

На правах рукописи



ФЕДУТИНОВ Константин Александрович

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В  
ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ В УСЛОВИЯХ ОПЕРАТИВНОГО  
АНАЛИЗА МОНИТОРИНГОВЫХ ДАННЫХ

Специальность: 2.3.4. Управление в организационных  
системах

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Воронеж – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

**Научный руководитель:** **Каширина Ирина Леонидовна,**  
доктор технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Угольницкий Геннадий Анатольевич,** доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», кафедра прикладной математики и программирования, заведующий кафедрой  
**Ломакина Любовь Сергеевна,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», кафедра вычислительных систем и технологий, профессор

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

Защита диссертации состоится 26 января 2024 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.286.04, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14, аудитория 216.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Воронежского государственного технического университета и на сайте [www.cchgeu.ru](http://www.cchgeu.ru).

Автореферат разослан 25 октября 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.286.04  
кандидат технических наук, доцент



К. Ю. Гусев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### *Актуальность темы исследования.*

Совершенствование процессов управления в организационных системах на современном этапе требует внедрения новых информационных технологий, включающих методы поддержки принятия решений на основе оперативно поступающих мониторинговых данных. Управление, основанное на данных, – это новый ключевой тренд, представленный в национальной программе «Цифровая экономика Российской Федерации».

В современном мире мониторинг стал неотъемлемой частью различных сфер деятельности. Например, он активно применяется в экологии, позволяя контролировать загрязнение окружающей среды; в медицине, помогая отслеживать состояние здоровья пациентов; в образовании, содействуя оценке эффективности образовательных организаций.

Использование мониторинговых данных для поддержки принятия управленческих решений в организационных системах имеет ряд преимуществ. Во-первых, мониторинг позволяет получать непрерывную информацию о состоянии объектов и процессов, что дает возможность при принятии управленческих решений оперативно реагировать на возникающие проблемы. Во-вторых, мониторинг способствует более эффективному использованию ресурсов, так как на основе информации об актуальных данных можно оптимизировать процессы и уменьшить потери.

Однако, несмотря на все преимущества, мониторинг также имеет свои ограничения. Существующие методы обработки данных мониторинга, как правило, имеют недостаточную эффективность из-за невозможности оперативно учитывать большие объемы поступающей информации (в том числе зашумленной и содержащей пропущенные значения, собранной из разнородных источников). Неправильная обработка и анализ мониторинговых данных зачастую приводят к принятию неверных решений. В целом, использование мониторинговых данных в управлении требует не только их правильного анализа, но и понимания, как эти данные должны влиять на изменения в организации.

При этом появившиеся в последние годы технологии машинного обучения, основанные на нейросетевых и нейро-нечетких подходах, позволяют обрабатывать в системах управления оперативно поступающие реальные данные, в том числе содержащие пропущенные, ошибочные или неточные значения, а также автоматически формировать примеры управляющих решений.

Исследование существующих нейросетевых и нейро-нечетких архитектур выявило целесообразность применения для обработки мониторинговых данных в задачах поддержки принятия решений в организационных системах сетей адаптивного резонанса (ART). Сети ART обладают стабильностью, что означает способность сохранять накопленные знания на протяжении всего времени работы системы. Кроме того, они обеспечивают пластичность за счет использования механизма инкрементного обучения. Инкрементное обучение

позволяет учитывать актуальную информацию о состоянии объектов и оперативно реагировать на изменения ситуации. Нейро-нечеткие модели Cascade ARTMAP хорошо справляются с обработкой зашумленных данных и позволяют разработать систему автоматизированного построения решающих правил для поддержки принятия управленческих решений на основе данных мониторинга.

Проблемы разработки методов и механизмов управления на основе мониторинговых данных рассматривались в работах В.Н. Буркова, Д.А. Новикова, Д.В. Гаскарова, А.В. Щепкина, Я. Е. Львовича, В.А. Ирикова, В.Д. Кондратьева, Г.А. Угольничко и других. Современные нейросетевые и нейро-нечеткие технологии, используемые при разработке информационного обеспечения управляющих систем, освещены в работах К. Бройдена, Д. Гольдфарба, Э. Мамдани, Г.С. Поспелова, С. Хайкина, Д. Шанно, Г. Карпендер, С. Гроссберга, Я. Лекуна, П. Флаха, Я. Гудфеллоу.

Исследования этих специалистов заложили научную и методологическую основу данной диссертации. Однако вопросы внедрения методов управления на основе оперативно поступающих мониторинговых данных с использованием алгоритмов машинного обучения в практику поддержки принятия решений в организационных системах пока в литературе освещены недостаточно.

В связи с этим *актуальность* тематики диссертационного исследования продиктована необходимостью дальнейшего развития средств интеллектуальной поддержки принятия решений в организационных системах в условиях оперативного мониторинга на основе нейронных сетей адаптивного резонанса.

**Целью диссертационной работы** является разработка средств алгоритмизации процессов принятия управленческих решений в организационных системах на основе инкрементных нейросетевых методов анализа мониторинговых данных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ систем управления на основе мониторинговых данных в организационных системах, выявить проблемы и на этой основе сформулировать актуальные направления развития систем поддержки принятия решений.

2. Разработать структурно-функциональную модель поддержки принятия управленческих решений на основе мониторинговых показателей в целях усовершенствования информационного обеспечения процессов управления в организациях.

3. Разработать модифицированный алгоритм кластеризации мониторинговых данных на основе нейросетевой модели Fuzzy ART для совершенствования кластерного подхода к управлению с возможностью выбора различных управляющих воздействий для различных кластеров значений мониторинговых показателей в условиях их оперативного анализа.

4. Разработать ансамблевую модель классификации мониторинговых данных на основе сетей Fuzzy ARTMAP, предоставляющую возможность анализировать большие объемы информации за счет параллельного процесса их обработки и имеющую высокую точность в условиях присутствия в исходных мониторинговых данных шумов, пропусков и ошибок.

5. Разработать модифицированный нейросетевой алгоритм автоматизированного построения решающих правил на основе мониторинговых данных, позволяющий в автоматическом режиме формировать управляющие решения в наглядном и понятном для специалистов в предметной области формате.

6. Разработать программный комплекс для интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений на основе мониторинговых данных.

**Объектом исследования** является процесс управления принятием решений на основе мониторинговых данных, а **предметом исследования** – методы интеллектуализации процессов принятия решений в организационных системах на основе оперативно поступающих мониторинговых данных.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы теории системного анализа, принятия решений, машинного обучения, обработки больших данных, нечеткой логики, теории искусственных нейронных сетей, современные методы и средства программирования.

**Обоснованность.** Корректное использование методов исследования является основой для обоснованности научных выводов, выраженных в данной работе.

**Достоверность** научных результатов подтверждается проведенным в диссертации сравнительным анализом подходов к обработке оперативно поступающих мониторинговых данных и практической апробацией разработанных методов для решения задач анализа экологической информации.

**Тематика работы.** Диссертация соответствует п.3 «Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах»; п.4 «Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах»; п.9 «Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах».

**Научная новизна.** В процессе исследования в диссертации были достигнуты следующие основные результаты, отличающиеся научной новизной:

1. Формализованная модель поддержки принятия управляющих решений на основе мониторинговых показателей, отличающаяся использованием инкрементных нейросетевых алгоритмов интеллектуального анализа данных как средства совершенствования процессов управления в организациях.

2. Модифицированный алгоритм кластеризации данных на основе нейронных сетей архитектуры Fuzzy ART, отличающийся возможностью выявлять скрытые структурные связи между наборами оперативно поступающих мониторинговых показателей, ограничивать число создаваемых кластеров и автоматически настраивать гиперпараметры сети в процессе ее инкрементного обучения.

3. Алгоритм классификации данных на основе ансамбля нейронных сетей семейства Fuzzy ARTMAP, отличающийся возможностью анализировать большие объемы мониторинговых данных с учетом присутствия в них шумов,

пропусков и ошибок, оперативно адаптируясь к поступающему потоку информации.

4. Модифицированный алгоритм обработки мониторинговых данных на основе нейро-нечеткой сети архитектуры Cascade ARTMAP, отличающийся возможностью в автоматическом режиме генерировать решающие правила, позволяющие формировать варианты управляющих решений.

5. Структура программного комплекса с механизмами встраивания в системы поддержки принятия решений, отличающегося возможностью в непрерывном режиме обрабатывать мониторинговые данные с использованием методов инкрементного обучения, извлекать из этих данных решающие правила и формировать на основе этих правил управляющие решения.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в том, что разработанные методы и алгоритмы нейросетевого анализа данных позволяют повысить эффективность процессов принятия решений и могут применяться для определения эффективной стратегии оперативного реагирования на поступающую мониторинговую информацию. Предложенные модели и методы могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях, занимающихся разработкой специального программного обеспечения систем экологического мониторинга территорий.

***Положения, выносимые на защиту.***

1. Структурно-функциональная модель поддержки принятия управляющих решений на основе мониторинговых показателей позволяет усовершенствовать информационное обеспечение процессов управления в организациях и создает логическую основу для разработки систем поддержки принятия управляющих решений.

2. Модифицированный алгоритм кластеризации мониторинговых данных на основе нейросетевой модели Fuzzy ART позволяет выявлять скрытые структурные связи между наборами мониторинговых показателей для обоснованного выбора управляющих воздействий.

3. Предлагаемая ансамблевая модель на основе сетей Fuzzy ARTMAP для классификации мониторинговых данных позволяет анализировать и обрабатывать большие объемы оперативно поступающей информации в условиях присутствия в исходных данных шумов, пропусков и ошибок.

4. Использование модифицированного алгоритма, основанного на нейро-нечеткой модели Cascade ARTMAP, позволяет перенести предварительный опыт экспертов в структуру кластеров мониторинговых данных и затем автоматически преобразовать результаты кластеризации в компактный и понятный набор управляющих решений.

5. Программный комплекс для поддержки принятия решений в организационных системах в условиях оперативного анализа мониторинговых данных позволяет в непрерывном режиме демонстрировать текущее состояние системы в интерпретируемой и наглядной форме и дает возможность автоматически формировать управляющие решения.

**Внедрение результатов работы.** Теоретические и практические результаты исследований, реализованные в виде программного комплекса для

поддержки принятия решений по управлению в организационных системах на основе данных экологического мониторинга, получили внедрение в Центре гигиены и эпидемиологии Воронежской области. Основные результаты диссертации также внедрены в учебный процесс Воронежского государственного университета в рамках дисциплин: «Современные нейросетевые технологии», «Управление в социальных и экономических системах».

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались на Всероссийской молодёжной научной школе «Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах» (Воронежский государственный технический университет, 13 декабря 2017 г.), Международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (Воронежский государственный университет, 18–20 декабря 2017 г., 17–19 декабря 2018 г. и 11–12 ноября 2022 г.); XVII и XIX международных научно-методических конференциях «Информатика: проблемы, методология, технологии» (Воронежский государственный университет, 9-10 февраля 2017 г. и 14-15 февраля 2019 г.); XVI Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Управление большими системами» (Тамбовский государственный технический университет, 10 – 13 сентября 2019 г.); V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современные проблемы физико-математических наук» (Орловский государственный университет, 26-29 сентября 2019 г.); научных семинарах и заседаниях кафедры математических методов исследования операций Воронежского государственного университета в 2017-2023 гг.

**Публикации.** По тематике диссертации опубликовано 19 научных работ, в том числе 8 – в изданиях, рекомендуемых ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций, из них 3 работы проиндексированы в SCOPUS, получено 1 свидетельство на программу для ЭВМ.

**Личный вклад автора.** В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит: [1, 3] – предложены алгоритмы и модели, применяемые для обработки потоковой мониторинговой информации; [2, 11] - осуществлен системный анализ мониторинговых данных с использованием сетей ART и создана модель для принятия управляющих решений на основе показателей мониторинга; [4, 12] – разработана модификация нейросетевого классификатора, основанного на сети Fuzzy ARTMAP; [5, 13] – разработан алгоритм для создания решающих правил с помощью нейронной сети Cascade ARTMAP; [6,14] – предложен алгоритм конфигурирования системы мониторинга; [17,19] – разработаны модули системы поддержки принятия решений для экологического мониторинга.

**Структура и объем работы.** Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 99 источников, и приложения. Общий объем диссертации составляет 123 страницы, включая 27 рисунков и 14 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обосновывается актуальность выбранной темы диссертации, формулируются цель, объект и предмет исследования, а также перечисляются задачи исследования. Здесь же отмечаются научная новизна, практическая значимость работы и основные положения, которые будут защищаться. Кроме того, предоставляются данные о проведенной апробации и внедрении полученных результатов.

*В первой главе* рассмотрены методы повышения эффективности алгоритмов поддержки принятия управленческих решений на основе мониторинговых данных.

Управленческий мониторинг является неотъемлемой частью эффективного управления организацией, предоставляя информацию для принятия обоснованных решений и обеспечения устойчивого развития. Его функции включают:

- наблюдение за состоянием организации на основе системы показателей: мониторинг позволяет оценить, насколько реальные данные о деятельности организации соответствуют запланированным значениям;
- определение степени отклонения фактических данных от предусмотренных: анализ отклонений помогает выявить проблемы в управлении и причины их возникновения;
- диагностику состояния организации: мониторинг позволяет заблаговременно получить данные о серьезных нарушениях и сформировать основу для разработки стратегий решения проблем;
- предложение оперативных управленческих решений для улучшения деятельности организации в соответствии с поставленными целями: мониторинг помогает определить необходимые изменения и адаптироваться к изменяющейся среде;
- регулярную корректировку целей и показателей развития организации: мониторинг позволяет определить, насколько эффективны действующие стратегии, и внести необходимые изменения.

На рис. 1 приведена структурная схема процесса управления в организационных системах на основе мониторинговых данных с контуром обратной связи.

Новые технологии сбора данных увеличивают потенциал для получения информации, но также создают ключевые проблемы, связанные с их качественной обработкой. Ключевыми особенностями мониторинговых данных являются их неполнота, неточность (например, данные, передаваемые с датчиков, содержат высокий процент шумов), сверхбольшой объем (для данных, поступающих в режиме реального времени) и, как следствие этого, необходимость автоматизированного интерпретативного анализа. Модели структуризации мониторинговой информации на современном этапе должны соответствовать следующим требованиям: уметь обрабатывать данные в режиме реального времени; уметь приспосабливаться к изменяющемуся потоку данных; уметь масштабироваться к объему поступающих данных; формировать структуру, которая бесконтрольно не разрастается с обработкой большого числа



данных; уметь работать с неполной, нечеткой и зашумленной информацией, уметь автоматизированно формировать управляющие решения.

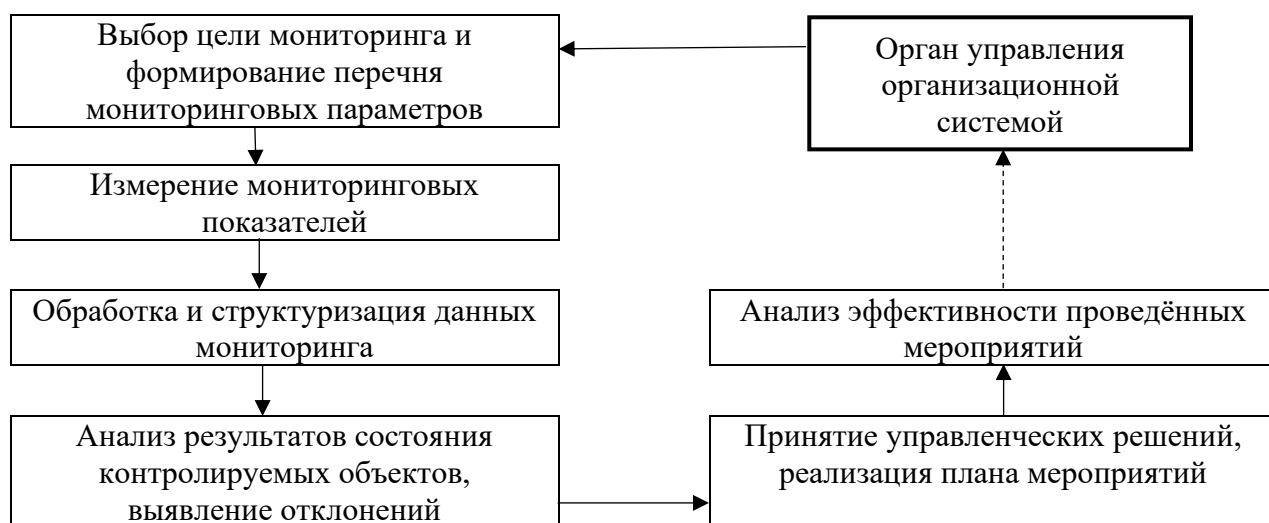


Рис. 1. Процесс управления организационной системой на основе мониторинговых данных

Высоким потенциалом для решения задач обработки и анализа мониторинговых данных обладают нейросетевые алгоритмы. Но, как известно, наиболее популярные архитектуры нейронных сетей функционируют в режиме «черного ящика», то есть не являются понятными и интерпретируемыми методами, что ограничивает возможности их применения в сфере управления организационными системами. Алгоритм поддержки принятия решений в данной предметной области должен быть не только точным, но и понятным для экспертов.

Всем перечисленным выше требованиям (в том числе требованию интерпретируемости) отвечают нейро-нечеткие сети, построенные по принципу теории адаптивного резонанса (ART), разработанной Карпенгером и Гроссбергом. Сети ART являются гибридным подходом, сочетающим нейросетевые, эмпирико-статистические и нечеткие методы и генерирующим устойчивые структуры (кластеры или классы) путем встроенного механизма самоорганизации в ответ на различные входные векторы.

**Во второй главе** диссертации рассмотрен подход к разработке систем поддержки принятия управленческих решений на основе мониторинговых данных. Формально такая система может быть представлена в виде кортежа:

$$\langle P_t, K_t, R_t, U_t, N_t \rangle, \text{ где}$$

- а)  $P_t$  — входной набор значений мониторинговых показателей в момент времени  $t$ ;
- б)  $K_t$  — набор кластеров, на которые разбивается состояние контролируемых объектов с учетом текущих значений мониторинговых показателей;
- в)  $R_t$  — классификация возможных состояний системы в зависимости от получаемых кластеров;

- d)  $U_t$  – комплекс возможных управляющих воздействий в зависимости от класса текущего состояния;
- e)  $N_t$  – комплекс нейросетевых моделей, устанавливающих соответствия:
- $P_t \rightarrow K_t$  (модель кластеризации);
  - $K_t \rightarrow R_t$  (модель классификации);
  - $R_t \rightarrow U_t$  (модель построения решающих правил).

Структурно-функциональная модель системы поддержки управленческих решений, основанная на мониторинговых показателях, представлена на рисунке 2. Для реализации алгоритмов структуризации мониторинговых данных предлагается использовать нейро-нечеткие сети семейства ART, представленные моделями Fuzzy-ART C, Fuzzy-ARTMAP и Cascade ARTMAP.

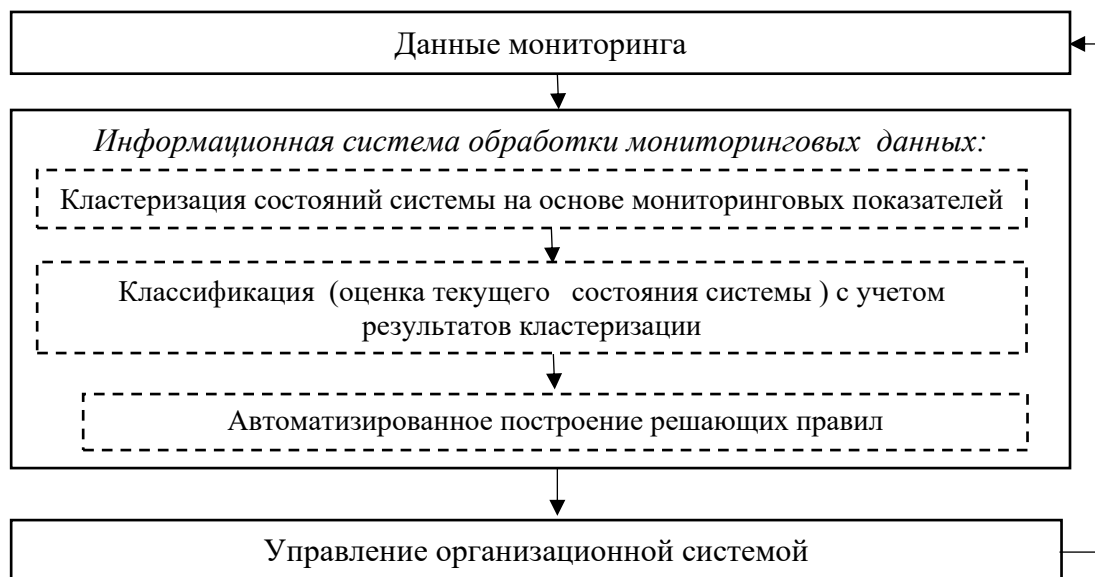


Рис. 2. Структурная модель информационного обеспечения поддержки принятия управленческих решений на основе мониторинговых показателей

Однако эти сети, помимо перечисленных в первой главе достоинств, обладают рядом недостатков, которые снижают их эффективность при применении в системах поддержки принятия решений. К числу этих недостатков относятся:

- недостаточно высокая точность сетей ART при решении задач классификации;
- сложности в настройке многочисленных гиперпараметров;
- постепенная утеря свойства стабильности при обработке потоковых данных, характерных для задач мониторинга;
- неконтролируемый рост числа создаваемых кластеров.

С целью преодоления указанных недостатков во второй главе диссертации:

- a) разработана модификация алгоритма обучения кластеризующей сети Fuzzy ART C, снижающая ее зависимость от порядка поступления данных и позволяющая ограничивать число создаваемых кластеров;
- b) разработана модификация алгоритма обучения Fuzzy ARTMAP, позволяющая назначать одному кластеру несколько соотнесенных с ним

- классов;
- с) разработана архитектура ансамбля на основе нейронных сетей Fuzzy ARTMAP, повышающего точность решения задач классификации и предоставляющего возможность анализировать большие объемы мониторинговой информации за счет распараллеливания процесса их обработки;
  - д) разработан генетический алгоритм автоматической настройки гиперпараметров ансамбля классификаторов на основе Fuzzy ARTMAP.

На рис. 3 приведена использованная в диссертации архитектура сети Fuzzy ARTMAP. Fuzzy ARTMAP - это инкрементно обучающаяся система, которой не нужно проводить отдельный этап обучения. Она позволяет категоризировать входные значения уже на начальных этапах алгоритма. Эта сеть состоит из двух модулей нейронов: ARTa, который отвечает за обработку входной информации, и ARTb, который формирует представление выходной информации. Эти модули объединены с использованием модуля ассоциативной памяти STM. Каждый из модулей ARTa и ARTb включает два слоя нейронов и использует при вычислениях операции нечеткой логики, но при этом не требует явной фаззификации данных. Использование нечетких логических операций позволяет построить систему, менее чувствительную к неточным и зашумленным значениям в исходных данных.

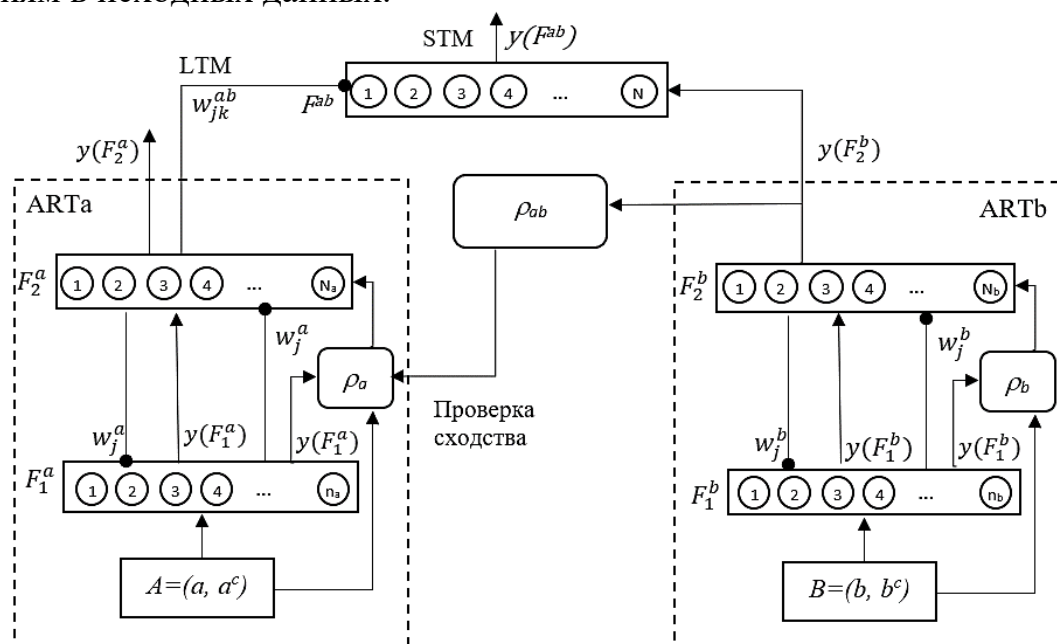


Рис. 3. Архитектура сети Fuzzy ARTMAP.

$F_1^a$  и  $F_1^b$  представляют слои сравнения, а  $F_2^a$  и  $F_2^b$  представляют слои распознавания, которые связаны друг с другом с помощью векторов весовых коэффициентов  $w_j^a$  и  $w_j^b$  соответственно.

Выходные значения слоя  $F^{ab}$  после обработки в STM не забываются, а сохраняются в долгосрочной памяти LTM модуля ARTa. Каждый нейрон в слоях распознавания  $F_2^a$  и  $F_2^b$  представляет определенную категорию распознавания, то есть кластер схожих значений мониторинговых показателей. Каждый нейрон

хранит вектор-прототип, который представлен в наборе весовых коэффициентов данного нейрона. Бинарные веса  $w_{jk}^{ab}$  связывают слой  $F_2^a$  со слоем  $F^{ab}$ , который отвечает за саморегулирование связей между сформированными кластерами входных и выходных векторов.

Сеть ARTMAP решает задачу классификации, но в процессе функционирования она на основе самоорганизации объединяет входные данные в кластеры, при этом каждому результирующему классу может быть соотнесено несколько кластеров. В качестве модификации существующего подхода в предлагаемом исследовании каждому кластеру так же может быть назначено несколько классов, то есть может решаться задача классификации для пересекающихся классов.

Благодаря использованию нечетких операторов, каждый кластер в сети Fuzzy ARTMAP представляет собой n-мерный параллелепипед в пространстве признаков, то есть однозначно может быть представлен диапазонами изменения признаков, которые привели к его формированию. Однако точность классификации сети Fuzzy ARTMAP уступает многим существующим подходам. Поэтому на рис. 4 представлена блок-схема предлагаемого алгоритма обучения ансамбля сетей Fuzzy ARTMAP.

В предлагаемый ансамбль входит K сетей архитектуры Fuzzy ARTMAP, каждая из которых будет обучаться независимо от других на некотором подмножестве исходных данных. Таким образом, может быть применена парадигма параллельного обучения, что позволяет ускорить процесс настройки модели, при этом повысив точность обучения за счет механизма ансамблирования.

Таким образом, во второй главе представлена алгоритмическая основа для разработки интеллектуальных алгоритмов структуризации мониторинговых данных, поступающих на вход системы поддержки принятия управленческих решений.

**В третьей главе** представлена архитектура нейро-нечеткой сети Cascade ARTMAP и предложена ее модификация для автоматизированной выработки управленческих решений и рекомендаций при обработке мониторинговых данных.

Нейро-нечеткая сеть Cascade ARTMAP позволяет получать явное представление знаний, основанных на правилах. В основе архитектуры Cascade ARTMAP лежит представленная выше архитектура Fuzzy ARTMAP, дополненная блоком построения решающих правил. Как было отмечено, кластеры, формируемые сетью Fuzzy ARTMAP, представляют собой n-мерные параллелепипеды в пространстве признаков, что позволяет описать их в виде правила вида “ЕСЛИ...ТО...”.

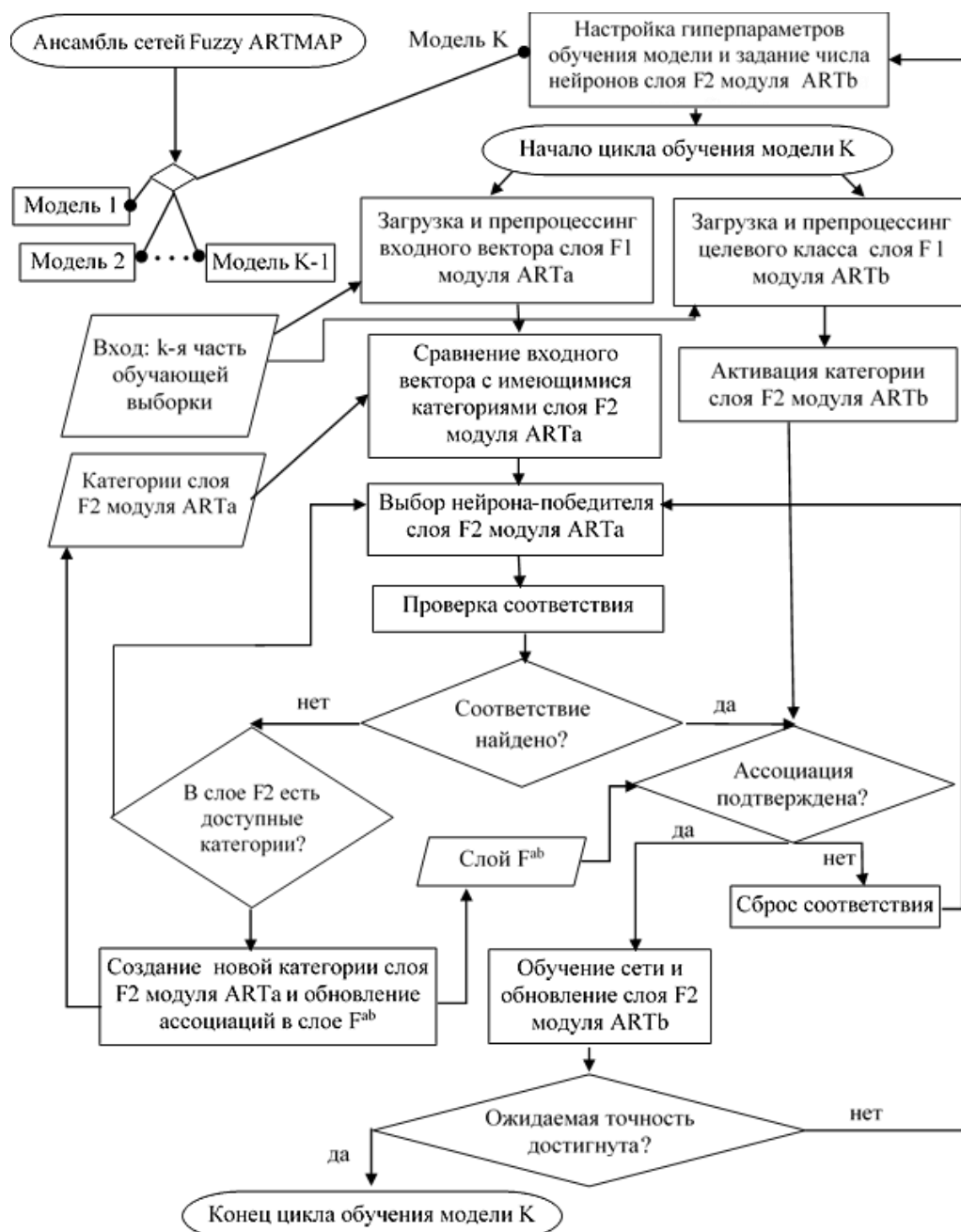


Рис. 4. Обучение ансамбля сетей Fuzzy ARTMAP

В главе 3 модификации Cascade ARTMAP кластеры, формируемые сетью ARTa, создаются на основе мониторинговых данных, а кластеры категории сети ARTb в автоматическом режиме объединяются в различные варианты управляющих воздействий, что приводит в итоге к автоматической разработке стратегий реагирования на изменения в отслеживаемых параметрах вида: “ЕСЛИ (мониторинговый показатель1 в диапазоне [p1; p2]) и (мониторинговый показатель2 в диапазоне [p3; p4]) ... ТО следует применить управляющие воздействия u1,u2”. То есть разработанная система позволяет получать правила вида “ЕСЛИ...ТО...”, похожие на представление знаний в экспертных системах, при этом каждому правилу соответствует некоторая категория (кластер в наборе данных). Инициализация Cascade ARTMAP некоторым количеством правил, априорно известных экспертам, позволяет задать

начальную архитектуру нейронной сети и существенно ускорить процесс обучения, а также повысить точность классификации.

Процесс инициализации сети правилами, заранее известными экспертам, выполняется в два этапа. На первом этапе происходит выделение названий атрибутов (входных и выходных признаков) из всех правил. После этого формируется таблица  $Z$ , содержащая полный перечень всех атрибутов ( $z_1, z_2, \dots, z_M$ ). На втором этапе, с использованием данных из таблицы  $Z$ , каждое правило порождает два вектора  $A$  и  $B$ . Эти вектора являются входами для модулей ARTa и ARTb соответственно. Алгоритм обучения сети Cascade ARTMAP основан на механизме обратного отслеживания, и его подробное описание можно найти в главе 3. В рамках этого алгоритма происходит корректировка весовых коэффициентов.

Процесс извлечения правил из сети Cascade ARTMAP имеет следующий вид. Любой из нейронов слоя  $F_2^a$  соответствует некоторому кластеру входных векторов модуля долгосрочной памяти ARTa. С помощью слоя ассоциативной памяти  $F^{ab}$  каждому из нейронов слоя  $F_2^a$  сопоставляется определенная категория в слое  $F_2^b$  модуля ARTb. Эта категория представляет собой кластер, который объединяет выходные результаты. Если значения весов слоя  $F_2^a$  настроены корректно, то можно воспроизвести набор правил, которые связывают входные векторы сети с выходными. Количество полученных правил соответствует числу нейронов в слое  $F_2^a$ .

Если коэффициенты весов слоя  $F_2^a$  настроены корректно, то можно восстановить набор правил, которые устанавливают связь между входными векторами сети и ее выходными значениями. Количество полученных правил совпадает с числом нейронов в слое  $F_2^a$ .

Проведенный вычислительный эксперимент продемонстрировал, что чем больше объем исходных данных, тем большее число правил формирует сеть Cascade ARTMAP. Целью задачи сокращения правил является создание компактного подмножества наиболее точных правил из их избыточного набора и представление их эксперту в простом формате «если – то». Для уменьшения количества правил, в главе 3 каждому сформированному кластеру назначается коэффициент достоверности, который отражает точность правил, связанных с этим кластером. В процессе обучения кластеры небольшого размера и с низкой достоверностью удаляются, что позволяет сохранить сеть достаточно компактной на протяжении всего времени ее существования.

При расчете показателя достоверности для каждого кластера  $j$  в слое  $F_2^a$  производятся вычисления двух характеристик. Величина  $\mu_j$  представляет собой долю входных векторов, которая относится к соответствующему кластеру  $j$ , в то время как  $\pi_j$  является долей правильно классифицированных объектов данного кластера. Затем сам показатель достоверности рассчитывается с использованием формулы:  $k_j = \Delta\mu_j + (1 - \Delta)\pi_j$ . Здесь параметр  $\Delta \in [0, 1]$  является поправочным коэффициентом, регулируемым в процессе обучения. В конечном итоге редукция правил обеспечивает более эффективное использование правил и повышает точность и качество анализа данных.

В результате, разработанный алгоритм формирования и оценки правил на основе сети Cascade ARTMAP образует наглядную и интерпретируемую нейросетевую основу для разработки системы поддержки принятия решений по управлению на основе мониторинговых данных.

В четвертой главе представлена разработка системы поддержки принятия решения на основе нейросетевых интерпретируемых алгоритмов анализа мониторинговых данных, а также представлены результаты ее практической апробации в Центрально-Черноземном межрегиональном управлении федеральной службы по надзору в сфере природопользования.

На рис. 5 представлена архитектура системы, предлагаемой для поддержки процесса принятия решений при управлении охраной природы, основанного на анализе мониторинговых данных.

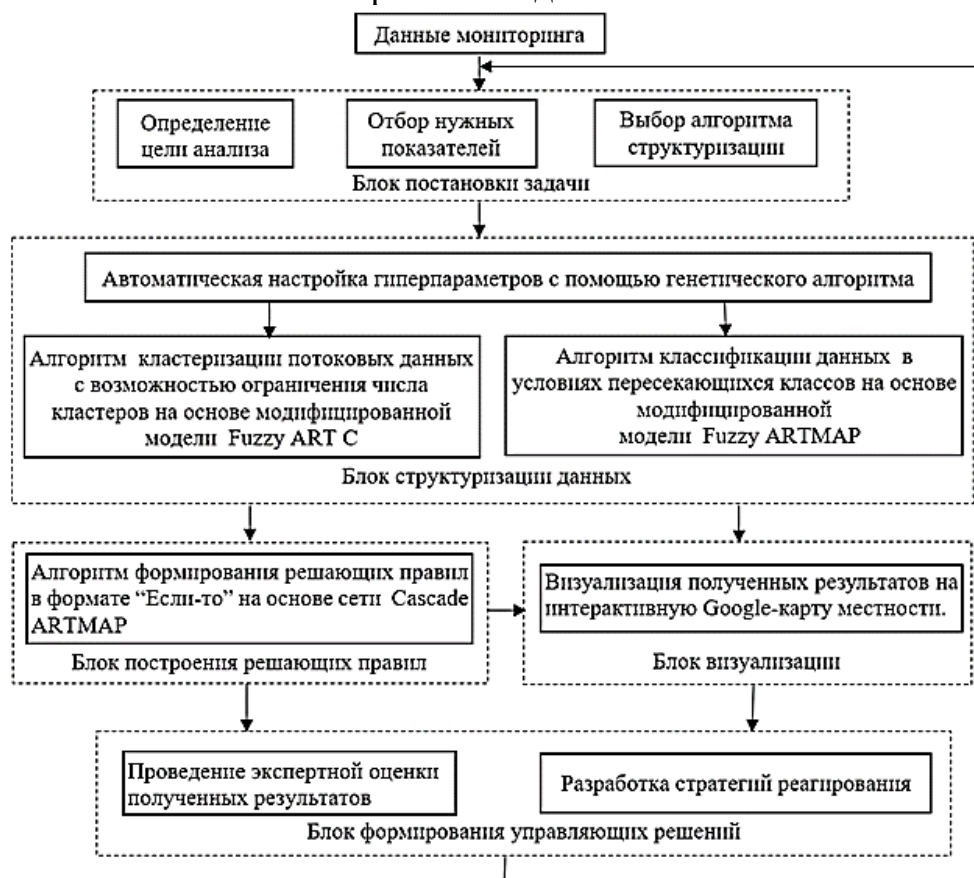


Рис. 5. Структурная организация системы поддержки принятия решений.

На рис 6. представлена разработанная на языке Python с применением геоинформационных технологий система поддержки принятия решений по управлению охраной окружающей среды. Система включает нейросетевые модели, представленные в главах 2 и 3. Для интеграции разработанных методов в современную ГИС-систему была использована Folium - библиотека, созданная на языке программирования Python для отображения географических данных. Далее в главе 4 представлены две практические задачи, решенные с помощью разработанного программного комплекса.



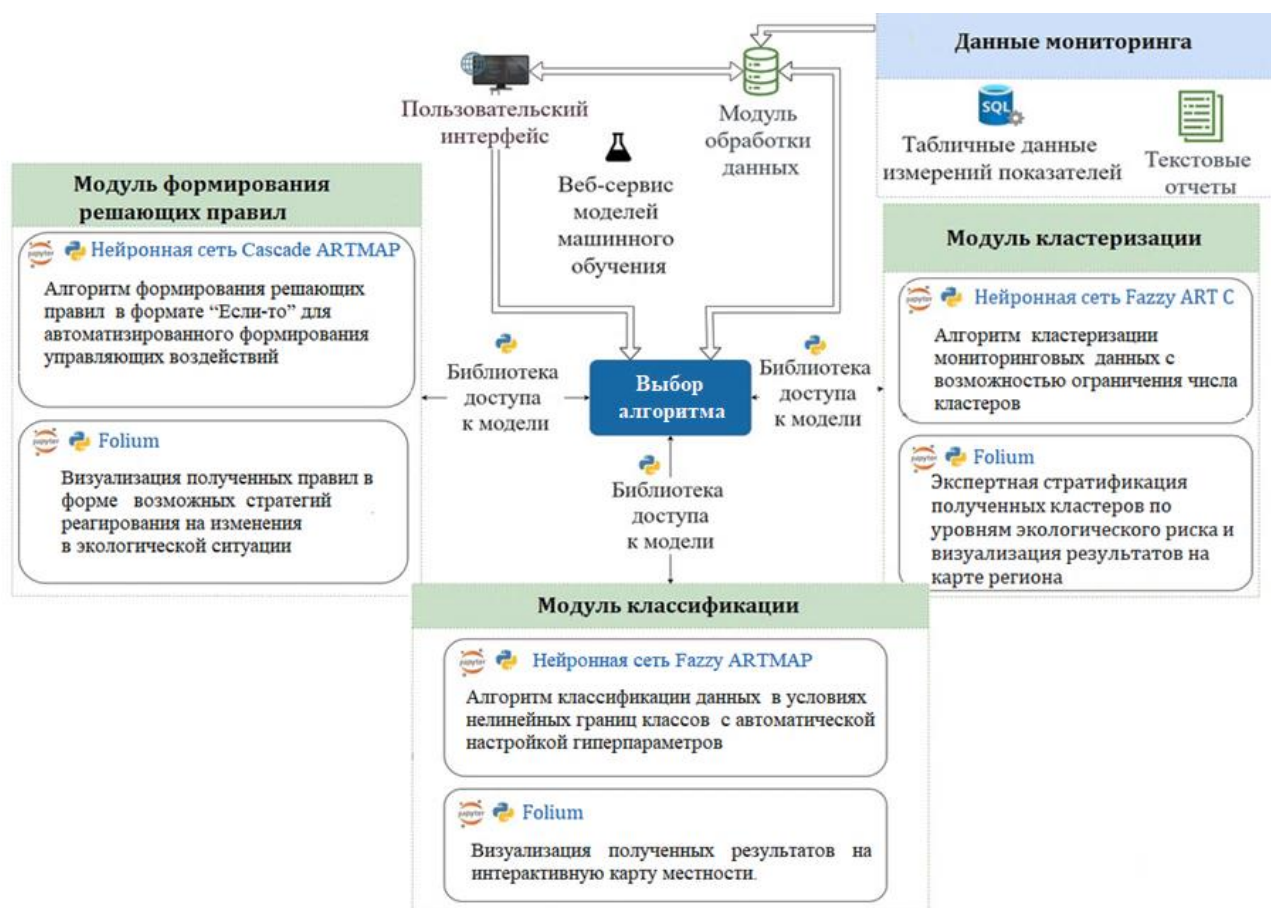


Рис. 6. Структура модулей системы поддержки принятия решений по управлению охраной окружающей среды

*Первая задача* заключалась в анализе риска загрязнения окружающей среды в муниципальных районах Воронежской области на основе мониторинговых данных. Этот анализ был проведен с помощью алгоритма кластеризации на основе нейронной сети Fuzzy ART. Входные данные представляют собой текущие актуальные значения мониторинговых показателей, используемых для оценки риска химического загрязнения окружающей среды (воды, воздуха и почвы) в 32 муниципальных районах Воронежской области, поступающие с сенсорных датчиков.

На рис. 7 представлена графическая визуализация результата полученной кластеризации. Проведенный анализ позволил экспертам выделить 4 уровня риска химического загрязнения территории Воронежской области: низкий, средний, высокий и очень высокий.

На рис. 7 желтому цвету соответствуют наиболее благополучные районы (с низким уровнем риска), а красному цвету - районы с наиболее высоким уровнем риска химического загрязнения. Данные могут обрабатываться в режиме онлайн, позволяя экспертам комплексно отслеживать ситуацию в регионе.

*Вторая задача* заключалась в комплексном экогеологическом районировании территорий Воронежской области. Она была основана на мониторинговых показателях, полученных со всей территории Воронежской области, с разрешением 500x500 метров.



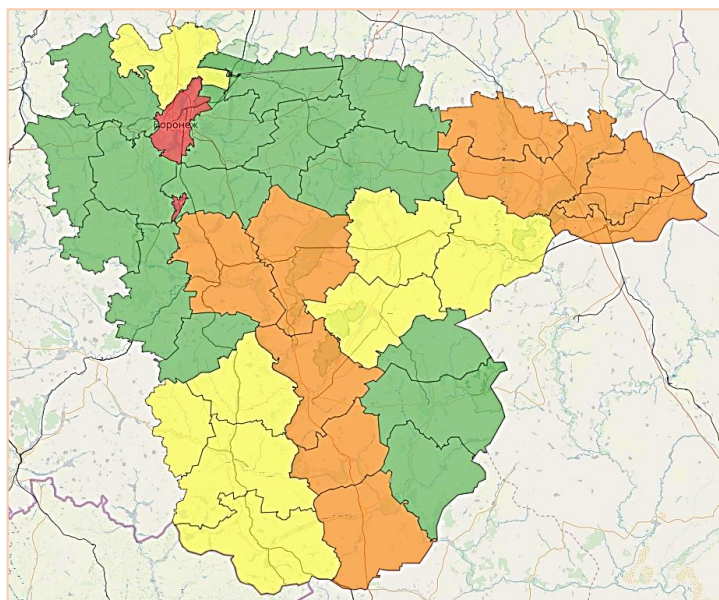


Рис. 7. Кластеризация муниципальных районов Воронежской области по показателям химического загрязнения окружающей среды с использованием сети Fuzzy ART

Для каждого из 17 мониторинговых показателей был собран набор данных, содержащий 206 676 значений. Для решения этой задачи был использован интерпретируемый алгоритм классификации мониторинговой информации на основе нейронной сети архитектуры Cascade ARTMAP с использованием решающих правил. На рис. 8 приведен пример классификации Воронежской области по отдельно выбранным мониторинговым факторам, связанным только с показателями гидросферы, с результатом автоматизированного формирования управляющих воздействий.

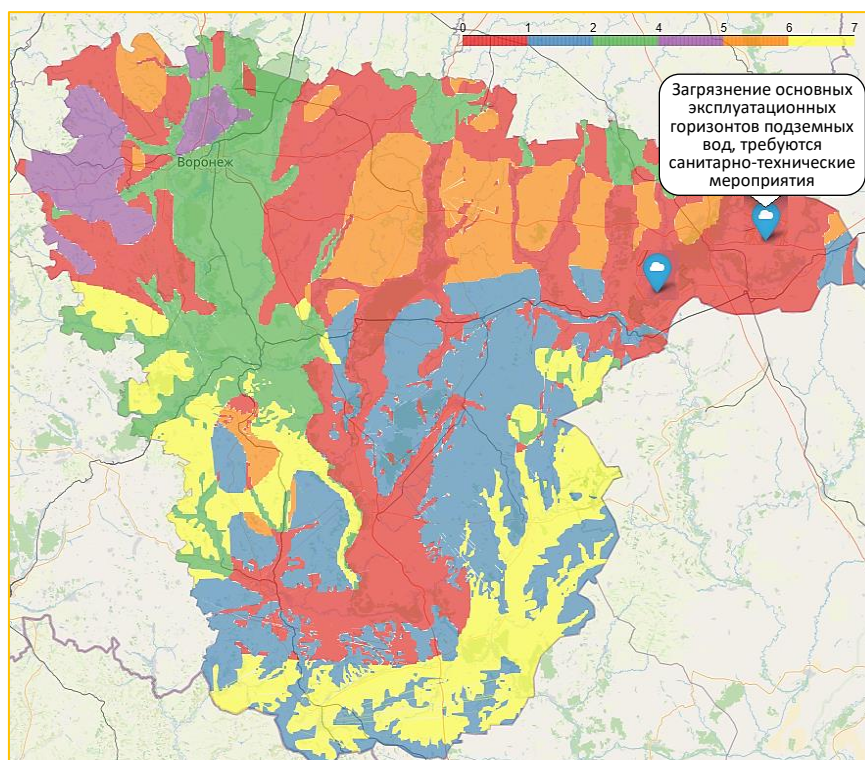


Рис. 8. Пример формирования управляющего решения

Указано, что в связи с загрязнением эксплуатационных горизонтов подземных вод в выделенном пункте требуются санитарно-технические мероприятия.

На рис. 9 приведены задачи, решение которых в данный момент реализовано в СППР, информация для лица принимающего решения, формируемая в разработанной системе, и примеры принимаемых решений.



Рис. 9. Примеры принимаемых решений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена структурно-функциональная модель поддержки принятия управляющих решений на основе мониторинговых показателей, позволяющая усовершенствовать информационное обеспечение процессов управления в организациях и создающая логическую основу для разработки систем поддержки принятия управляющих решений на основе мониторинговых данных.

2. Разработаны алгоритмы структуризации мониторинговых данных на основе модифицированных нейросетевых моделей Fuzzy ART и Fuzzy ARTMAP, позволяющие выявлять скрытые структурные связи между наборами мониторинговых показателей, анализировать и обрабатывать большие объемы информации, в том числе непрерывно поступающей в режиме реального времени, для последующего оперативного выбора управляющих воздействий в условиях присутствия в исходных мониторинговых данных шумов, пропусков и ошибок.

3. Разработан алгоритм обработки мониторинговой информации на основе модифицированной нейросетевой модели Cascade ARTMAP, позволяющий

отображать априорный опыт экспертов в области управления в структуру кластеров и, наоборот, в автоматическом режиме трансформировать результаты кластеризации в наглядный и содержательный набор решающих правил, обеспечивающих простую и понятную интерпретацию экспертами.

4. Разработан программный комплекс для поддержки принятия решений, который обеспечивает оперативный анализ мониторинговых данных с использованием методов инкрементного обучения, способных адаптивно запоминать поступающую информацию. С помощью этой системы можно извлекать решающие правила из данных и автоматически формировать управляющие решения на основе этих правил.

### **Список основных публикаций по теме диссертации**

*Публикации, индексируемые в международной базе данных Scopus*

1. Continuous data stream clustering based on a generalized model of ART family neural network / I. L. Kashirina, K. A. Fedutinov, T. V. Azarnova, Y. V. Bondarenko // Journal of Physics: Conference Series 2019. – Vol. 1202. – P. 12023.
2. System analysis of monitoring ecological information using Fuzzy ART neural network / I. L. Kashirina, K. A. Fedutinov, T. V. Azarnova, Y. V. Bondarenko // Journal of Physics: Conference Series 2019. – Vol. 1203. – P. 12090.
3. Kashirina, I. L. Development of information and analytical tools based on adaptive classifier Cascade ARTMAP / I. L. Kashirina, K. A. Fedutinov, Y. V. Bondarenko // Journal of Physics: Conference Series 2020. – Vol. 1479. – P. 12066.

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК РФ*

4. Каширина, И. Л. Кластеризация непрерывного потока данных на основе обобщенной модели нейронной сети семейства ART / И. Л. Каширина, К. А. Федутин // Системы управления и информационные технологии. – 2018. – Т. 71. – № 1. – С. 33-39.
5. Каширина, И. Л. Применение сети FUZZY ARTMAP в интеллектуальных системах обнаружения вторжений / И. Л. Каширина, К. А. Федутин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2018. – Т. 6. – № 3 (22). – С. 243-257.
6. Каширина, И. Л. Построение решающих правил с помощью нейронной сети ARTMAP / И. Л. Каширина, К. А. Федутин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7. – № 3. – С. 140-147.
7. Федутин, К. А. Структуризация экологической информации с применением геоинформационных технологий / К. А. Федутин // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2019. – Т. 7. – № 4. – С. 131-140.
8. Федутин, К. А. Машинное обучение в задачах поддержки принятия решений при управлении охраной природы / К. А. Федутин // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 9. – URL: [www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7186](http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7186).

*Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ*

9. Федутинов, К. А. Анализ экологической информации на основе кластерной структуризации данных / К. А. Федутинов, И. Л. Каширина // Свидетельство на программу для ЭВМ № 2019613816 от 22 марта 2019 г.

*Статьи и материалы конференций*

10. Федутинов, К. А. Применение обобщённой модели нейронных сетей семейства ART к оценке экологического состояния региона / К. А. Федутинов // Оптимизация и моделирование в автоматизированных системах: материалы Всероссийской молодежной научной школы. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. – Ч. 2. – С. 15-22.
11. Каширина И. Л. Построение нейросетевого классификатора на основе сетей семейства ART / И. Л. Каширина, К. А. Федутинов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научно-технической конференции. – Воронеж: ВГУ, 2017. – С. 700-704.
12. Каширина, И. Л. Решение многокритериальной задачи планирования и управления / И. Л. Каширина, К. А. Федутинов // Информатика: проблемы, методология, технологии: сборник материалов XVII международной научно-методической конференции. – Воронеж, 2017. – С. 327-332.
13. Федутинов, К. А. Системный анализ мониторинговой экологической информации с помощью нейронной сети FUZZY ART / К. А. Федутинов, И. Л. Каширина // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж: ВГУ, 2018. – С. 1565- 1572.
14. Каширина, И. Л. Нейросетевой подход к комплексированию экологической информации на основе кластерной структуризации данных / И. Л. Каширина, К. А. Федутинов // Информатика: проблемы, методология, технологии: сборник материалов XIX международной научно-методической конференции. – Воронеж, 2019. – С. 1469-1473.
15. Федутинов, К. А. Модификация нейронной сети FUZZY ARTMAP в условиях пересекающихся классов / К. А. Федутинов // Управление большими системами: материалы XVI Всероссийской школы-конференции молодых ученых. – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2019. – С. 449-454.
16. Федутинов, К. А. Разработка моделей управления в системах экологического мониторинга на основе сетей ART / К. А. Федутинов // Современные проблемы физико-математических наук: материалы V Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Орёл, 2019. – С. 156-162.
17. Федутинов К. А. Использование адаптивного классификатора Cascade ARTMAP в составе систем экологического мониторинга / И. Л. Каширина, К. А. Федутинов // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной научной конференции. – Воронеж, 2019. – С. 565- 572.

18. Федутинов, К. А. Структурно-функциональная организация системы поддержки управления охраной природы на основе мониторинговых данных // Проектное управление в строительстве. – 2021. – № 2. – С. 43-51.
19. Каширина, И. Л. Разработка средств интеллектуальной поддержки принятия решений на основе данных мониторинга / И. Л. Каширина, К. А. Федутинов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2023. – № 17(3). – URL: <https://vestnikvvt.ru/ru/journal/pdf?id=192>.

Подписано в печать 20.10.2023. Формат 60x84/16.  
Усл. печ. л. 1,3. Тираж 80 экз. Заказ № 610

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в типографии Издательского дома ВГУ  
394018 Воронеж, ул. Пушкинская, 3