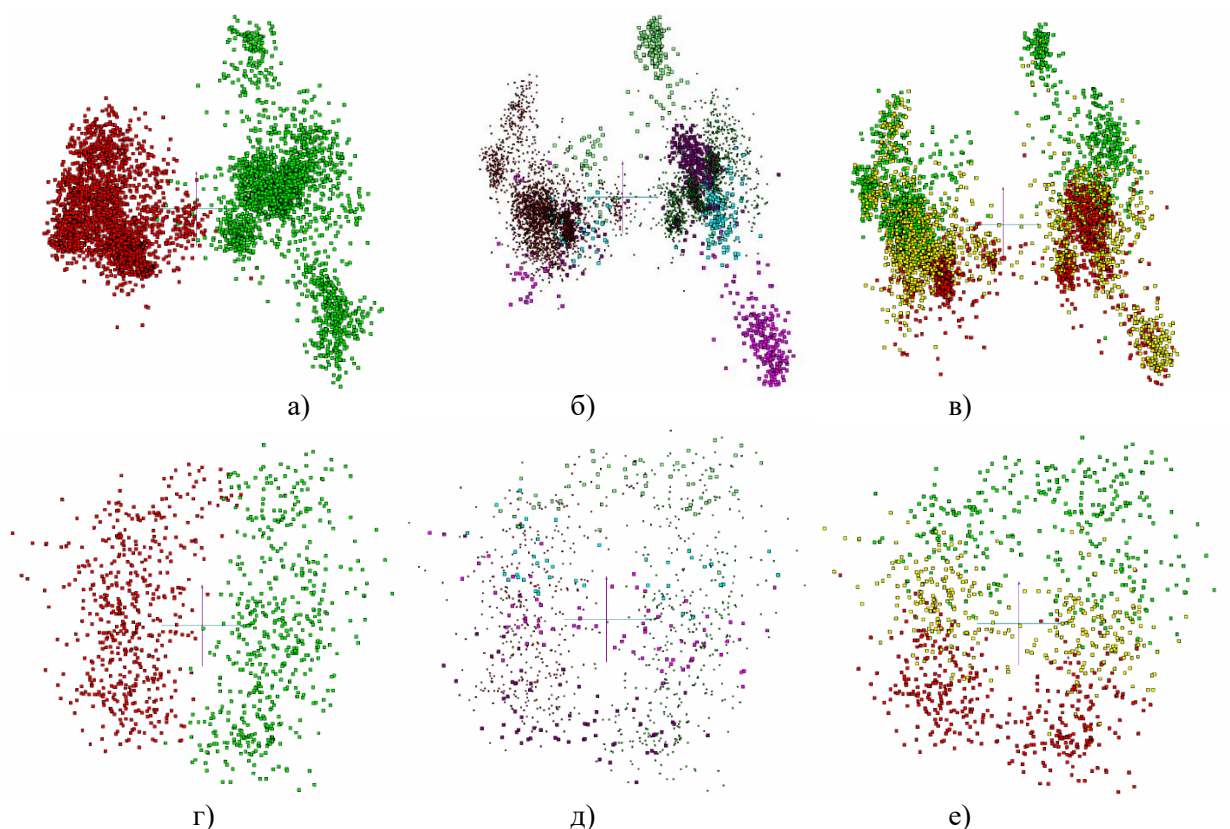


Рисунок 3.10 – Распределение генов фотосистем по стрендам а, г), типу генов и видам организмов б, д) и величине GC-состава в, е). Точки показаны в плоскости первой и второй главных компонент.

На рисунке 3.10д) показаны гены, относящиеся к *Gloeobacter kilaueensis* 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 зеленом 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. Это отличает гены хлоропластов от полных геномов хлоропластов, митохондрий и бактерий, для которых характерны два типа распределения: градиентный и центральносимметричный. Для цианобактерий величина GC-состава генов расположена по возрастанию значений от меньшего (зеленые точки) к большему (красные точки). Точки со средними значениями

обозначены желтым цветом. То есть для величины GC-состава генов фотосистемы цианобактерий имеет место градиентное распределение в пространстве частот триплетов. Такой тип распределения часто встречается у полных геномов. В частности, он встречается у геномов хлоропластов, у геномов митохондрий высших растений, водорослей, мхов, лишайников и грибов и у GC-богатых бактерий.

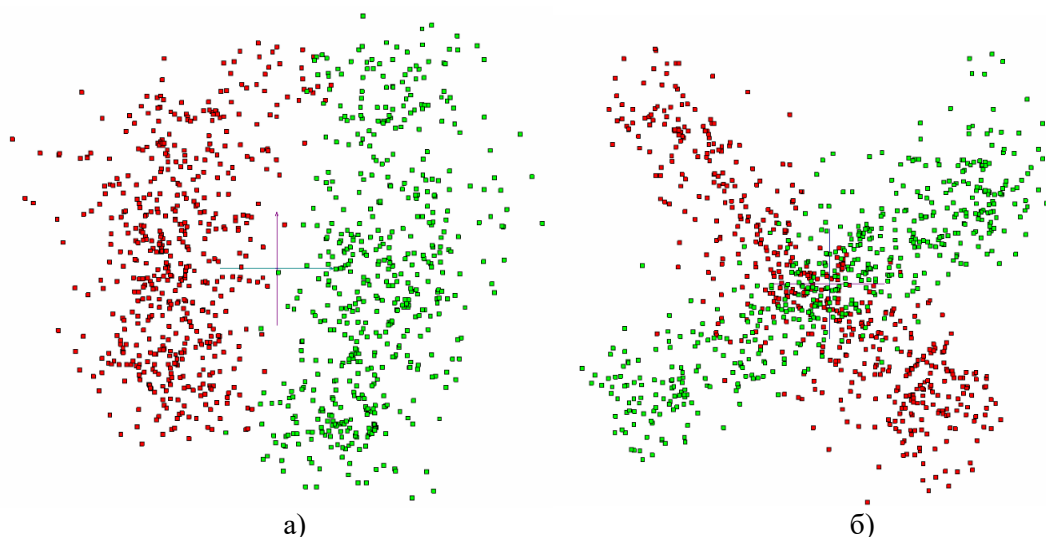


Рисунок 3.11 – Гены фотосинтетической системы I и II цианобактерий. Красным цветом обозначены гены, лежащие в прямом стренде, зеленым – в обратном. На рисунок а) вид в плоскости 1-ой и 2-ой главных компонент, на рисунок б) вид в плоскости 2-ой и 3-ей главных компонент.

Для цианобактерий было обнаружено очень нетипичное расположение точек, соответствующих генам фотосистемы. Гены, относящиеся к прямому и обратному стренду образуют два кластера, близких по количеству принадлежащих им точек. То есть количество генов, лежащих в прямом и обратном стренде, примерно равно. Причем точки, принадлежащие одному стренду, могут быть хорошо аппроксимированы вложенной плоскостью. Кроме того, плоскости, соответствующие точкам каждого стренда, перпендикулярны (рисунок 3.11).

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.

4 Технологии создания информационно-аналитических систем на основе интегрированных платформ

4.1 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.

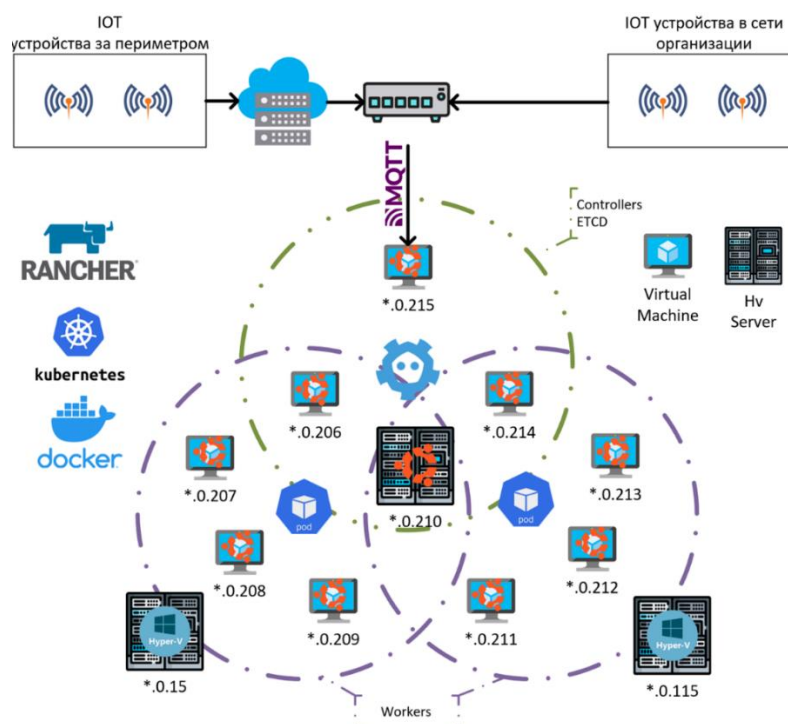


Рисунок 4.1 – Архитектура имитационной среды для сбора и анализа данных IoT

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. Их объединение реализует инфраструктуру устройств. Далее идёт 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 4.1.

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. На всех узлах использована ОС Ubuntu server 20.04. Кластер K8s развёрнут поверх системы контейнеризации Docker. 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». Серверы различаются конфигурациями настроек безопасности, что позволит накапливать и анализировать сетевые аномалии в обращениях на телекоммуникационных узлах и устройствах IoT.

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

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

Предложен технологический подход к организации обмена данными между гетерогенными системами. Подход заключается в применении иерархической унифицированной модели, в терминах которой может быть представлена любая структура данных, и последующем выполнении преобразований 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 представляется в виде пары: $M = (\langle O_{In}, I_{In} \rangle, \langle O_{Out}, I_{Out} \rangle)$, где I – системы информационного обмена, O – объекты информационного обмена. Каждая система может участвовать в информационном обмене в качестве «отправителя» (I_{In}) или «получателя» (I_{Out}). Система информационного обмена характеризуется рядом параметров, описывающих ее особенности: способ хранения данных, параметры доступа к данным, канал связи и др. Объект информационного обмена можно представить как тройку: $O = \langle D, F, S \rangle$, где D – передаваемые или получаемые системой данные, F – формат хранения данных, S – структура, в которой представлены данные. Для «отправителя» и «получателя» объект информационного обмена определяется как $O_{In} = \langle D_{In}, F_{In}, S_{In} \rangle$ и $O_{Out} = \langle D_{Out}, F_{Out}, S_{Out} \rangle$ соответственно. Процесс унифицированного обмена данными заключается в преобразовании информационного объекта «отправителя» в информационный объект «получателя» на основе формирования унифицированного представления структур данных и может быть представлен следующей цепочкой:

$$\begin{aligned} O_{In} \langle D_{In}, F_{In}, S_{In} \rangle &\xrightarrow{Q \langle D_{In}, S_{In} \rangle} U_{In} \langle D_{In}, S_{In} \rangle \xrightarrow{G \langle U_{In}, S_{Out} \rangle} U_{Out} \langle D_{Out}, S_{Out} \rangle \\ &\xrightarrow{\bar{Q} \langle D_{Out}, S_{Out}, F_{Out} \rangle} O_{Out} \langle D_{Out}, F_{Out}, S_{Out} \rangle, \end{aligned} \quad (4.1)$$

где Q – оператор унификации, выполняющий преобразование данных «отправителя» в унифицированный вид: $Q: O_{In} \rightarrow U_{In}$, U_{In} – данные «отправителя» в терминах унифицированной модели; $\bar{Q}$ – оператор деунификации, выполняющий преобразование данных в терминах унифицированной модели в формат данных «получателя»: $\bar{Q}: U_{Out}, F_{Out} \rightarrow O_{Out}$, где U_{Out} – данные «получателя» в терминах унифицированной модели, F_{Out} – это формат хранения данных «получателя». При этом унифицированная модель U представляет собой некоторую универсальную иерархическую структуру, независимую от формата данных, в терминах которой может быть представлена любая структура данных. G – оператор, выполняющий преобразование унифицированной структуры данных «отправителя» в унифицированную структуру данных «получателя»: $G: U_{In}, S_{Out} \rightarrow U_{Out}$. Оператор G работает с определенной парой структур (структурой данных «отправителя» и структурой данных «получателя») и не зависит от содержания данных, что позволяет использовать оператор многократно для обмена данными заданных структур. На рисунке 4.2 представлена концептуальная модель унифицированного обмена данными в виде диаграммы классов.

элементами формирует сценарий преобразования данных $A(S_{In}, S_{Out})$ в виде последовательности команд выполнения операций над элементами унифицированных структур данных (перестановка, удаление, агрегация, перерасчет и др.). Учитывая особенности структур входных и выходных данных, а также возможные изменения самих данных, сценарий преобразования данных имеет строго однонаправленный характер, обратное преобразование выполняется по отдельному сценарию. Построенный сценарий преобразования данных сохраняется в базу данных *Central DB* для дальнейшего применения.

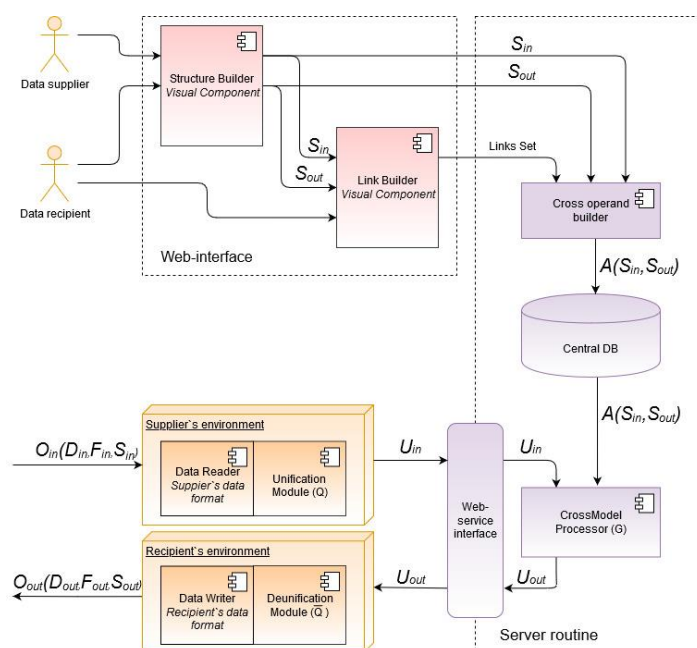


Рисунок 4.3 – Архитектура программных средств организации унифицированного обмена данными

Этап применения (нижняя часть диаграммы) направлен непосредственно на преобразование данных. На вход цепочки преобразования «отправителем» передается объект информационного обмена $O_{In} = \langle D_{In}, F_{In}, S_{In} \rangle$. Формирование унифицированного представления выполняется с помощью двух модулей: *Data Reader* и *Unification Module*. *Data Reader* – модуль, выполняющий считывание данных из источника в формате «отправителя» (F_{In}). *Unification Module* – модуль унификации (Q), выполняющий перевод считанных данных в термины унифицированной модели (U_{In}) и освобождающий данные от их физической природы – формата хранения (F_{In}). С целью устранения возможных конфликтов политик безопасности, модули работают на стороне «отправителя» (*Supplier's environment*). На сервер обработки передаются готовые к дальнейшему преобразованию данные в унифицированном виде (U_{In}). *Cross Model Processor (G)* – модуль преобразования, выполняющий преобразование данных отправителя в унифицированном

виде (U_{In}) в требуемые получателем данные в унифицированном виде (U_{Out}) на основе заданного сценария $A(S_{In}, S_{Out})$. Сценарий преобразования выбирается из базы данных *Central DB* по паре структур (S_{In}, S_{Out}), где S_{In} – структура, в которой представлены унифицированные данные «отправителя» (U_{In}), S_{Out} – структура, в которой представлены унифицированные данные «получателя» (U_{Out}). В результате обработки – выполнения команд сценария – модулем преобразования *Cross Model Processor* формируются данные «получателя» в терминах унифицированной модели (U_{Out}).

Формирование объекта информационного обмена «получателя» выполняется на стороне «получателя» (*Recipient's environment*) с помощью двух модулей: *Deunification Module* и *Data Writer*. *Deunification Module* – модуль деунификации ($\bar{Q}$), выполняющий перевод данных в терминах унифицированной модели (U_{Out}) в данные в формате хранения «получателя» (F_{Out}). *Data Writer* – модуль, выполняющий запись объекта информационного объекта «получателя» $O_{Out} = \langle D_{Out}, F_{Out}, S_{Out} \rangle$ в хранилище. Обмен данными между сервером обработки и клиентским окружением «отправителя» и «получателя» осуществляется посредством *Web-service* интерфейса. Возможность хранения сценария преобразования $A(S_{In}, S_{Out})$ позволяет при однократной подготовке структур данных многократно выполнять преобразование данных из структуры S_{In} в структуру S_{Out} . Представленная архитектура программных средств обеспечивает унифицированный обмен данными между гетерогенными системами с учетом вариативности форматов хранения данных и условий функционирования взаимодействующих систем.

4.3 Анализ моделей и методов безопасности при разработке систем облачных вычислений

В настоящее время все больше повседневных задач переносятся в киберпространство путем внедрения различных информационно-телекоммуникационных технологий. Коммерческие компании, а также государство предоставляют свои услуги посредством сети сервисов Интернета. Сбор данных, обработка, анализ и предоставление результатов осуществляются с использованием веб-технологий, которые не требуют от пользователя установки дополнительного программного обеспечения. За последние годы сложность веб-сайтов и веб-сервисов сильно возросла, что увеличивает издержки по содержанию серверного оборудования поставщиков услуг. Активно развивающиеся облачные технологии позволяют снизить затраты на содержание оборудования вплоть до полного отказа от собственных центров обработки данных. Однако использование облачных технологий требует решения ряда проблем кибербезопасности. Одним из

аспектов является создание новых методов создания безопасных веб-сервисов и облачных приложений на их основе. Проблема обеспечения безопасности облачных систем и сервисов является актуальной и активно изучается другими исследователями.

Следует отметить, что веб-системы и веб-сервисы для своей работы используют открытую сеть Интернет, поэтому существуют риски, связанные с информационной безопасностью. Обеспечение информационной безопасности является комплексной задачей и включает набор мероприятий, которые необходимо выполнять для снижения рисков угроз. Важной частью является анализ журналов активности веб-сервисов, что позволяет выявлять веб-атаки и производить оптимизацию настроек оборудования. Для адекватной оценки уровня угроз необходимо привлечение экспертов в области компьютерной безопасности. В ряде статей показано, что угрозы могут повышаться при использовании различных технологий, применяемых при разработке веб-сервисов. Необходимо также выполнять анализ активности сервисов для выявления слабых мест инфраструктуры (CPU, память, дисковые и сетевые операции) с целью уменьшения последствий повышенных нагрузок, в том числе во время атак на сервисы. Разрабатываются методы проактивного планирования ресурсов с использованием технологии симуляции загрузки полосы пропускания. Анализ эффективности работы инструментов защиты должен осуществляться без побочных эффектов для существующей сети.

Облачные сервисы можно разделить на три вида: публичные, частные, гибридные. Публичные облака предоставляют доступ широкому кругу лиц. Частные облака создаются крупными организациями, которые не могут себе позволить риски, связанные с публичными облаками. Гибридные облака являются компромиссным вариантом между публичными и частными облаками: критически важные данные и сервисы выполняются в частном облаке, при этом публичные данные размещаются на публичных облачных сервисах.

Решение по использованию облачных технологий должно быть основано на анализе рисков и угроз. Использование облачных технологий способно как увеличить, так и уменьшить степень защищенности информационных систем. К достоинствам использования облачных технологий можно отнести: использование веб-технологий, виртуализации, разделение зон ответственности, экономическая выгода при масштабировании, наличие дополнительных инструментов провайдера для обеспечения информационной безопасности защиты. Недостатки при использовании облачных технологий: зависимость от технологий разработчика, передача данных через публичные сети, уязвимости веб-браузеров, время реагирования на инциденты безопасности.

Использование облачных технологий накладывает следующие требования к моделям разграничения доступа.

Распределённость и высокая нагрузка. Как правило, провайдеры облачных сервисов предоставляют сервисы с высокой нагрузкой, что подразумевает использование множество рабочих узлов (кластерная архитектура), которые обрабатывают запросы параллельно. Более того, облачные провайдеры позволяют автоматически создавать новые виртуальные узлы при изменении числа запросов в системе, в результате создаются дополнительные ресурсы для обработки повышенной нагрузки. По мере снижения нагрузки, число обрабатывающих узлов может снижаться автоматически.

Сложность управления. Управление облачными системами отличаются от классических приложений, которые выполняются на одном узле. Сложная распределённая архитектура облачных технологий требует использования продвинутых методов и средств управления и мониторинга.

Время отклика. Облачные системы обслуживают множество клиентов, создавая высокую нагрузку на оборудование. Атаки на облачные сервисы также проводятся с привлечением большого числа вредоносных хостов, что предъявляет высокие требования к средствам защиты для полного предотвращения последствий или минимизации наносимого ущерба. Для этого системы предотвращения вторжений и противодействия атакам должны обеспечивать минимальное время ответа.

Анализ использования интернет-сервисов.

Проведенный анализ корпоративной сети ФИЦ КНЦ СО РАН за 2019-2020 годы показывает общую тенденцию увеличения активности использования веб-сервисов: среднесуточный трафик за 2020 год (329 Гб) в 1.5 раза больше, чем в 2020 году (224 Гб); корреляция по датам разных лет слабая (0.38). Особенностью этого периода является начало действия фактора эпидемии COVID-19 весной 2020 года. Если в 2019 году активность довольно плавно возрастает в течение всего года с провалами в длинные выходные дни, то в 2020 году наблюдается резкое снижение активности в 2 раза в конце марта в связи с введением самоизоляции и дистанционного режима работы. На прежние уровни активность выходит только осенью и снова спадает к концу года на фоне второй волны COVID-19. Анализ активности по дням недели (рисунок 4.2) показывает, что при общем сохранении формы профиля активности в 2020 году (корреляция 0,99) примерно на 10% выросла активность в выходные дни, что, вероятно, связано с активным использованием удаленных рабочих мест. Сравнительный анализ использования

протоколов HTTP и HTTPS показывает увеличение доли последнего (с 86% до 91%), что снижает уровень киберугроз.

Проведенный анализ попыток доступа по протоколу HTTP показал коэффициенты вариации за 2019 и 2020 год соответственно 1.76 и 0.65, а по протоколу HTTPS 0.61 и 0.35. Таким образом, можно сделать вывод об уменьшении количества интенсивных атак в 2020 году по сравнению с 2019 при сохранении примерно в 2 раза большей интенсивности атак по протоколу HTTP. Посчитанные параметры коэффициента вариации позволяют строить модели выявления атак, а также моделировать штатный режим работы веб-сервисов.

На рисунке 4.4 приведены графики трендов количества запросов в 2019 и 2020 годах. Анализ показал зависимость числа запросов от праздничных дней, при которых число запросов снижается. Активность запросов сохраняется высокой с понедельника по пятницу, а в субботу и воскресенье наблюдается снижение до 40%, что свидетельствует об использовании веб-сервисов преимущественно в рабочие дни.

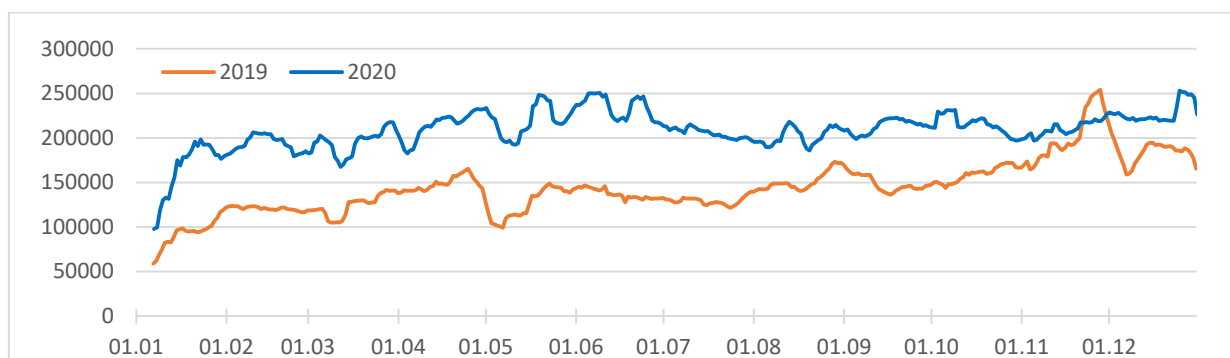


Рисунок 4.4 – Ежедневное количество запросов на веб-сервисы за 2019 и 2020 годы

На рисунке 4.5 приведены графики трендов количества ошибок за 2019 и 2020 годы. Пиковые значения на графиках свидетельствуют о наличии аномальной активности при выполнении запросов. Большая часть ошибок вызвана активностью веб-пауков, которые условно можно разделить на три группы: поисковые, исследовательские и вредоносные.

Был посчитан коэффициент корреляции запросов и ошибок, который составил 0.35 (2019 год) и 0.38 (2020 год), что свидетельствует о наличии слабой связи между запросами и ошибками вследствие неправильной работы веб-сервисов. Однако большая часть ошибок вызвана сканированиями и атаками со стороны веб-пауков. Коэффициент корреляции для запросов за 2019 и 2020 годы составил 0.99, а для ошибок – 0.96. Как видно из графиков, характер и профиль запросов и ошибок сохраняется в 2019 и 2020 годах. Среднее количество ошибок за 2020 год выросло более чем на 60%. Коэффициент

вариации в 2019 составил 1.99, в 2020 году – 1.01, что свидетельствует об уменьшении количества интенсивных атак на веб-ресурсы примерно в 2 раза – это согласуется с анализом сканирований по портам HTTP (80) и HTTPS (443).

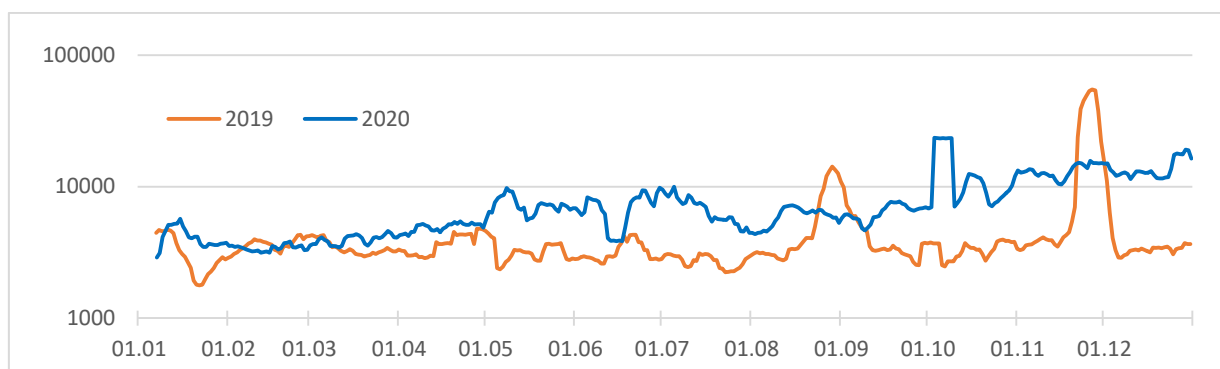


Рисунок 4.5 – Ежедневное количество ошибок за 2019 и 2020 годы

Анализ показывает увеличение доли ботов и веб-пауков в общем количестве запросов, что делает актуальными исследование различных методов борьбы с ними. Исследовалась эффективность технологии CAPTCHA (Completely Automated Public Turing Test to tell Computers and Humans Apart) для отделения реальных пользователей от ботов на основе Google reCaptcha. Показано, что использование различных приемов позволяет обойти эту защиту в более чем 50% случаев. Это позволяет сделать вывод об актуальности совершенствования моделей защиты на основе методов искусственного интеллекта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В разделе 1.1 представлена математическая модель и описан алгоритм выявления 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, что измеренные значения температур лежат в пределах выдаваемых моделью диапазонов возможных температур в каждой точке блока. Ширина диапазонов (неопределенность) выявляемого теплового поля увеличивается с уменьшением количества датчиков и снижается при добавлении дополнительных связей между значениями варьируемых параметров. Таким образом, можно достигать достаточно высокой точности выявления тепловых полей (погрешностью менее $5 - 10^{\circ}\text{C}$) при использовании небольшого количества датчиков. Разработанная модель может быть использована в системах контроля тепловых режимов для выявления отклонений и локализации неисправностей в электронном оборудовании.

В разделе 1.2 представлено математическое моделирование разделения бинарной смеси в колонне и его устойчивости для случая аномального эффекта Соре, когда тяжелый компонент накапливается вблизи горячей стенки и в верхней части колонны. Вывод об устойчивости разделения, полученный в экспериментах Университета Мондрагон (Испания), подтвержден численным моделированием.

С помощью математического моделирования изучена зависимость ионной проводимости нанопористых мембран с электропроводящей поверхностью от концентрации электролита. Установлено различие в поведении ионной проводимости для нанопор с постоянной плотностью заряда и постоянным потенциалом при малых концентрациях. В частности, при постоянном заряде проводимость не зависит от концентрации, а при постоянном потенциале линейно зависит от концентрации.

В разделе 2.1 представлена математическая модель блока охлаждения для термоэлектрической холодильной установки для надводных и подводных судов. На основе модели проведены расчеты при различных условиях работы и вариантах компоновки. Получены зависимости холодильного коэффициента и хладопроизводительности от силы тока с учетом термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты термоэлектрического блока охлаждения. По полученным зависимостям определены значения силы тока, при которых реализуются режимы

максимального холодильного коэффициента, а также минимальной и максимальной холодопроизводительности. Проведенный анализ режимов блока охлаждения позволил определить оптимальную величину силы тока с целью поддержания заданной температуры и повышения эффективности охлаждения.

В разделе 2.2 представлена математическая модель слабо-диссипативной бихроматической тёмной оптической ловушки, погруженной в равновесный газ с примесью резонансных атомов. Проведённые исследования продемонстрировали перспективность использования предложенных схем лазерного охлаждения и долговременного пленения атомов и ионов с помощью бихроматических и полихроматических пространственно структурированных лазерных пучков и выявить необычные особенности кинетики частиц в резонансном световом поле.

В разделе 3.1 представлены модели и алгоритмы, позволяющие обнаруживать и прогнозировать технологические нарушения типа «конус» и «анодный эффект» в производстве алюминия по значениям контролируемых параметров с применением совокупности методов математической статистики, интеллектуального анализа данных и машинного обучения. Выполнена апробация моделей на данных опытного участка Саяногорского алюминиевого завода (технология РА-300 и РА-550). Результаты демонстрируют приемлемую точность для практического применения моделей и алгоритмов, а также необходимость дальнейших исследований и разработок алгоритмов для получения более точного прогноза.

В этом же разделе представлен 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 бортовой аппаратуры.

В разделе 3.2 предложен «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 реализовано за счёт оригинальной организации консолидации и хранения данных. Практическая апробация метода проведена для базовых рисков территорий Сибири.

В разделе 3.3 представлены методы выявления особенностей структурирования и связей выделенных структурных единиц с биологическими свойствами носителей генетической информации (таксономия, функция и т.п.). Для 570 геномов хлоропластов и 45 геномов цианобактерий выделены гены фотосинтетических систем I и II. Для них рассмотрены распределения, а также их кластеризация по таксономии либо по функции и распределение величины GC-состава в пространстве частот триплетов. Обнаружено, что гены хлоропластов и цианобактерий отличаются по этим пунктам. Это может объясняться длительным сроком самостоятельной эволюции хлоропластов и цианобактерий после происхождения от общего предка.

В разделе 4.1 для исследования проблем, связанных с безопасностью «больших данных», создаваемых устройствами Интернета вещей (IoT), представлена 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. Их объединение реализует инфраструктуру устройств. Далее идёт сервисный уровень, обеспечивающий хранение данных, аналитическую обработку и управление бизнес-процессами. Верхний уровень составляют проблемно-ориентированные приложения, решающие задачи конкретной предметной области.

В разделе 4.2 предложен технологический подход к унифицированному обмену данными, основанный на формировании унифицированного представления структур данных, учитывающий особенности функционирования взаимодействующих систем и вариативность форматов данных. Основные элементы и логика процесса унифицированного обмена описаны с помощью формальной и концептуальной моделей. Унифицированная модель и операторы позволяют автоматизировать процесс обмена данными, исключив необходимость перепрограммирования при добавлении новых объектов информационного обмена или при изменении форматов хранения данных. Предложена также архитектура программных средств, позволяющая реализовать стандартизированный обмен данными на основе формирования унифицированного представления структур данных.

В разделе 4.3 выявлены особенности функционирования облачных сервисов различных видов. Разработаны требования к моделям разграничения доступа для

облачных сервисов, созданные на основе требований расширенной ролевой модели безопасности для веб-сервисов. Представлены результаты анализа динамики интернет-угроз корпоративных веб-сервисов, в том числе облачных, на примере корпоративной сети Красноярского научного центра СО РАН. Описан подход к анализу динамики функционирования веб-сервисов в течение двух лет и выявлению рисков безопасности, а также влияние пандемии COVID-19 на использование интернет-сервисов. Приведены рекомендации для усиления защиты облачных веб-сервисов и снижения рисков кибербезопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования

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 СФУ. 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., Kubyshev 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