

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
"НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. Н. П. ОГАРЁВА"**

На правах рукописи



ЯМАШКИН Станислав Анатольевич

**ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ
СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ**

Специальность 2.3.4. Управление в организационных системах
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
Бершадский Александр Моисеевич,
доктор технических наук, профессор

Саранск – 2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ПОСРЕДСТВОМ ИНФРАСТРУКТУР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ	18
1.1 Проектирование, разработка, внедрение и использование инфраструктур пространственных данных как инструмента управления организационными системами.....	18
1.2 Концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД основанная на процессах идентификации, анализа и мониторинга рисков.....	35
1.3 Выводы по первой главе.....	51
2 ИНТЕГРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ	53
2.1 Структурно-компонентная схема инфраструктур пространственных данных.....	53
2.2 Системные аспекты анализа геопространственной информации в цифровых инфраструктурах пространственных данных.....	60
2.3 Организация микросервисной архитектуры управления пространственными данными на основе мультимодельного хранилища.....	70
2.4 Инфраструктуры пространственных данных как центральное звено изготовления картографических материалов	87
2.5 Выводы по второй главе.....	92
3 МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ	94
3.1 Геосистемный подход как инструмент решения открытых проблем в области решения задачи интерпретации пространственных данных	94
3.2 Глубокая нейросетевая модель для классификации геосистемной модели территории	105
3.3 Пространственное прогнозирование чрезвычайных процессов в организационных системах на основе геосистемного подхода	120

3.4 Выводы по третьей главе.....	133
4 ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ И АНСАМБЛЕЙ КЛАССИФИКАТОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ	135
4.1 Методика построения и оптимизации моделей машинного обучения на основе вычисления синтетических территориальных признаков.....	135
4.2 Методика формирования ансамблей неглубоких моделей для классификации земель	152
4.3 Выводы по четвертой главе	163
5 РЕПОЗИТОРИЙ ГЛУБОКИХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ...	165
5.1 Разработка архитектуры репозитория глубоких нейронных сетей в системе цифровой инфраструктуры пространственных данных.....	165
5.2 Интеграция данных о глубоких нейросетевых моделях в репозитории.....	170
5.3 Программная реализация графических пользовательских и прикладных программных интерфейсов репозитория.....	185
5.4 Выводы по пятой главе.....	192
6 ГЕОПОРТАЛЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ	194
6.1 Принципы разработки и оптимизации геопортального каркаса	194
6.2 Проектно-ориентированные геопортальные системы в решении задач управления организационными территориально распределенными системами ..	208
6.3 Выводы по шестой главе	225
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	228
Список сокращений	233
Список использованных источников	235
Приложение А. Справочные материалы.....	265
Приложение Б. Результаты интеллектуальной деятельности	271
Приложение В. Акты внедрения	289
Приложение Г. Дипломы и другие награды.....	295

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Развитие технологий интеграции, обработки, анализа и распространения пространственных данных приводит к росту востребованности географической информации при решении задач управления в территориально распределенных организационных системах. Так, важное значение в решении задачи усиления связанности территории Российской Федерации, определенной как приоритетное направление для реализации Стратегии научно-технологического развития РФ (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642), играют процессы внедрения и эффективного использования инфраструктур пространственных данных (ИПД), решающих задачи прогнозирования пространственных процессов, анализа структуры и состояния организационных территориально распределенных систем. Вследствие того, что интегрируемые пространственные данные характеризуются большим объемом и сложностью, значимое место в ИПД занимают методы и алгоритмы автоматизированного интеллектуального анализа, направленные на решение проблемно-ориентированных задач в организационных системах. В Постановлении Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2021 года №2148 об утверждении государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» определена важность осуществления мероприятий, направленных на преодоление проблемы «ограниченного использования современных российских геоинформационных технологий, высокопроизводительной обработки пространственных данных». Предметом анализа в ИПД могут выступать массивы пространственных данных о территориально распределенных системах. Результаты использования пространственных данных применимы в управлении организационными системами, деятельность которых распределена на значительной территории.

Инфраструктуры пространственных данных при этом обеспечивают использование географической информации в организационных системах при решении сложных экономических, социальных и экологических проблем на местном, региональном и национальном уровнях. Позитивный опыт исследований проблемных

точек построения цифровых инфраструктур пространственных данных в университетах и научно-исследовательских институтах, в том числе Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Институте географии РАН, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Волгоградском государственном техническом университете, Астраханском государственном университете им. В. Н. Татищева, Воронежском институте высоких технологий, Воронежском государственном техническом университете, Казанском федеральном университете, Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК), Санкт-Петербургском горном университете, Самарском государственном аэрокосмическом университете им. С. П. Королева, Пензенском государственном университете, Петрозаводском государственном университете, Институте географии Сербской академии наук и искусств.

Решение задачи разработки новых эффективных методов и алгоритмов интеграции информации в инфраструктурах пространственных данных должно основываться на междисциплинарных достижениях в области теории управления организационными системами, геоинформатики, наук о Земле, программной инженерии, машинного обучения и интеллектуального анализа данных. Проведение научных исследований и получение ключевых результатов диссертационного исследования основано на междисциплинарных научных работах зарубежных, советских и российских ученых в области информатики и наук о Земле: А. М. Бершадского (геоинформационный подход к мониторингу социально-экономических систем) [6, 7], А. С. Бождая (концепция комплексной инфраструктуры территории) [9, 10], К. П. Космачёва (экологическая экспертиза) [39], А. В. Кошкарева (построение геопортальных систем) [41, 40], А. Г. Кравец (согласованное управления социально-экономическими системами) [42], И. Я. Львовича (использование информационных систем в управлении производством) [48], Я. Е. Львовича (многоальтернативная оптимизация систем на основе мониторинговой информации) [49], В. В. Мясникова (обработка цифровых сигналов и данных космического мониторинга) [53], В. А. Николаева (классификация ландшафтов) [54], Д. А. Новикова (управление организационными системами) [56, 55], Д. С. Парыгина (управление развитием

урбанизированных территорий) [224], Ю. Г. Пузаченко (разнообразие ландшафта) [22], В. П. Савиных (дистанционное зондирование Земли из космоса) [67], Н. А. Солнцева (региональное ландшафтоведение) [71], В. В. Сергеева (технологии решения прикладных задач обработки данных ДЗЗ) [68], В. Б. Сочавы (учение о гео-системах) [72], А. И. Таганова (научные основы идентификации, анализа и мониторинга рисков) [75], А. Г. Чхартишвили (информационное управление в организационных системах) [82, 81], Р. А. Шовенгердта (модели и методы обработки космической съемки) [85], А. А. Ямашкина (анализ природно-социально-производственных систем) [96, 102]. В значительной степени научные исследования опираются на достижения ведущих ученых в области вычислительных технологий: А. И. Галушкина (нейрокомпьютерные технологии) [19], Я. Лекуна (глубокое обучение и сверточные нейронные сети) [198].

При разработке практико-ориентированных технологий управления организационными территориально распределенными системами приходится сталкиваться с научной проблемой, основанной на необходимости поиска единого интегрального подхода к поддержке принятия управленческих решений, включающего комплексное последовательное обеспечение этапов систематизации, анализа и распространения пространственных данных. Решение обозначенной научной проблемы возможно посредством разработки риск-ориентированной концепции внедрения, поддержки и использования ИПД, новых методов и алгоритмов автоматизированного интеллектуального анализа пространственных данных и проблемно-ориентированных геопортальных систем управления организационными территориально распределенными системами, как точек доступа к тематическим массивам пространственных данных.

Объект исследования – процесс поддержки принятия решений в области управления территориально распределенными системами на основе пространственных данных.

Предмет исследования – концепции, методы и алгоритмы поддержки принятия решений в области управления территориально распределенными организационными системами на основе пространственных данных.

Цель исследования – разработка концепции, методов и алгоритмов поддержки принятия решений в области управления территориально распределенными организационными системами на основе пространственных данных с целью обеспечения условий устойчивого развития регионов.

Достижение поставленной цели основано на последовательном решении следующих **основных задач исследования**.

1. Развитие теоретических основ управления организационными системами на основе анализа пространственных данных об организационных территориально распределенных системах для обеспечения процесса принятия управленческих решений.

2. Разработка мультимодельной системы интеграции пространственных данных о территориально распределенных системах с целью формирования согласующихся массивов информации о функционировании организационных систем для поддержки принятия управленческих решений.

3. Проектирование, разработка и оптимизация новых методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений по оптимизации взаимодействия природных и социальных подсистем на основе интерпретации данных дистанционного зондирования с использованием технологий глубокого машинного обучения и геосистемного подхода.

4. Разработка алгоритмического обеспечения проблемно-ориентированных систем управления для решения задачи классификации территориальных систем на основе комплексного анализа синтетических территориальных метрик и вспомогательной пространственной информации посредством ансамблей нейросетевых моделей.

5. Разработка репозитория глубоких нейросетевых моделей для решения задачи анализа пространственных данных в проблемно-ориентированных системах управления с целью решения проектных задач в области обеспечения условий развития территориально распределенных систем на основе методов интеллектуальной поддержки принятия решений.

6. Разработка геопортальной технологии для решения задачи интеграции знаний, визуализации и распространения пространственных данных ИПД как практико-ориентированной технологии управления пространственно распределенными организационными системами.

Последовательная проработка поставленных задач позволила решить **научную проблему** разработки интегрального подхода к поддержке принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах, основанного на комплексном последовательном обеспечении этапов систематизации, анализа и распространения пространственных данных. В ходе проведения диссертационного исследования получены **новые научно обоснованные решения** в области обеспечения поддержки принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах на основе пространственных данных, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Развитие теории в области обеспечения интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах выстраивается на основе совместного использования новой риск-ориентированной концепции внедрения и развития ИПД, алгоритмов подготовки и анализа пространственных данных на основе геосистемного подхода, платформенного решения для развертывания геопорталов и мультимодельного подхода к интеграции пространственных данных.

Методология и методы исследования. При выполнении диссертационного исследования использованы методы управления организационными территориально распределенными системами, машинного обучения, проектирования автоматизированных систем управления. При разработке комплексов программ и информационных систем использованы методы программной инженерии, проектирования баз данных, объектно-ориентированного проектирования и программирования, анализа пользовательского опыта при проектировании графических интерфейсов.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки):

– пункту 1 «Разработка теоретических основ управления в организационных системах» (разработана концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД для решения задач управления организационными территориально распределенными системами на основе процессов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками (глава 1).

– пункту 4 «Разработка информационного и программного обеспечения систем управления и механизмов принятия решений в организационных системах» (разработаны мультимодельная система интеграции пространственных данных в инфраструктуре пространственных данных (глава 2) и репозиторий глубоких нейросетевых моделей (глава 5) для обеспечения процесса поддержки принятия решений при управлении организационными территориально распределенными системами);

– пункту 9 «Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах» (разработаны средства интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений на основе интерпретации пространственных данных посредством глубоких нейросетевых моделей (глава 3) и ансамблей классификаторов (глава 4));

– пункту 11 «Разработка практико-ориентированных технологий управления организационными системами» (разработан геопортальный каркас для эффективного развертывания геопорталов для поддержки принятия решений в процессе мониторинга и управления организационными территориально распределенными системами (глава 6)).

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем.

1. Предложена концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД, *отличающаяся* интеграцией процессов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками в процесс итерационного развития инфраструктуры, *позволяющая* повысить эффективность решения задач информационного управления в территориально распределенных организационных системах.

2. Разработана мультимодельная система интеграции пространственных

данных об организационных территориально распределенных системах, *отличающаяся* комбинированным использованием систем управления базами данных различного класса на основе микросервисного подхода для манипулирования знаниями о геосистемах, *позволяющая* решить задачу консолидации разнородных пространственных данных в территориально распределенных организационных системах.

3. Предложен метод поддержки принятия управленческих решений на основе интерпретации данных ДЗЗ с использованием глубокого машинного обучения, *отличающийся* способом анализа разномасштабных изображений территории посредством новой архитектурной организации глубокой нейросетевой модели, основанном на применении геосистемного подхода к подготовке и расширению массивов пространственных данных, *позволяющий* повысить точность решения задач классификации и интерпретации данных об организационных территориально распределенных системах.

4. Разработано алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированных систем управления пространственными данными, основанное на решении задачи классификации пространственной информации с использованием ансамблей неглубоких нейросетевых моделей, *отличающееся* наличием алгоритма предварительной подготовки и снижения размерности пространственных данных посредством расчета территориальных метрик, а также новым способом объединения моделей машинного обучения в ансамбли посредством расчета весовых коэффициентов классификаторов на основе матриц ошибок, *позволяющее* повысить устойчивость систем классификации к проблеме переобучения и снизить требования к объему размеченных наборов данных и мощности используемого аппаратного обеспечения.

5. Разработан и реализован в виде комплекса программ репозиторий глубоких нейросетевых моделей анализа пространственных данных, *отличающийся* использованием модели данных, в рамках которой глубокие нейронные сети хранятся связано с реестрами проектных задач и анализируемых пространственных данных, новым графическим языком проектирования моделей с возможностью их

трансляции в программный код, информационной системой подбора модели, *позволяющий* решить задачу накопления моделей машинного обучения в проблемно-ориентированных системах управления организационными территориально распределенными системами для эффективного решения проектных задач в области обеспечения условий устойчивого развития регионов.

6. Разработана и реализована в виде программного каркаса практико-ориентированная геопортальная технология управления пространственно распределенными организационными системами, *отличающаяся* новой модульной организацией компонентов и комплексным подходом к решению задач мониторинга, удаленного управления и аналитики, *позволяющая* обеспечить эффективное развертывание веб-ориентированных геоинформационных систем для визуализации и распространения пространственных данных об организационных территориально распределенных системах.

Теоретическая значимость работы заключается в развитии теории в области обеспечения интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах. Предложенные теоретические положения опираются на новую риск-ориентированную концепцию внедрения и развития ИПД, использование алгоритмов подготовки и анализа пространственных данных на основе геосистемного подхода, платформенное решение для развертывания геопорталов и мультимодельный подход к интеграции пространственных данных.

Практическая значимость результатов исследования состоит в том, что разработанные алгоритмы и программные решения в области интеграции, анализа, визуализации и распространения пространственных данных позволяют решать задачи управления и мониторинга состояния организационных территориально распределенных систем. Научные и практические результаты диссертационного исследования внедрены в следующих учреждениях и организациях.

1. Институт Географии «Йован Цвийич» Сербской Академии наук и Искусств – результаты использованы в рамках совместных научно-исследовательских и проектных работ по разработке и практическому использованию новых алгоритмов

анализа пространственных данных для обеспечения поддержки принятия управленческих решений, выполненных при поддержке Министерства образования, науки и технологического развития Республики Сербия (Грант III 47007).

2. ФГБУ «Астраханский государственный заповедник» – предложенные решения использованы при решении задачи анализа ландшафтного разнообразия для принятия управленческих решений.

3. ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет» – предложенные методы и алгоритмы анализа и визуализации пространственных данных использованы при разработке цифрового атласа Астраханской области.

4. Главное управление МЧС России по Республике Мордовия – способ интерпретации данных ДЗЗ и данные о природных и социальных системах Мордовии использованы при решении задач анализа пространственной информации для поддержки принятия решений.

5. Отделение Русского географического общества в Республике Мордовия – каркас на основе новой архитектуры геопортальной системы использован при разработке геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия».

6. ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева» – результаты научно-исследовательских работ используются при подготовке студентов по направлениям 09.03.01 – «Информатика и вычислительная техника» и 09.04.01 – «Информатика и вычислительная техника».

На защиту выносятся следующие положения.

1. Концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД, основанная на интеграции процессов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками в процесс итерационного развития инфраструктуры.

2. Мультимодельная система интеграции пространственных данных об организационных территориально распределенных системах, *основанная на* комбинированном использовании систем управления базами данных различного класса с применением микросервисного подхода для манипулирования знаниями о

геосистемах.

3. Метод поддержки принятия решений на основе интерпретации данных ДЗЗ с использованием глубокого машинного обучения, *отличающийся* способом анализа разномасштабных изображений геосистемной модели территории посредством новой архитектурной организации глубокой нейросетевой модели.

4. Алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированных систем управления пространственными данными, основанное на решении задачи классификации пространственной информации с использованием ансамблей неглубоких нейросетевых моделей, включающее алгоритм предварительной подготовки и снижения размерности пространственных данных посредством расчета территориальных метрик, а также новым способом объединения моделей машинного обучения в ансамбли.

5. Репозиторий глубоких нейросетевых моделей анализа пространственных данных, отличающийся использованием модели данных, в рамках которой глубокие нейронные сети хранятся связано с реестрами проектных задач и анализируемых пространственных данных, новым графическим языком проектирования моделей с возможностью их трансляции в программный код, информационной системой подбора модели.

6. Практико-ориентированная геопортальная технология управления пространственно распределенными организационными системами, *позволяющая* обеспечить эффективное развертывание веб-ориентированных геоинформационных систем для визуализации и распространения пространственных данных об организационных территориально распределенных системах.

Достоверность научных результатов. Представленные в диссертации научные положения, теоретические выводы и практические рекомендации подтверждаются внедрением результатов исследования в организационные системы и апробацией результатов на конференциях различного уровня.

Личный вклад автора. Все научные результаты, представленные в диссертации, принадлежат лично автору. Участие соавторов заключалось в методических консультациях и выполнении совместных научно-исследовательских работ по

грантам РФФИ, РНФ, РГО, ФСИ в области оптимизации функционирования и управления территориально распределенными системами.

Апробация работы. Положения диссертации апробированы на всероссийских и международных конференциях: Шестнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD-2023) (Москва, Россия, 2023), VI и VII Международной конференции «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2022 и ICST-2023) (Астрахань, Россия, 2022 и 2023), V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (ПУТС-2023) (Санкт-Петербург, Россия, 2023), Международные конференции «InterCarto. InterGIS» (Тбилиси, Грузия, 2020; Майкоп, Россия, 2022; Улан-Удэ, Россия, 2023), XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (Ростов-на-Дону, Россия, 2022), XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (Нижний Архыз, Россия, 2022), Ural Environmental Science Forum «Sustainable Development of Industrial Region» (Челябинск, Россия, 2021), 5, 6 и 7 Computational Methods in Systems and Software (Всетин, Чехия, 2021, 2022 и 2023), 1st Conference on Sustainable Development: Industrial Future of Territories, IFT 2020 (Екатеринбург, Россия, 2020), IX Международный научный форум молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников (Астрахань, Россия, 2020), XIV международная научно-практическая конференция «Наука и образование XXI века» (Рязань, Россия, 2020), XVIII Международная научно-практическая конференция «Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России» (Пенза, Россия, 2020), IX международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, Россия, 2020), IV Всероссийская научно-техническая конференция «Геоэнергетика-2019» (Грозный, Россия, 2019), Международная научно-практическая конференция «Глобальные климатические изменения: региональные эффекты, модели, прогнозы» (Воронеж, Россия, 2019), Международная научно-практическая конференция «Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития» (Минск, Белоруссия, 2019), XI международная научная конференция «Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования,

проблемы внедрения в производство» (Казань, Россия, 2019), Международная научно-практическая конференция «Теория и практика гармонизации взаимодействия природных, социальных и производственных систем региона» (Саранск, Россия, 2017).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 122 научные работы, в том числе 54 статьи в изданиях из перечня ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ (из них 22 – по специальностям 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки), 05.13.10. Управление в социальных и экономических системах (технические науки) и 32 – в области применения результатов исследования), 38 статей в изданиях, индексируемых реферативными базами данных и системами цитирования Web of Science или Scopus (в том числе в изданиях 1 и 2 квартилей), 12 докладов на международных, всероссийских и региональных конференциях. Получены 1 патент на изобретение, 17 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ и БД. По теме диссертации изданы 2 коллективные монографии.

Поддержка проведения диссертационного исследования. Работа выполнена при финансовой поддержке ведущих Российских научных и общественных фондов и организаций в ходе исполнения и руководства НИР по грантам: РНФ № 22-27-00651 (тема научного исследования: «Цифровые инфраструктуры пространственных данных и модели метагеосистем территорий для устойчивого развития регионов»); РФФИ №20-37-70055 (тема научного исследования: «Интеграция знаний в цифровых инфраструктурах пространственных данных для принятия управленческих решений в области устойчивого развития»); Президента Российской Федерации № МК-199.2021.1.6 (тема научного исследования: «Разработка репозитория глубоких нейросетевых моделей для анализа и прогнозирования развития пространственных процессов»); РГО – договор №01/2014-ДП2 (тема научного исследования: «Создание геопортала "Республика Мордовия"»), договор №38/2016-Р (тема научного исследования: «Серия карт РГО "Природное и культурное наследие Республики Мордовия"»), договор №42/2020-Р (тема научного исследования: «Проведение всероссийского чемпионата по географии среди школьников "Мое Отечество - Россия"»), договор № 04/2022-Р (тема научного исследования:

«Интерактивная карта "Природное и культурное наследие Мордовии. Путешествуем с Русским географическим обществом"»); Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программам молодежного научно-инновационного конкурса УМНИК по договору № 8562ГУ/2015 (тема научного исследования: «Разработка автоматизированной системы анализа данных ДЗЗ для мониторинга состояния земель и прогнозирования стихийных природных процессов») и СТАРТ по договору № 310ГС1ЦТС10-D5/80245 (тема научного исследования: «Разработка прототипа геопортальной программной платформы для управления пространственно-распределенными ресурсами»); Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках программы социально-экономического развития РМ на 2022-2026 годы (тема научного исследования: «Создание лаборатории искусственного интеллекта»); ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарёва», конкурс внутривузовских научных грантов в области гуманитарных, естественных и инженерно-технических наук 2023 года (тема научного исследования: «Разработка системы дистанционного мониторинга и управления пространственно-распределенными объектами на основе концепции Интернета вещей с применением технологии LoRa сетей»). В ходе научного руководства междисциплинарными НИР по грантам РФФИ №20-37-70055 и Президента Российской Федерации № МК-199.2021.1.6 были поставлены проектные задачи, в процессе решения которых молодыми учеными-исполнителями Занозиным В. В. и Зарубиным О.А. были написаны и защищены диссертации на соискание ученой степени кандидата наук.

Результаты работы над диссертацией представлены на конкурсах и отмечены наградами (приложение Г): диплом лауреата Огаревской премии за научную разработку «Геопортал Русского географического общества в Республике Мордовия» (2016 г.), диплом «Преподаватель года» (2018 г.) и «Доцент года» (2023 г.) ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева», диплом победителя Республиканского конкурса научных работ и инновационных идей с проектом «Разработка цифровой инфраструктуры пространственных данных для обеспечения информационной поддержки устойчивого

развития Республики Мордовия посредством геопортальных систем» (2019 г.), диплом II степени за учебное пособие «Методология и современные геоматические методы в области анализа, визуализации и распространения пространственных данных» (2019 г.), диплом победителя второго этапа Международного конкурса World AI&Data Challenge Агентства стратегических инициатив по продвижению новых проектов за цифровое решение «Прогнозирование уровней воды в период весеннего половодья» (2020 г.), диплом призера (3 место) третьего этапа этого же конкурса (2021 г.), диплом Российской Академии естественных наук в рамках Международной экологической премии «Экомир» (2024 г.). Научные достижения, полученные в ходе работы над диссертацией, отмечены: почетной грамотой Министерства промышленности, науки и новых технологий Республики Мордовия (2020 г.), благодарностью Правительства Республики Мордовия (2022 г.), именной стипендией Русского географического общества (2022 г.), благодарностью Главы Республики Мордовия (2024 г.).

Объем и структура диссертации. Работа состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка, включающего 264 наименования, приложений. Текст изложен на 264 страницах, содержит 56 рисунков и 10 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность профессорам А. М. Бершадскому, А. А. Ямашкину и С. А. Федосину за неоценимую поддержку при проведении исследований.

1 УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ПОСРЕДСТВОМ ИНФРАСТРУКТУР ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ

1.1 Проектирование, разработка, внедрение и использование инфраструктур пространственных данных как инструмента управления организационными системами

В настоящее время государственные и коммерческие организации в различных странах мира вкладывают значительные ресурсы в развитие инфраструктур пространственных данных [162] и проектно-ориентированных геопорталов [1]. Функционирование информационных систем данного класса основано на использовании больших массивов пространственных данных и нацелено на решение задач устойчивого развития территориально распределенных организационных систем, в том числе их природных и социальных компонентов.

В Постановлении Правительства Российской Федерации от 1 декабря 2021 г. № 2148 об утверждении Государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных» отмечена целесообразность мероприятий, направленных на преодоление проблемы «ограниченного использования современных российских геоинформационных технологий, высокопроизводительной обработки пространственных данных, искусственного интеллекта для повышения эффективности цифровизации этой сферы».

В рамках приоритета научно-технического развития (НТР) Российской Федерации, обозначенного в Стратегии НТР РФ (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642) – Н6 «Связанность территории Российской Федерации за счет создания интеллектуальных транспортных и телекоммуникационных систем...», обозначена необходимость решения задачи создания информационной системы объективного дистанционного мониторинга объектов и ресурсов на территории РФ для обеспечения информационной связанности

организационных систем страны, а также разработки многофункциональных модулей для комплексного освоения территорий.

Дополнительно отметим, что решение задачи разработки новых эффективных алгоритмов анализа пространственных данных представляет собой научную проблему, которую следует решать в рамках приоритета Н1 «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта».

О значимости проблемы эффективного внедрения и использования ИПД говорит позитивный опыт других стран. Так, директива 2007/2/ЕС Европейского парламента и Совета от 14 марта 2007 г. о создании инфраструктуры пространственной информации в европейском сообществе (INSPIRE) ориентирована на последовательное внедрение ИПД государствами – членами Европейского союза для обеспечения эффективного обмена пространственной информацией об окружающей среде между организациями частного и государственного секторов и упрощения доступа к ней общественности. Директива затрагивает 34 тематические категории в области анализа и практического использования пространственных данных, включая кадастровую информацию, сведения о рельефе, структуре землепользования, свойствах геофизической оболочки, ресурсном потенциале, инфраструктуре и хозяйстве, зонах природного и техногенного риска. Директива вступила в силу 15 мая 2007 г. и была в определенной мере реализована к 2021 г.

ИПД различного масштаба и специализации представляют собой эффективный инструмент управления территориально распределенными организационными системами. Под термином «управление» при этом понимается целенаправленное воздействие на управляемую систему [58], включающую природные, социальные и производственные компоненты, для обеспечения ее необходимого поведения и состояния. Управляемая территориально распределенная система может существовать независимо от объекта управления, в ее рамках могут автономно приниматься решения. В процессе управления может оказываться воздействие на целевые

функции системы, ограничения и нормы деятельности ее компонентов, а также ее информированность [82]. В связи с этим можно говорить соответственно о мотивационном [57], институциональном [55] и информационном [56] управлении.

Информированностью субъекта управления, выраженной в объеме, структуре и свойствах информации, которой он обладает при принятии решений, объект управления может в определенной степени управлять исходя из особенностей целевой функции управления или особенностей состояния, в которое необходимо привести управляемую систему [56]. В условиях воздействия информационного управления в территориально распределенной системе происходит изменение информированности субъектов для достижения цели управления. Информация при этом сама по себе выступает объектом управления, состояние которого формируется на основе целевого воздействия для формирования информационного равновесия, при котором конечное число одинаково информированных управляемых участников – агентов организационной системы выбирают одинаковые действия для максимизации значения своей целевой функции [81].

В решении задачи управления территориально распределенными организационными системами актуально решение задачи обеспечения согласованного управления, при котором участники управляемой системы осведомлены о существовании управления, его целях и доверяют управляющим воздействиям субъекта управления [82, 42, 43]. Данное утверждение подтверждается в том числе при формировании стратегий устойчивого городского развития на основе данных комплексного мониторинга [224]. Информационные системы, формируемые на основе ИПД могут выполнять функцию оперативного диспетчерского управления в территориально распределенных организационных системах, решая задачи управления материальными и энергетическими производственными потоками [48] на основе многоальтернативной оптимизации [49].

ИПД играют важную роль в обеспечении взаимодействия экономических, социальных и природных компонентов развития территориально распределенных организационных систем, являются основой для решения стратегических задач на организационном уровне, предоставляя возможность проведения анализа структуры

и состояния земель, а также прогнозирования развития природных и природно-техногенных процессов для решения задач информационного управления территориально распределенными системами. Формирование программ устойчивого развития регионов требует разработки, внедрения и развития инструментов планирования и управления территориально распределенными организационными системами [25]. Процессы внедрения ИПД в различных регионах России и мира имеют серьезные отличия, характеризуюсь различной степенью интенсивности, зрелости и эффективности [76]. Представим перечень организационных систем, процессы принятия управленческих решений в которых должны быть основаны на использовании пространственных данных и автоматизированных инструментов их анализа:

- крупные организации агропромышленного и топливно-энергетического комплексов, ориентированные на добычу, распределение и потребление территориально распределенных ресурсов;
- организации и службы МЧС, занимающиеся мониторингом и ликвидацией последствий природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций, стихийных процессов и явлений;
- органы федерального, регионального и муниципального управления;
- логистические компании, ориентированные на обработку, перевозку и распределение грузов на значительное расстояние;
- организации, специализирующиеся на распространении цифрового пространственно-ассоциированного контента.

Анализ международного опыта и современного состояния развития ИПД и геопорталов [40, 26, 150] позволяет выделить системные компоненты инфраструктур пространственных данных.

1. *Ученые и специалисты*, занимающиеся разработкой, внедрением, поддержкой и использованием ИПД в государственных и коммерческих организациях с целью обеспечения взаимодействия между людьми и данными в процессе принятия управленческих решений. Важными участниками в этой системе являются конечные пользователи, которые заинтересованы в проблемно-ориентированном использовании ИПД.

2. Система пространственных данных, включая данные дистанционного зондирования Земли (космическую и аэрофотосъемку), карты систем землепользования, цифровые модели рельефа, векторные данные (гидрологические сети, дорожная инфраструктура, площадные и точечные объекты), кадастровую информацию, метайнформацию о пространственных объектах. Структура мультимодельных пространственных баз данных основывается на тематических компонентах, содержащих информацию о природной, социальной, производственной подсистемах. Система пространственных данных региональной ИПД формирует информационный портрет территории, обеспечивает платформу для решения задач поддержки принятия управленческих решений. На основе массивов пространственных данных строится базовая цифровая синтетическая карта геосистем, обеспечивающая оценку пространственной организации, структуры и однородности природных и социальных систем, позволяя осуществлять поиск взаимосвязей исследуемых объектов и явлений. В. П. Савиных отмечает, что геопространственные данные представляют собой актив и тактический ресурс для принятия решений во многих областях, таких как управление социальными процессами, повышение эффективности сельского хозяйства, борьба со стихийными бедствиями, общественная безопасность, координация поиска полезных ископаемых, охрана окружающей среды [67].

3. Разработка и внедрение автоматизированных технологий, методов и алгоритмов обработки, анализа, хранения, визуализации и распространения пространственных данных для решения задач в области управления территориально распределенными системами. Важное значение имеет повышение эффективности способов интерпретации материалов космической съемки и иных наборов пространственных данных средствами машинного обучения.

4. Развитие нормативной базы и институциональных механизмов ИПД, формирующих нетехнические аспекты обеспечения возможности использования пространственных данных на основе национальных инициатив в области развития геоинформационных технологий [236] и работа организаций по разработке стандартов (таких как Открытый геопространственный консорциум (Open Geospatial

Consortium), Международная организация по стандартизации (International Standards Organization) [237]. В России требования к ИПД регламентируются национальными стандартами, разрабатываемыми в том числе ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД», АО «Всероссийский научно-исследовательский институт сертификации» (Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 58570–2019, введен в 2020 г.).

Проектирование, разработка, внедрение и использование ИПД обеспечивает выработку формализованных критериев оценки эффективности решения задач хранения, анализа и распространения пространственно-временных данных. Значительный шаг к пониманию особенностей процесса формирования ИПД заложен в концепции комплексной инфраструктуры территории (КИТ), определяемой как совокупность антропогенных, техногенных и природно-географических систем, представляющих собой управляемую, системную целостность в рамках выбранного пространственно-временного масштаба [6, 10]. Эффективность процесса формирования пространственных баз данных может быть значительно усилена посредством привлечения геосистемного подхода [72], предполагающего необходимость иерархического описания геосистем различного порядка.

Внедрение ИПД обеспечивает поддержку принятия научно обоснованных управленческих решений в организационных системах [36, 9]. В решении задачи управления организационными территориально распределенными системами федерального масштаба целесообразно совместное использование восходящего (региональные ИПД обеспечивают функционирование федеральной ИПД) и нисходящего (федеральная ИПД обеспечивает обмен пространственными данными с региональными ИПД) подходов.

Одним из ключевых направлений решения проблемы внедрения ИПД для обеспечения устойчивого развития организационных территориально распределенных систем являются разработка и применение автоматизированных методов и алгоритмов анализа пространственных данных. Машинное обучение играет здесь важную роль, позволяя актуализировать хранилища больших объемов пространственных данных, распространяемых через геопортальные системы [244].

Внедрение геоинформационных технологий в организационные системы – важная научная проблема, решение которой нацелено на увеличение экономической эффективности и сокращение негативного влияния рисков различной природы.

На сегодняшний день обеспечение информацией и обработка пространственно-временных данных стали важнейшей составляющей в управлении организационными территориально распределенными системами для принятия обоснованных решений в различных областях. В этом контексте успешная реализация цифровых ИПД требует комплексного подхода, включающего решение следующих ключевых задач [8].

1. Разработка теоретических основ управления организационными системами на основе анализа пространственных данных о природных и социальных подсистемах для обеспечения процесса принятия управленческих решений.

2. Разработка мультимодельных систем хранения пространственных данных об организационных территориально распределенных системах, обеспечивающих практико-ориентированное использование знаний о территориально распределенных организационных системах в процессе управления.

3. Проектирование, разработка и оптимизация новых методов, алгоритмов и комплексов программ для решения задачи интеллектуальной поддержки принятия решений по оптимизации процесса управления природными и социальными подсистемами на основе комплексной интерпретации пространственных данных.

4. Разработка и актуализация репозитория алгоритмов и моделей анализа пространственных данных как компонента проблемно-ориентированных систем управления природными и социальными подсистемами.

5. Разработка геопортальных технологий проектно-ориентированной визуализации и распространения пространственных данных для решения задач мониторинга и дистанционного управления территориально распределенными системами.

Анализ отечественного и зарубежного опыта в области разработки и внедрения ИПД проводился с использованием алгоритма, представленного на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Алгоритм систематизации международного опыта в области проблемно-ориентированного использования ИПД

Поддержка принятия решений в области управления организационными территориально распределенными системами должна быть основана на использовании больших массивов разнородных пространственных данных и является востребованной в решении следующих задач: анализ состояния земель [208], управление распределенными в пространстве ресурсами [240], мониторинг состояния окружающей среды [168], прогнозирование развития природных явлений и стихийных процессов [137], оценка социальной мобильности и движения трафика [170]. В данном контексте технологии интеллектуального анализа данных позволяют снизить ресурсоемкость процессов управления.

В ходе анализа и систематизации международного научного опыта интеграции информации в ИПД использовались два подхода. Первая стратегия исследования включала поиск по ключевым словам и их сочетаниям, наиболее релевантным к области научных исследований, таким как «Machine Learning» + «Spatial Data»,

«Geoportal», «Spatial Data Infrastructure». Вторая стратегия основывалась на анализе цитируемых публикаций в авторитетных научных изданиях, специализирующихся в области геоинформатики. Особый акцент делался на изучении научных статей, защищаемых положений диссертаций, монографий, тезисов докладов в сборниках трудов конференций, содержание которых тесно связано с конкретными проектами и задачами в области анализа структуры и состояния природных и социальных систем на основе пространственных данных для обеспечения поддержки принятия управленческих решений. Реализация каждой стратегии опиралась на использование информационных баз данных и систем цитирования (Google Scholar, Scopus, Web of Science, РИНЦ, IEEE Xplore), а также репозитория программного обеспечения (GitHub). Отдельное внимание уделено изучению объектов патентования и открытых программных решений.

По данным поисковой системы Google Scholar, научный интерес по отношению к проблематике машинного анализа пространственных данных (в том числе данных ДЗЗ) растет экспоненциально (рисунок 1.2).

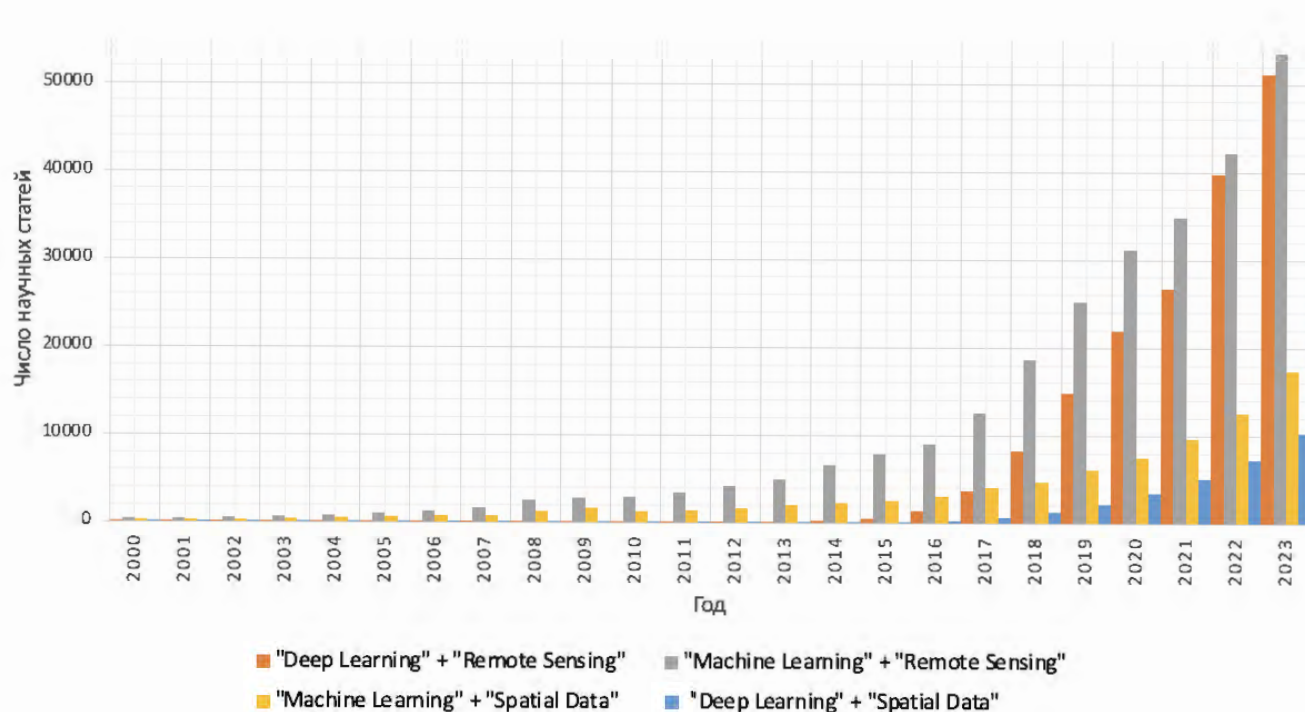


Рисунок 1.2 – Количество научных статей в системе Google Scholar по ключевым запросам из области анализа пространственных данных

Исследования в обозначенной области активизируются с начала XXI века. Во втором десятилетии набирают популярность технологии глубокого машинного обучения, основанные на построении моделей с большим количеством слоев. Наибольшее число публикаций посвящено использованию сверточных [220] и рекуррентных [164] нейронных сетей, автокодировщиков [219], сетей глубокого доверия [258], самоорганизующихся карт [174].

Задача *классификации* в процессе поддержки принятия решений в области управления организационными территориально распределенными системами применима главным образом к анализу структуры и состояния земель на основе материалов дистанционного зондирования Земли. Роль и место космического дистанционного зондирования Земли в геоинформационных системах хорошо изучена проектной группой Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева [32]. Решение задачи выбора наилучшего алгоритма классификации данных ДЗЗ (в том числе гиперспектральных изображений) предложено А. В. Кузнецовым и В. В. Мясниковым [45]. При классификации пространственных данных применяются модели, основанные на комбинированном использовании сверточных и рекуррентных моделей [143, 195, 247]. Детальное решение проблемы обучения глубоких сверточных нейросетевых моделей на основе больших массивов пространственных данных представлено в статье [222]. В решении задачи классификации пространственных данных используются автокодировщики [228, 230].

В современных условиях актуальными задачами являются классификация систем землепользования и детекция пространственных объектов на основе данных ДЗЗ высокого разрешения [178], в том числе посредством ансамблей классификаторов [151]. Для формирования информативных признаков используются сети глубокого доверия [145, 262], методы сокращения размерности для автоматического выделения спектральных и пространственных характеристик [263], методики извлечения признаков по неразмеченным данным [233], извлечение информативных признаков посредством самоорганизующихся карт Кохонена [179, 193]. Обучение представлениям как набор методов, заменяющих ручное

конструирование, применяется при анализе динамических природно-техногенных процессов [152, 165, 197]. Значительный объем информации из пространственных данных может быть извлечен и консолидирован посредством алгоритмов сегментации данных [260, 194].

Решение задачи *обнаружения аномалий* направлено на детекцию редких событий, объектов и наблюдений в процессе управления организационными территориально распределенными системами. В научных публикациях прослеживается актуальность решения задач обнаружения аномалий на гиперспектральных изображениях [31, 157]. Обнаружение природных и социальных паттернов возникновения транспортных пробок [231], анализ процессов движения трафика на основе новостных ресурсов и отслеживания мобильного трафика [129, 239], прогнозирование возникновения экстремальных климатических явлений [140], их обнаружение и локализация [192, 216], семантический и пространственный анализ событий [212].

Решение задачи прогнозирования природных и социальных процессов и явлений должно опираться на анализ сложных свойств и закономерностей взаимодействия распределенных в пространстве территориальных систем [226]. Важной проблемой является увеличение точности классификации при использовании ограниченных данных, в том числе посредством слияния данных из нескольких источников [175, 209]. *Объединение данных* на уровне необработанных массивов информации и слияние на уровне признаков предполагает интеграцию данных из нескольких источников и применяется в решении задач прогнозирования дорожно-транспортных происшествий [227], оценки качества воздуха [130], прогнозирования потоков и траекторий движения [153, 225, 190], спроса на такси [259].

Одновременно с этим применение таких моделей сопряжено с рядом трудностей и угроз:

- нейросетевые модели обучаются и функционируют как «черный ящик», вследствие чего их верификация и интерпретация затруднены;
- обучение глубоких моделей требует ресурсоемкого процесса подготовки огромных банков обучающих данных;

– сложность сопоставления абстрактной математической оценки погрешности модели с требованиями стандартов.

Вследствие этого решение задачи пространственно-временного прогнозирования состояния природных и социальных систем следует искать в области методов, моделей и алгоритмов, функционирующих на основе стратегии «белого ящика», при которой обеспечена верифицируемость каждого компонента сложной системы [177, 176]. При этом реестр анализируемых свойств природных и социальных систем должен формироваться при определенном уровне допущений и абстракции [161].

Разработка моделей для описания динамичных распределенных систем базируется на различных подходах, включая объектно-ориентированные [132], предметно-ориентированные [187], событийные [159] и графовые [248] методы. Графовое моделирование используется для пространственно-временного представления процессов и явлений в виде событий [113]. Важным преимуществом графовых моделей является их гибкость в интеграции с семантическими ограничениями и формализованным подходом к количественной оценке, учитывающей как пространственную, так и временную организацию территориальных систем.

Функционирование систем анализа пространственных данных в ИПД основано на использовании программно-аппаратных компонентов, обеспечивающих выполнение численных алгоритмов, использование моделей машинного обучения, имитационного моделирования на основе высокопроизводительного оборудования. Важную роль в организации вычислений играют программные платформы (Theano, TensorFlow, Keras, PyTorch и др.), функционирующие на основе языков программирования (Python, MATLAB, C++, Java и др.).

Программные сервисы ИПД, используемые при поддержке принятия управленческих решений, функционируют на основе массивов пространственных данных, взаимодействие с которыми осуществляется посредством использования пространственных систем управления базами данных (СУБД) и прикладных программных интерфейсов для обеспечения межкомпонентного взаимодействия. Инфраструктура системы хранения пространственных данных может быть размещена

в пределах одного центра хранения данных либо децентрализована в масштабах частного или публичного облака [199].

Системы управления пространственными данными должны обеспечивать выполнение операций индексации, поиска, группировки, аналитики на основе пространственных типов данных, описывающих геометрию объекта [144]. Поддержка пространственных вычислений в настоящее время на различных уровнях реализована в таких СУБД, как Oracle, PostgreSQL, Microsoft SQL Server, MySQL, MongoDB. Одновременно с этим при решении задач мониторинга и управления территориально распределенными природными и социальными системами становятся востребованы СУБД, не ориентированные на обработку пространственных операций, но предоставляющие определенные преимущества, основанные на особенностях их архитектурной организации. Так, резидентные системы управления базами данных подходят для организации буфера обмена данными между ИПД и устройствами Интернета вещей, а колоночно-ориентированные хранилища делают возможной организацию аналитической обработки данных в режиме реального времени. Архитектура модулей управления пространственными данными должна проектироваться в соответствии с международными геопропространственными стандартами.

Ключевые системные компоненты ИПД, такие как геопорталы, центры хранения пространственных данных, подсистемы обработки и анализа данных, могут быть связаны в систему за счет организации веб-ориентированных интерфейсных модулей и алгоритмов оркестрации процессов управления данными. Интерфейсы, обеспечивающие взаимодействие между компонентами ИПД, могут быть организованы на основе архитектурного паттерна REST и сопровождаются документацией, определяющей набор методов для их использования и ограничений.

Геопортальные системы представляют собой компоненты ИПД, выполняющие функцию визуализации и распространения пространственных данных посредством использования веб-технологий. Информационные системы данного класса реализуют функцию интерактивного инструмента поддержки принятия решений в рамках процесса управления организационными территориально

распределенными системами, позволяя осуществлять мониторинг и дистанционное управление состоянием территориально распределенных объектов на основе пространственных данных. Геопорталы находят применение в научных и коммерческих организационных системах, федеральных и региональных органах власти. Научный интерес к решению задачи построения эффективных геопорталов растет с начала XXI века, о чем, в частности, позволяет утверждать тенденция изменения числа научных публикаций по данным поисковой системы Google Scholar (рисунок 1.3).

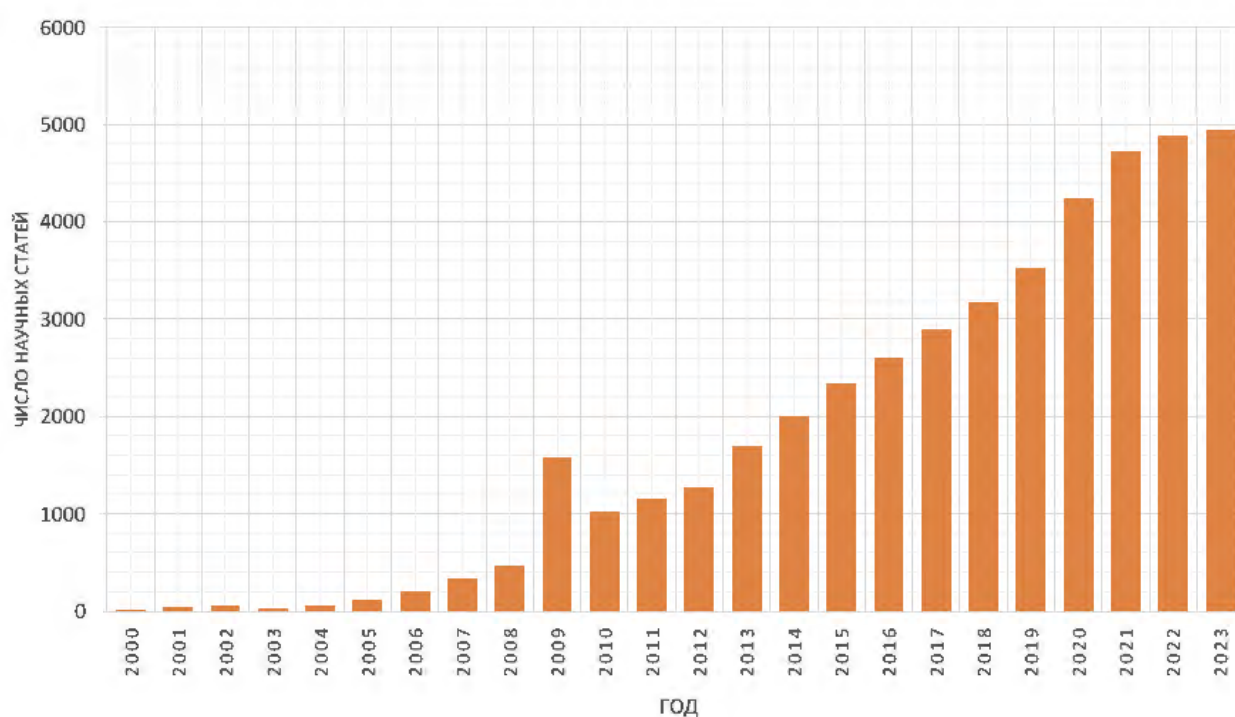


Рисунок 1.3 – Количество научных статей в Google Scholar, связанных с тематикой разработки, внедрения и использования геопорталов

Существующие геопорталы представляют собой проектно-ориентированные информационные системы, функциональные и качественные характеристики которых в серьезной мере определяются географической характеристикой и особенностями хозяйства, характерными для управляемых территориально распределенных систем [203].

Направления развития ИПД и геопортальных систем, координация процессов сбора, распространения и использования пространственных данных в разных

странах и регионах конкретизируются и уточняются за счет введения государственных стандартов [29], распоряжений [160], директив [156]. Обозначенные документы определяют реестры ресурсов, технологий, политик и стандартов, необходимые для повышения эффективности использования геопространственных данных при управлении организационными системами различного масштаба: локальными, региональными, федеральными.

В настоящее время геопорталы формируют безальтернативную основу для работы органов муниципального, регионального, федерального управления, обеспечивая функционирование стратегических отраслей экономики и межведомственное взаимодействие для гармонизации процессов проектного использования природных и социальных систем. В Российской Федерации для оптимизации процессов управления территориально распределенными организационными системами внедрены и успешно используются Федеральная государственная информационная система территориального планирования (<https://fgistp.economy.gov.ru/>), Публичная кадастровая карта Российской Федерации (<https://rreestrmap.ru/>), Геопортал открытых данных МЧС России (<https://emercom.gisserver.ru/>), Геопортал Роскосмоса (<https://gptl.ru/>). Национальные геопорталы имеют большинство стран мира, а в странах со значительной площадью, федеративным устройством и разнообразным хозяйством успешно внедряются региональные и отраслевые (в том числе научные) геопорталы. Примеры геопорталов с определением движущей силы их развития представлены в таблице 1.1.

В Российской Федерации практика внедрения ИПД и геопорталов для решения задачи управления территориально распределенными системами находится в состоянии развития и регулируется в том числе распоряжением (№ 1157-р от 21 августа 2006 г. «О Концепции создания и развития инфраструктуры пространственных данных РФ») и Постановлениями (№ 2148 от 1 декабря 2021 г. об утверждении Государственной программы Российской Федерации «Национальная система пространственных данных») правительства. Результаты использования пространственных данных применимы в решении задач управления организационными

территориально распределенными системами, распределенными на значительной территории.

Геопорталы также находят применение в управлении системами землепользования и кадастров, поддержке принятия управленческих решений в организационных системах сельского хозяйства и топливно-энергетического комплекса для обеспечения рационального использования ресурсов, мониторинге чрезвычайных ситуаций и стихийных процессов техногенных систем, управлении трафиком и социальными потоками, распространении научно обоснованной информации об историческом, природном и культурном наследии.

Таблица 1.1 – Геопорталы и движущие силы их развития

Наименование	Движущая сила	Координатор	Адрес
Федеральная государственная информационная система территориального планирования	Государственные органы	Министерство экономического развития Российской Федерации	https://fgistp.economy.gov.ru
Геопортал публичной кадастровой карты Росреестра	Государственные органы	Федеральная служба государственной регистрации, кадастра и картографии	https://rreestrmap.ru
Геопортал открытых данных МЧС России	Государственные органы	Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий	https://emercom.gisserver.ru
Геопортал Роскосмоса	Научные и коммерческие организации	Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»	https://gptl.ru/
European geoportal – INSPIRE	Государственные органы	Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии	http://inspire-geoportal.ec.europa.eu
Copernicus Open Access Hub	Научные и коммерческие организации	Агентство по безопасности полетов Европейского союза	https://scihub.copernicus.eu
USGS	Государственные органы	Геологическая служба США	https://usgs.gov

В общем случае геопортальные системы – это внешний компонент ИПД, функционирующий на основе веб-технологий и выполняющий роль точки доступа к пространственным данным для обеспечения поддержки принятия управленческих решений посредством мониторинга и дистанционного управления природными, социальными и производственными системами. Использование пространственных данных обеспечивает поддержку принятия решений в области формирования благоприятного инвестиционного климата [11, 74, 84], создания системы предприятий в сферах сельского и лесного хозяйства [5, 87], промышленности [7, 13], рекреации и туризма [52, 149], мониторинга стихийных экологических процессов и ликвидации их последствий [33, 44, 131].

Таким образом, к современным направлениям повышения эффективности внедрения ИПД следует отнести обоснование основ управления территориально распределенными организационными системами на основе анализа пространственных данных о природных и социальных подсистемах; формирование мультимодельных систем хранения пространственных данных, обеспечивающих практико-ориентированное использование знаний о территориально распределенных организационных системах в процессе управления; создание и использование новых методов, алгоритмов и комплексов программ для решения задачи интеллектуальной поддержки принятия решений в рамках процесса управления природными и социальными подсистемами на основе комплексной интерпретации пространственных данных, консолидируемых в репозиториях алгоритмов и моделей анализа пространственных данных; внедрение геопортальных технологий проектно-ориентированной визуализации и распространения пространственных данных для решения задач мониторинга и дистанционного управления территориально распределенными системами.

1.2 Концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД основанная на процессах идентификации, анализа и мониторинга рисков

Проблема устойчивого развития территорий занимает ведущее место в системе прикладных исследований в области решения задач управления крупномасштабными организационными системами, функционирующими на значительных территориях. В качестве основных объектов управления в территориально распределенных системах выступают природные и социальные подсистемы различного иерархического уровня, компоненты которых взаимодействуют между собой [51, 106]. В рамках процесса управления важно изначальное целеполагание на получение конкретного конечного целевого результата функционирования территориальных систем. Достижение этого возможно посредством анализа комплекса проблем и рисков, характерных для управляемой территории и отрасли, на ранних стадиях внедрения ИПД.

Сложная пространственная структура объекта территориального управления, территориально распределенных организационных систем накладывает отпечаток на соответствующую структуру субъекта управления – механизм территориального управления, эффективность функционирования которого существенно повышает использование ИПД. Проявляется это соответствие структур прежде всего в составе систем управления коллективного и индивидуального пользования, а также в информационных массивах практического значения и назначения (кадастров). В последнем случае ориентировка в сложных по пространственной и функциональной структуре массивах пространственных данных осуществляется с помощью специальных справочных систем – словарей геоинформационных метаданных.

Автоматизированные системы управления территорией представляют собой сложное сочетание систем управления ее структурными подразделениями, включая как территориально-административные, так и территориально-отраслевые составные части. Состав и структура управляемых организационных территориально

распределенных систем определяется особенностями и задачами субъекта территориального управления.

Автоматизированные системы управления (АСУ) коллективного пользования группируются в два блока: первый образуют геопорталы комплексного административно-территориального управления, второй – отраслевого управления. Первую группу АСУ составляют геопорталы субъектов Российской Федерации, а при активизации управленческой деятельности – и федеральных округов (при увеличении объема властных полномочий этих округов, точнее, при превращении их в реальные административные структуры). Вторая группа в структурном отношении дублирует состав исполнительной власти страны, а именно образует совокупность ИПД и геопорталов различных ведомств: научно-инновационных, информационных, социально-экономических. ИПД как инструмент поддержки принятия решений опираются на процессы интеграции, обработки, анализа, хранения, распространения и визуализации пространственных данных для обеспечения возможности оперативного решения различных проектных задач в масштабах административно-территориальных единиц или природных регионов.

Можно выделить три ключевых принципа анализа организационных территориально распределенных систем при решении задачи управления:

1) *территориальности* – комплексное исследование особенностей хозяйственного освоения и природно-ресурсного потенциала территории, структуры и состояния земель;

2) *системности* – анализ процессов и структурных особенностей функционирования природных и социальных систем посредством анализа взаимосвязи компонентов на различных иерархических уровнях;

3) *экологичности* – оптимизация взаимодействия природных и социальных систем на основе принципов обеспечения экологического равновесия.

Управление территориально распределенными организационными системами должно опираться на строго определенное видение цели и промежуточных ориентиров функционирования природных и социальных систем. Данный процесс

объективно основан на перманентном анализе комплекса проблем и возможностей для управляемой территории.

При определении стратегии управления развитием территориальных систем ориентиром являются тенденции развития цивилизованного мира. Мировая стратегия развития общества (т. е. определение ведущих направлений развития общества с учетом стратегических задач развития мировой цивилизации) имеет как активное, так и пассивное начало. С одной стороны, она сознательно определяется конкретными субъектами (странами, корпорациями, отдельными учеными), а с другой – формируется объективно под воздействием макроэкономических и геополитических обстоятельств.

Конечная цель управления организационными территориально распределенными системами сводится к последовательному достижению следующих результатов.

1. Обеспечение условий безопасности жизнедеятельности и развития общества на основе достижения экологических, социальных, экономических критериев жизнеобеспечения.

2. Устойчивое развитие природных и социальных систем, обеспеченное стабильностью функционирования территориально распределенных организационных систем как основы устойчивого развития общества.

3. Обеспечение высоких показателей эффективности функционирования территориальных организационных систем и качества жизни общества, основанных на устойчивом функционировании и развитии природных и социальных компонентов.

Процесс управления территориально распределенными системами должен опираться на информационное, научно-методическое, нормативно-правовое и практико-ориентированное обеспечение, применяемое как для исследования решаемых проблем, так и для осуществления управляющих воздействий по развитию организационных территориально распределенных систем.

Таким образом, можно утверждать, что для повышения эффективности процессов управления территориально распределенными организационными

системами целесообразно использовать ИПД, процессы проектирования, разработки, внедрения и использования которых основаны на итерационном прохождении этапов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками. Базовую информационную основу для обеспечения процесса принятия решений при управлении территориально распределенными организационными системами формируют генеральные планы городов, схемы районной планировки и иные документы регионального развития [89].

В связи с этим целесообразно выделить классы территориальных систем безопасности, для которых должен быть обеспечен процесс управления.

1. Территориальные системы безопасности от угроз естественного характера, имеющих ярко выраженное природное происхождение (стихийные катаклизмы и опасности природно-антропогенного характера, вызванные естественными процессами) и характеризующихся индивидуальными особенностями, свойственными для каждой отдельной местности. Важной задачей внедрения ИПД является поддержка принятия взвешенных решений по управлению региональными экологическими проблемами и ситуациями, в том числе в области природопользования, мониторинга и ликвидации последствий стихийных бедствий и охраны окружающей природной среды.

2. Территориальные системы безопасности от угроз техногенного характера, связанных с нарушениями правил эксплуатации технических и инженерных систем во всех сферах производственной деятельности (промышленности, системах логистики, строительстве, сельском хозяйстве, энергетических комплексах). Ключевой задачей внедрения ИПД в данном контексте является повышение эффективности управляющих воздействий, направленных на устранение техногенных рисков, связанных, в первую очередь, с мониторингом антропогенных нагрузок на природную среду, стабилизацией негативных динамик пространственных процессов и выработкой рекомендаций по достижению нормативного уровня качества среды.

3. Территориальные системы безопасности от угроз гуманитарного характера, основанных на необходимости обеспечения доступности ресурсов

социальной инфраструктуры (систем образования, здравоохранения, рекреации, транспорта) для решения проблем социальной изоляции, особенностях возникновения миграционных и транспортных потоков в зависимости от различных пространственно-временных предпосылок, проявлениях территориально обусловленных факторов социальных рисков: конфликтов, преступности, безработицы. При внедрении ИПД территориально-институциональные ценности выявляются субъектом управления на основе особенностей местного социума, стратегии устойчивого развития общества, знаний о текущих процессах, требующих управления с целью диагностики социальных систем, оценки перспектив развития территории и построения дерева целей.

Исходя из представленной классификации, управляемые организационные территориально распределенные системы разного иерархического уровня должны функционировать как системы обеспечения безопасности, стабильности и качества жизни населения. В связи с этим можно сформулировать утверждение о том, что задача управления в территориально распределенных организационных системах, включающих природные и социальные компоненты, должна решаться посредством внедрения и использования ИПД, разработка которых производится на основе процессов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками. ИПД при этом выступают эффективным инструментом каталогизации, распространения и визуализации пространственных данных для обеспечения поддержки принятия управленческих решений в области оптимизации функционирования организационных территориально распределенных систем. Системы данного класса функционируют как инструмент поддержки принятия решений в области управления территориальными системами безопасности от угроз естественного, техногенного и гуманитарного характера и позволяют решить задачу формирования комплекса кратко-, средне- и долгосрочных мероприятий по решению приоритетных проблем региона.

Особенности процессов анализа и управления рисками в организационных системах в России определены ГОСТ Р 51901–2002 (Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем) и ГОСТ Р ИСО 31000–2019 (Менеджмент риска.

Принципы и руководство), в которых определена роль управления рисками как итеративного процесса, позволяющего организациям определять стратегии, достигать целей и принимать обоснованные решения [30].

Формирование риск-ориентированного подхода к управлению территориально распределенными системами должно опираться на определенную последовательность этапов.

1. Систематизация компонентов природных и социальных систем для определения структуры и особенностей объекта управления в территориально распределенных организационных системах.

2. Интеграция процесса управления рисками в процессы итерационного проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД с целью формирования эффективных инфраструктурных решений для управления природными и социальными системами на основе идентификации угроз и возможностей естественного, техногенного и гуманитарного характера.

3. Разработка и внедрение геопортальных систем как точек доступа к распределенным базам геопространственных данных, выступающих инструментом поддержки принятия решений в области риск-ориентированного управления территориально распределенными организационными системами.

Эффективность управления территориально распределенными организационными системами посредством внедрения инфраструктур пространственных данных на основе процессов управления рисками может быть увеличена за счет последовательного решения следующих задач:

- 1) системная идентификация рисков управления территориально распределенными организационными системами, предполагающая необходимость формирования структурированного реестра рисков, основанного на классификации, качественной и количественной оценки угроз и возможностей;

- 2) разработка стратегии управления рисками, возникающими в процессе достижения предпочтительных условий функционирования организационных территориально распределенных систем, для формирования оптимальной совокупности

контрмер как по снижению как вероятности возникновения рисков событий, так и по уменьшению степени их влияния;

3) развитие функциональных и качественных характеристик ИПД как инструмента управления территориально распределенными организационными системами на основе определения и анализа причинно-следственных связей возникновения рисков событий.

В свою очередь инфраструктуры пространственных данных, функционирующие на основе анализа пространственных данных посредством геоинформационных технологий и итерационно внедряемые в территориально распределенные организационные системы на основе риск-ориентированного подхода, сами становятся инструментом планирования, идентификации, количественного и качественного анализа, оценки, мониторинга и управления рисками, возникающими в организационных территориально распределенных системах (рисунок 1.4).

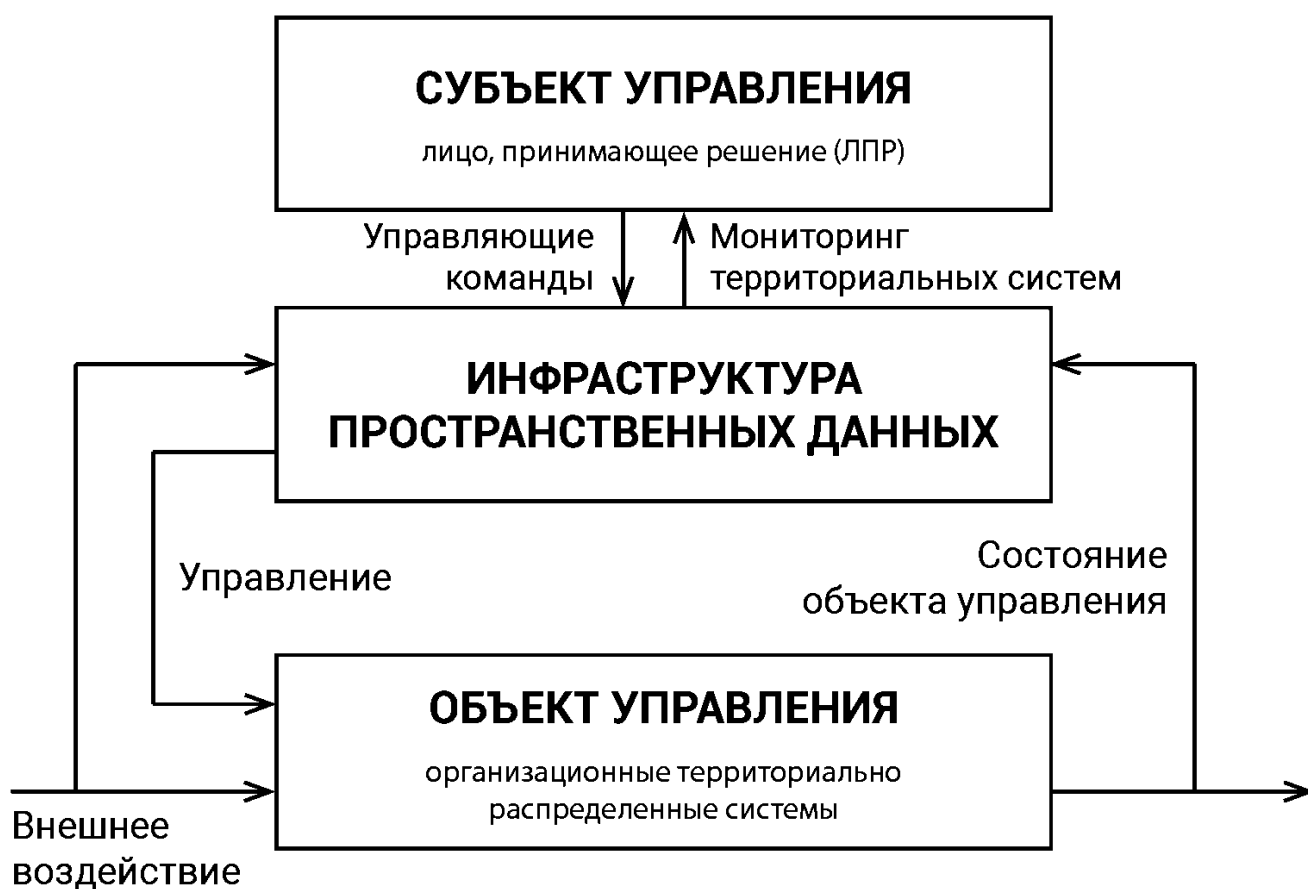


Рисунок 1.4 – Организационные территориально распределенные системы как объект управления

Задача субъекта управления (лица, принимающего решение (ЛПР) или управляющего органа) территориально распределенными организационными системами заключается в осуществлении управляющих воздействий на основе результатов мониторинга и анализа организационных территориально распределенных систем посредством ИПД с целью обеспечения оптимального состояния объекта управления, которое зависит как от внешних факторов, так и от воздействий со стороны субъекта управления, двустороннее взаимодействие с которым формирует классическую субъект-объектную структуру [58].

Субъект управления опирается на решение двух задач: мониторинг состояния организационных территориально распределенных систем на основе консолидируемых массивов пространственных данных и отправка дистанционных управляющих команд с целью изменения состояния территориальных объектов.

Инфраструктуры пространственных данных в данном контексте – это инструмент поддержки принятия решений в области управления территориально распределенными системами. Системы данного класса функционируют на основе аппаратных, программных, организационных и информационных компонентов и реализуют решение задач обмена, преобразования и управления пространственными данными о природных и социальных системах [253, 251]. Природные и социальные системы представляют собой иерархически упорядоченную совокупность природных и социальных компонентов различного иерархического уровня, функционирующих как единое целое вследствие наличия объективных связей различной природы.

Процессы дистанционного управления и мониторинга состояния территориально распределенных организационных систем могут быть автоматизированы с применением технологий Интернета вещей (Internet of Things, IoT), направленных на формирование телекоммуникационной сети из радиоэлектронных устройств, взаимодействующих между собой и с окружающей средой. Инфраструктуры пространственных данных представляют собой практико-ориентированные технологии управления организационными территориально распределенными системами, основанные на использовании пространственных данных и программно-

аппаратных средств их ETL-преобразования (от англ. Extract – извлечение, Transform – преобразование, Load – загрузка).

Поскольку спектр задач, решаемых в процессе управления различными территориально распределенными организационными системами достаточно широк, целесообразно сформировать общий набор функциональных и качественных требований для систем данного класса. Это в свою очередь формирует основу для разработки платформенного решения в области управления крупномасштабными организационными системами на основе пространственных данных, позволяющего решить задачу эффективного внедрения конкретных реализаций ИПД различного назначения и масштаба.

Концепция, основанная на риск-ориентированном итерационном внедрении ИПД, позволяет получить инструмент управления территориально распределенными организационными системами, обеспечивающий получение экономической эффективности вследствие снижения влияния негативных природных, техногенных и гуманитарных процессов и обеспечения возможности использования позитивных возможностей. Концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД представляет способ организации и понимания процесса поддержки принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах на основе пространственных данных.

Процесс управления рисками [147, 75] может быть интегрирован в процесс итерационного внедрения и использования ИПД в качестве входного этапа для стадии анализа требований (рисунок 1.5) [221].

Этап планирования управления рисками (РП) включает подготовку исходных данных для управления рисками на основе исследования структуры и свойств управляемой организационной территориально распределенной системы.

В ходе оценки рисков (этап РО) происходят их идентификация (этап РО1, включающий отбор и классификацию угроз, имеющих значение в рамках проекта, и анализ причинно-следственных связей их возникновения), анализ (этап РО2, опирающийся на количественную и качественную оценку вероятности возникновения негативных и позитивных влияний последствий рисков событий), оценка

опасности и проектирование контрмер (этап РОЗ, направленный на упорядочение рисков по важности, планирование ресурсов реализации управляющих воздействий для сокращения влияния рисков).

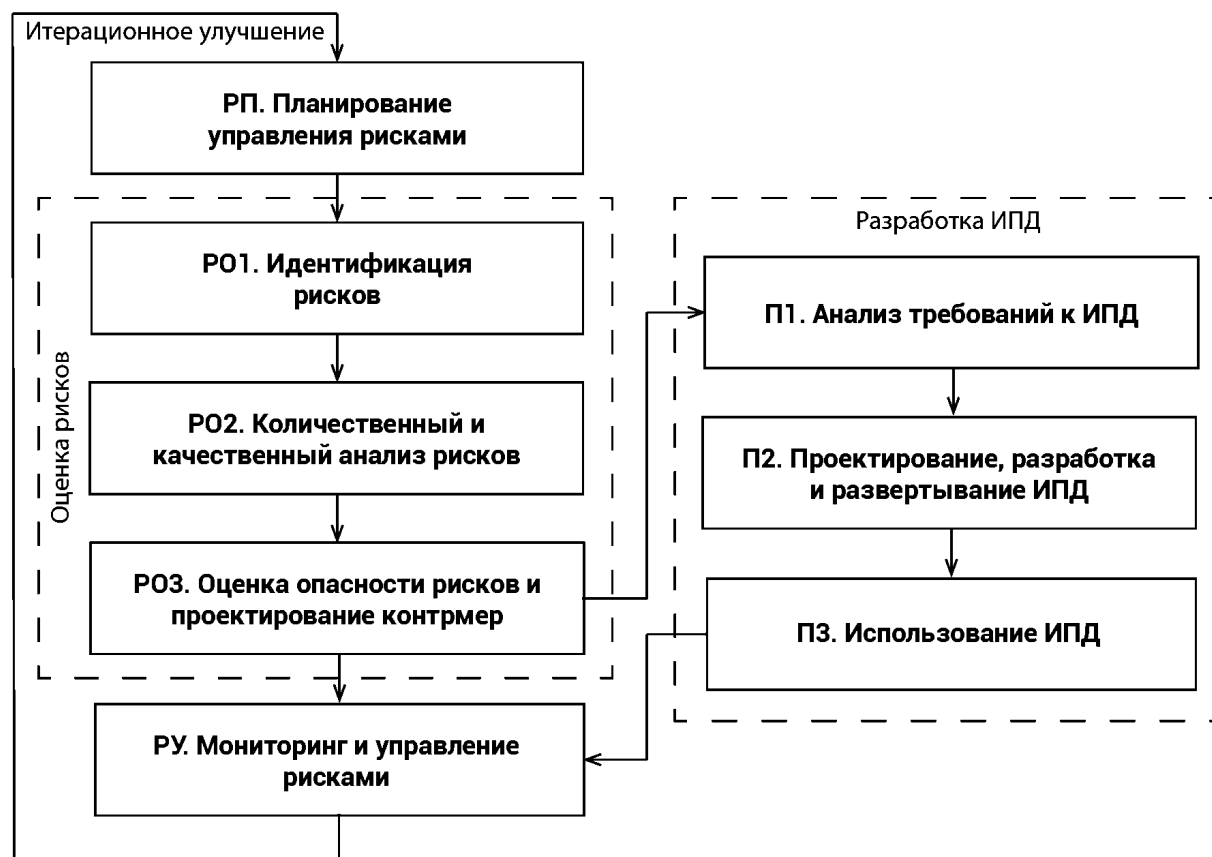


Рисунок 1.5 – Интеграция процесса управления рисками
в процесс внедрения ИПД

Результаты этапа оценки рисков функционирования территориально распределенных природных и социальных систем становятся отправной точкой для распределения и фиксирования ответственности специалистов, участвующих в управлении организационными системами и позволяя сформировать базу для реализации контрмер, направленных на минимизацию последствий и сокращение вероятности возникновения угроз, а также на повышение положительного эффекта и частоты возникающих позитивных возможностей [102]. Совокупность управляемых рисков определяет критерии эффективности ИПД в обеспечении процесса управления организационными территориально распределенными системами.

Причинно-следственные связи возникновения рисков событий характеризуются вероятностью появления одного риска как последствия другого на определенном этапе функционирования территориально распределенной системы и формируют систему причинно-следственных связей возникновения рисков событий, которая может быть определена в виде дерева (рисунок 1.6). На этапе идентификации риски могут быть распределены по этапам возникновения во времени, а также классифицированы на основе онтологических моделей.

На рисунке 1.6 сплошной линией показаны рисковые события, имеющие потомков, оказывающие влияние на критерии эффективности ИПД в решении задач управления территориально распределенными организационными системами и являющиеся причиной возникновения новых рисков, а прерывистой – терминальные элементы, для которых не определено появление дочерних рисков событий.

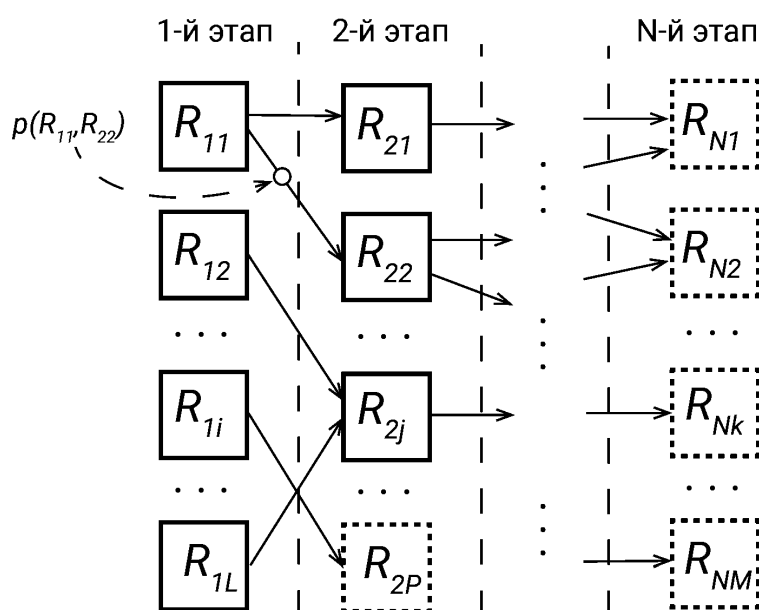


Рисунок 1.6 – Дерево причинно-следственных связей между рисками

Каждая дуга дерева причинно-следственных связей характеризуется весом $p(R_i, R_j)$, характеризующим вероятность появления риска R_j как последствия R_i . Управляя риском R_i , минимизируя негативные последствия его возникновения в территориально распределенных системах, можно избежать или снизить вероятность появления риска R_j .

Дадим определение силы P_{R_i} i -го риска в виде формулы:

$$P_{R_i} = M_{R_i} + \sum_{j=1}^n p(R_i, R_j) P_{R_j}, \quad (1.1)$$

где M_{R_i} – мера влияния i -го риска на критерии эффективности управления территориально распределенными организационными системами;

$p(R_i, R_j)$ – оценка вероятности появления j -го риска как последствия i -го риска;

P_{R_j} – сила j -го риска, представляющего собой следствие i -го риска.

При условии оценки силы терминальных рисков представленная формула сведется к равенству силы риска и меры его непосредственного влияния. Сила корневого риска может быть рассчитана рекурсивно, начиная с терминальных элементов. Оценка силы рисковых событий позволяет сформировать квазиоптимальную совокупность контролируемых рисков управления территориально распределенными системами.

Нулевой уровень дерева причинно-следственных связей между рисками характеризует обобщенный критерий эффективности и основную цель внедрения ИПД. Первый определяет способ системной группировки управляемых рисков на основе особенностей решаемой проектной задачи. Так, возможна классификация рисков по направлению функционирования территориальных систем безопасности. Вершины дерева последующих уровней определяют детализированную систему показателей эффективности управления территориально распределенными организационными системами.

Построение квазиоптимальной совокупности контролируемых рисков управления необходимо начинать с определения меры влияния дочерних показателей эффективности на обобщенный родительский критерий с последовательным выделением значимой совокупности. Следующим шагом становится формирование системы экспертных оценок степени и характера влияния последствий

возникновения потенциальных рисков на показатели эффективности процесса информационного управления территориально распределенными организационными системами.

Мера влияния возникновения i -го риска M_{R_i} на k -й критерий эффективности управления территориально распределенными организационными системами может быть определена следующим образом:

$$M_{R_i,k} = p_{R_i} S_{R_i,k}, \quad (1.2)$$

где p_{R_i} – оценка вероятности появления i -го риска в рамках управляемой территориально распределенной системы;

$S_{R_i,k}$ – оценка степени влияния последствий появления i -го риска с точки зрения k -го критерия эффективности.

Оценка $S_{R_i,k}$ степени влияния последствий появления i -го риска с точки зрения k -го критерия эффективности представляет собой величину, которая может иметь различную размерность, определяемую физической сущностью критерия эффективности управления, а также нормативными требованиями. В том числе она может быть безразмерной величиной. Оценка вероятности появления i -го риска p_{R_i} может измеряться в интервале от 0 до 1. Также в ряде случаев имеет смысл привести оценку к иной шкале.

Оценка эффективности внедрения ИПД с точки зрения критерия эффективности k может быть определена через потенциал снижения меры M_{R_i} влияния i -го риска на критерии эффективности управления, формируемый через возможность уменьшения потенциальной вероятности p_{R_i} появления i -го риска в рамках управляемой территориально распределенной системы и понижения степени влияния $S_{R_i,k}$ последствий появления i -го риска посредством процессов информационного управления территориально распределенной системой.

Целесообразность внедрения и итерационного развития ИПД может быть определена через оценку рентабельности внедрения процесса снижения рисков управления территориально распределенными системами посредством ИПД за определенный период времени:

$$\rho = \frac{(\mathcal{R} - C)}{C}, \quad (1.3)$$

где ρ – рентабельность внедрения процессов управления рисками;

$\mathcal{R}$ – потенциальный выигрыш за счет управления рисками посредством ИПД;

C – расходы на внедрение и сопровождение ИПД.

Значение рентабельности ρ не нормировано в определенном интервале и может быть положительным ($\mathcal{R} > C$), отрицательным ($\mathcal{R} < C$) и нулевым ($\mathcal{R} = C$).

Величины потенциального выигрыша $\mathcal{R}$ и расходов C должны быть сведены к одной размерности. Потенциальный выигрыш за счет управления рисками посредством ИПД формируется такими компонентами как снижение ущерба от негативных рисков (угроз) $\mathcal{D}$ и увеличение дохода от использования позитивных возможностей E .

$$\mathcal{R} = \mathcal{D} + E = \sum_{i=1}^M \delta_i + \sum_{j=1}^N \varepsilon_j, \quad (1.4)$$

где $\mathcal{D}$ – снижение ущерба от негативных рисков (угроз),

E – увеличение дохода от использования позитивных возможностей;

δ_i – снижение ущерба вследствие управления i -й угрозой;

ε_j – увеличение дохода вследствие управления j -й возможностью;

M – число контролируемых угроз;

N – число управляемых возможностей.

Величина снижения ущерба δ_i вследствие управления i -й угрозой может быть определено по формуле.

$$\begin{aligned} \delta_i &= m_i \bar{\mathcal{R}}_i \Delta p_i, \\ \varepsilon_j &= n_j \bar{\mathcal{R}}_j \Delta p_j, \end{aligned} \quad (1.5)$$

где m_i – потенциальное число возникновения i -х угроз за период;

n_j – потенциальное число возникновения j -х возможностей за период;

$\bar{\mathcal{R}}_i$ – средние ожидаемые потери от возникновения i -й угрозы;

$\bar{\mathcal{R}}_j$ – средний ожидаемый доход от использования j -й возможности;

Δp_i – сокращение вероятности возникновения i -й угрозы при внедрении, развитии и использовании ИПД;

Δp_j – увеличение вероятности использования j -й возможности при внедрении, развитии и использовании ИПД.

Оценка расходов C на внедрение и сопровождение ИПД для управления рисками, возникающими в территориально распределенных организационных системах, должна опираться на учет ограничений: ресурсоемкости и сложности процессов проектирования, разработки, внедрения и поддержки ИПД (или ее новой версии) как инструмента управления рисками (минимизацией негативных последствий и повышением эффективности использования возможностей). В том случае, если оценка потенциальных затрат на внедрение новых инструментов управления пространственными данными и системами представляет собой меньшую величину, чем затраты на управление рисками без внедрения нового решения, инициирование нового этапа внедрения геоинформационных технологий становится экономически обоснованным. Иными словами, целесообразно ориентироваться на получение положительных значений рентабельности ρ внедрения процессов управления рисками на основе использования, поддержки и развития проблемно-ориентированных ИПД.

Важной особенностью подхода по управлению территориально распределенными организационными системами является минимизация рисков внедрения ИПД посредством ориентации на гибкую организацию процесса разработки информационных систем [135], а также сведения цепочки процессов проектирования, разработки и развертывания системы к серии коротких итераций, артефактом каждой из которых становится пусть ограниченное с точки зрения функционала и качества, но тем не менее завершенное программно-аппаратное решение. С каждой новой итерацией при этом реализуется возможность развития функциональных возможностей ИПД, усиление ее качественных характеристик. Анализ опыта разработки ИПД показывает целесообразность ориентации на принципы объектно-ориентированного анализа, проектирования и программирования [139] как набора инженерных подходов, предписывающих развитие разрабатываемого программно-

аппаратного решения как системы взаимодействующих объектов, инкапсулирующих в себе данные и методы и взаимодействующих на основе интерфейсов. Решение проблемы эффективного итерационного функционального и качественного усиления ИПД возможно на основе соблюдения принципов SOLID [172], определяющих целесообразность реализации основных принципов объектно-ориентированного программирования и проектирования. Так, при соблюдении принципа единственной ответственности сервисы ИПД должны иметь единственное назначение и использовать только необходимые для решения задачи ресурсы, а реализация инверсии зависимостей позволяет спроектировать платформенное решение для разработки ИПД, в рамках которого подсистемы верхних уровней не зависят от нижних, а зацепление модулей определяется интерфейсами, а не конкретной реализацией. Соблюдение обозначенных принципов приводит к получению таких эффектов, как усиление внутренней связности ключевых сервисов ИПД и ослабление их взаимного зацепления. ИПД, выстроенные на основе сильно-связанных и слабо-зацепленных компонентов, характеризуются модифицируемостью, сопровождаемостью и потенциально высокой отказоустойчивостью.

Результаты этапа оценки рисков становятся отправной точкой в решении задачи проектирования функциональных и качественных требований к ИПД как инструменту управления территориально распределенными организационными системами. Конечными целями проектных работ по развитию ИПД становятся минимизация угроз и максимизация позитивных рисков (благоприятных возможностей) в процессе управления территориально распределенными организационными системами. Оптимизация процессов интеграции и использования пространственных данных для управления территориально распределенными организационными системами должна ориентироваться на достижение целевых эффектов ИПД, ресурсоемкости и сложности (организационной, операционной, алгоритмической, компетентностной, временной) процессов поддержки (построения, модификации, практического использования) при решении задач управления организационными территориально распределенными системами.

Достижимость целевых эффектов (уменьшение влияния негативных рисков и повышение эффективности использования благоприятных возможностей), снижение ресурсоемкости и временной сложности модификации ИПД позволяют обосновать целесообразность внедрения ИПД. Ключевую роль в данном контексте играют задачи повышения оперативности мониторинга состояния организационных систем, усиления качества дистанционного управления территориально распределенными объектами. Проблемно-ориентированные геопортальные системы находят применение в различных отраслях народного хозяйства, способствуя решению задачи управления негативными и позитивными рисками. В шестой главе диссертации дана характеристика проектных решений, разработанных под руководством автора диссертации и направленных на формирование инструментов управления территориально распределенными организационными системами.

Концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД, отличающаяся интеграцией процессов планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками в процесс итерационного развития инфраструктуры обеспечивает решение научной проблемы формирования единого интегрального подхода к поддержке принятия управленческих решений, основанного на комплексном последовательном обеспечении этапов систематизации, анализа и распространения пространственных данных. Решение обозначенной научной проблемы возможно посредством разработки риск-ориентированной концепции внедрения, поддержки и использования ИПД, новых методов и алгоритмов автоматизированного интеллектуального анализа пространственных данных и проблемно-ориентированных геопортальных систем управления организационными территориально распределенными системами, как точек доступа к тематическим массивам пространственной информации.

1.3 Выводы по первой главе

1. Предложена концепция проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД, отличающаяся интеграцией процессов планирования,

идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками в процесс итерационного развития инфраструктуры, позволяющая повысить эффективность решения задач управления в территориально распределенных организационных системах. Новые, итерационно получаемые версии инфраструктуры становятся инструментом мониторинга и управления рисками. Сокращение влияния последствий опасных рисков возможно при реализации процесса мониторинга состояния природных и социальных систем как объекта управления и функций дистанционного управления.

2. Достижимость целевых эффектов внедрения ИПД целесообразно определить через возможность уменьшения влияния негативных рисков и повышения эффективности использования позитивных возможностей природных и социальных систем. Сопоставление достижимости целевых эффектов с ресурсоемкостью поддержки инфраструктуры позволяет обосновать целесообразность ее внедрения для решения задач управления.

3. Особенностью концепции по внедрению и развитию ИПД, основанной на риск-ориентированном подходе к развитию систем управления территориями, является необходимость ориентации на гибкую организацию процесса разработки, итерационное усиление инфраструктуры посредством соблюдения принципов объектно-ориентированного программирования и проектирования.

4. Внедрение проектно-ориентированных геопорталов обеспечивает распространение и визуализацию пространственных данных для выявления закономерностей пространственно-временной организации систем для поддержки принятия управленческих решений. Знания о системных связях в природных и социальных системах формируют основу для точного прогнозирования развития пространственно-временных процессов на основе автоматизированных алгоритмов. Решение задачи интеграции массивов пространственных данных целесообразно осуществлять в мультимодельных системах управления данными.

2 ИНТЕГРАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

2.1 Структурно-компонентная схема инфраструктур пространственных данных

Процессы проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД должны основываться на конкретных целях и задачах управления. Анализ истории развития и современного состояния вопроса проектирования платформенных решений в названной области позволил определить базовые архитектурные компоненты ИПД, обозначенные на структурно-компонентной схеме.

Структура платформенного решения определена гипотезой о том, что для оптимизации процессов хранения и практического использования пространственных данных проектно-ориентированная ИПД должна содержать слабо-зацепленные и сильно-связанные за счет интерфейсов системные компоненты [99]: подсистемы хранения пространственных данных (облачные или локальные хранилища), модули анализа и синтеза, а также визуализации и распространения пространственных данных (в виде геопортальных систем); внешними объектами по отношению к ИПД должны являться ключевые акторы (пользователи геопортальных систем, ученые и специалисты), а также внешние потребители и сторонние провайдеры пространственных данных и информации (рисунок 2.1).

Центры хранения пространственных данных (ЦХПД) должны играть роль системного компонента ИПД, используемого для обеспечения доступа к актуальным пространственно-временным данным при решении проектных задач [16]. Целесообразно выделить следующие компоненты ЦХПД.

1. *Программно-аппаратная инфраструктура центра хранения пространственных данных* – это платформа, состоящая из физических и виртуальных ресурсов, которая поддерживает функционирование систем передачи, хранения, обработки и анализа пространственных данных.

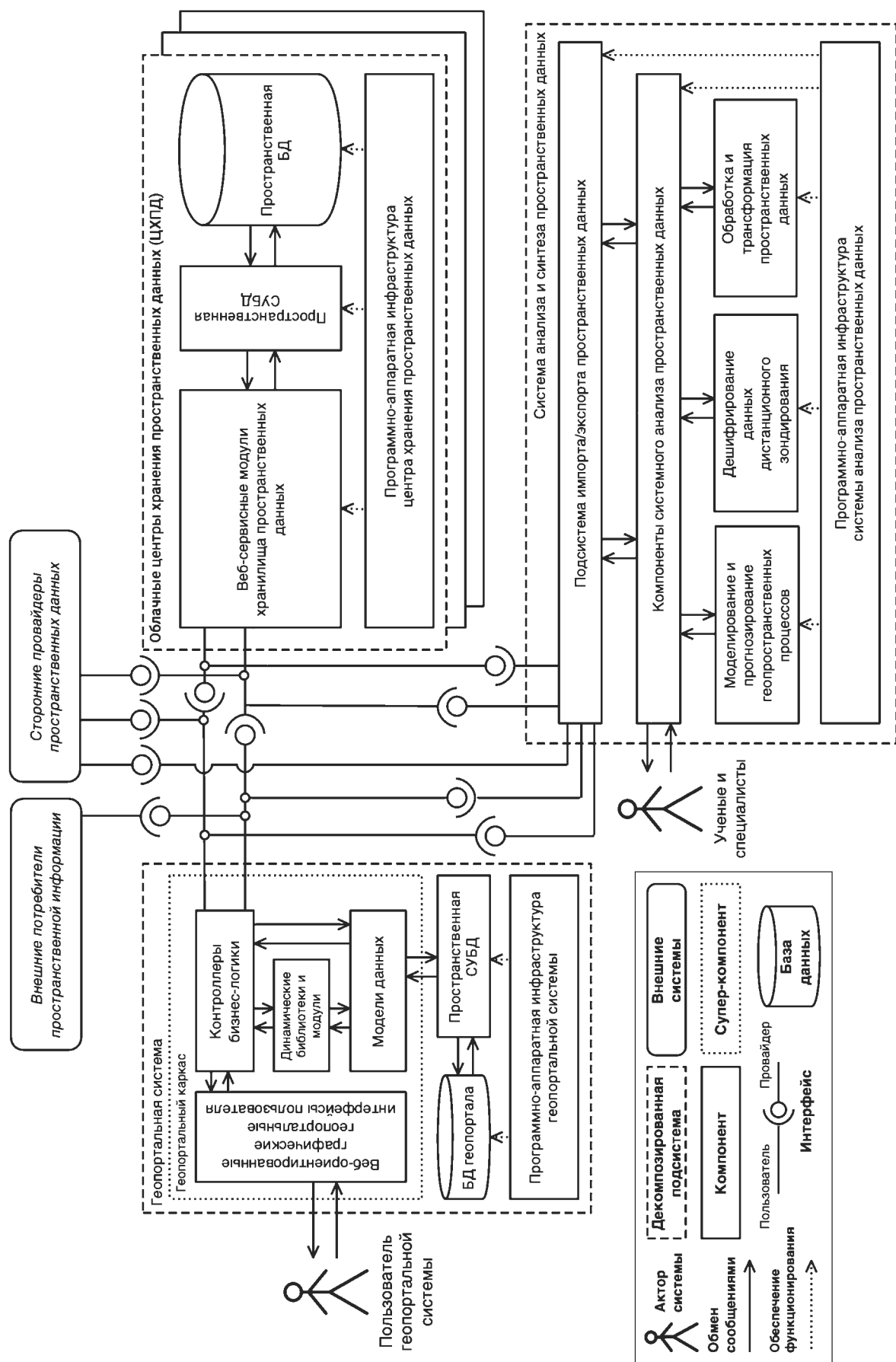


Рисунок 2.1 – Структурно-компонентная схема ИПД

2. *Пространственная СУБД и базы пространственных данных.* Базы пространственных данных должны обеспечивать хранение данных с пространственно-временной привязкой [110]. Архитектура пространственной базы данных должна выстраиваться исходя из поставленных проектных задач, решаемых посредством ИПД [104].

3. *Веб-ориентированные модули хранилища пространственных данных* необходимы для обеспечения связи ЦХПД, геопортальной системы и системы анализа и синтеза пространственных данных. В данном контексте актуально использование сервисно-ориентированной стратегии инкапсуляции моделей для совместного использования и интеграции гетерогенных геопространственных моделей в открытой интернет-среде.

Система анализа и синтеза пространственных данных вводится для выполнения функции анализа и актуализации накопленной информации с целью принятия обоснованных управленческих решений в рамках проектных задач [38]. Данный компонент ИПД функционирует на базе программно-аппаратной инфраструктуры, позволяющей выполнять программные комплексы системного анализа пространственных данных и обмениваться информацией с другими подсистемами ИПД.

1. *Программно-аппаратная инфраструктура системы анализа пространственных данных* должна обеспечивать функционирование систем моделирования, машинного обучения и численных алгоритмов. На практике для эффективной работы инструментов анализа больших объемов данных необходимы высокопроизводительное оборудование и соответствующее методическое, алгоритмическое и программное обеспечение.

2. *Компоненты системного анализа пространственных данных* призваны обеспечить возможность эффективного анализа накопленных пространственных данных и синтеза новых информационных массивов [85]. В области анализа данных ДЗЗ в настоящее время стремительно вовлекаются как классические алгоритмы, так и глубокое машинное обучение [61, 261], которое находит применение в решении проектных задач, требующих обработки и трансформации больших

многомерных массивов многозональных [18] и гиперспектральных [14] пространственных данных [264].

3. *Подсистема импорта/экспорта пространственных данных* необходима для решения двух задач: передачи полученных в ходе исследования массивов информации в ЦХПД и базы данных геопортальных систем и получения исходных для анализа материалов. Важным моментом в эксплуатации данного компонента является следование стандартам представления геопро пространственных данных, описанным ранее.

Геопортальные системы (геопорталы) представляют собой внешнюю часть ИПД, выполняющую роль точки доступа к актуальным пространственным данным, является инструментом принятия решений и реализуются как веб-порталы, ядром которых выступают инструменты поиска и визуализации геопро пространственной информации и предоставления связанных услуг через Интернет [149, 83]. Поставщики геопро пространственных данных используют геопорталы для публикации и распространения геопро пространственного контента, потребители – для получения доступа к информации, востребованной в хозяйстве и социальной сфере.

1. *Программно-аппаратная инфраструктура геопортальной системы* – представляет собой основу, включающую физические и виртуальные ресурсы и поддерживающую функционирование геопортальной системы как веб-приложения, доступного через Интернет (или сеть другого масштаба).

2. *Пространственная СУБД и база данных геопортала* должны обеспечивать хранение данных, определяющих состояние системы и пользовательские настройки. Архитектура пространственной базы данных геопортала должна проектироваться исходя из задач, на решение которых ориентирована система, при этом, в отличие от базы данных ЦХПД, акцент должен быть сделан не на хранении больших объемов пространственных данных, а на записи информационных структур, описывающих взаимодействия пользователей с веб-системой, и обеспечении конфиденциальности данных.

3. *Геопортальный каркас* как шаблон проектирования и реализации системы, определяющий ее архитектуру и структуру, целесообразно разбить на слабо-

зацепленные модули для управления данными, логикой работы и внешним видом: веб-ориентированные графические геопортальные интерфейсы пользователя, контроллеры бизнес-логики, модели данных и сторонние библиотеки.

В [117] приведен список функциональных и качественных требований, выполнение которых целесообразно при проектировании подавляющего числа геопортальных решений. Этот перечень может быть дополнен или декомпозирован при решении конкретных задач.

Внешние компоненты ИПД формируются из сторонних потребителей пространственной информации, провайдеров пространственных данных, а также акторов, непосредственно взаимодействующих с инфраструктурой при выполнении логически связанных ролей (пользователей, ученых и специалистов) с прецедентами системы.

Разграничение на подсистемы визуализации, анализа и консолидации информации позволяет достичь усиления связности модулей и ослабления их зацепления. Таким образом, инфраструктуры пространственных данных объединяют программно-аппаратные информационные узлы, обеспечивающие возможность получения, хранения, визуализации и распространения геопро пространственной информации для реализации информационных потребностей в научных и прикладных проблемных областях. Процессы проектирования, разработки, внедрения и использования ИПД должны быть ориентированы на решение задач проектной экономики.

С позиции теоретико-множественного представления дадим формализованное описание платформенной архитектуры проектно-ориентированных ИПД. Для этого представим объект исследования как систему, состоящую из набора взаимодействующих элементов:

$$S = \langle C, R, Q, X \rangle, \quad (2.1)$$

где S – проектно-ориентированная ИПД как система;

C – набор ключевых компонентов, на которые декомпозируется проектно-ориентированная ИПД, который, исходя из сформулированной гипотезы, может быть представлен как $\langle C_{analysis}, C_{storage}, C_{geoportal} \rangle$, где $C_{analysis}$ – система анализа

пространственных данных, C_{storage} – облачные центры хранения пространственных данных, $C_{\text{geoportal}}$ – геопортальная система;

R – набор отношений между компонентами ИПД, определяемый особенностями технического и нормативного взаимодействия;

Q – набор свойств ключевых компонентов ИПД и отношений $\langle Q_C, Q_R \rangle$, определяющих критерии оптимизации процессов хранения и практического использования пространственных данных;

X – набор воздействий с акторами системы. По мере развития ИПД теоретико-множественная формула может уточняться, отражая взаимодействия между множествами компонентов.

Спроектированная, разработанная и развернутая ИПД становится инструментом осуществления мониторинга и управления рисками организационной деятельности, выстроенной вокруг взаимодействия с территориально распределенными организационными системами. Для оптимизации процессов хранения и практического использования пространственных данных необходимо выработать критерии эффективности проектируемой ИПД [112], определяемые следующим образом:

$$P = \langle E, R, T \rangle, \quad (2.2)$$

где P – показатели эффективности проектно-ориентированной ИПД;

E – набор целевых эффектов системы, определяемый конкретными аспектами применения ИПД;

R – ресурсоемкость ИПД при выполнении операций хранения, анализа, распространения и визуализации пространственных данных;

T – сложность (в том числе временная) процессов построения системы, ее модификации, реорганизации и практического использования.

Критерии эффективности проектно-ориентированной ИПД для подсистем анализа, хранения данных и геопорталов с целью достижения целевых эффектов, снижения ресурсоемкости и временной сложности трансформации системы сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Критерии эффективности проектно-ориентированной ИПД

Показатель эффективности	Подсистемы ИПД		
	Подсистема анализа	ЦХПД	Геопорталы
Достижимость целевых эффектов (E)	Увеличение точности алгоритмов (E_{A1}), эффективность автоматизации (E_{A2}), оптимизация процесса управления (E_{A3})	Комплексность и полнота (E_{S1}), актуальность, достоверность и полезность (E_{S2}), защищенность (E_{S3}) пространственных данных	Функциональная пригодность и проектная ориентация (E_{G1}), удобство использования и сопровождения (E_{G2}), надежность и отказоустойчивость (E_{G3})
Ресурсоемкость (R) ИПД при выполнении операций	Сложность оптимизации алгоритмов (R_{A1}), увеличение мощности аппаратного обеспечения (R_{A2})	Качество индексации (R_{S1}), оптимизация и кеширование (R_{S2}), эффективность поисковых алгоритмов (R_{S3})	Программная оптимизация геопортального каркаса (R_{G1}), увеличение ресурсов выделенного сервера (R_{G2})
Сложность (T) процессов создания, модификации и использования компонента	Модульность и расширяемость системы (T_{A1}), реализация принципов SOLID (T_{A2}), верифицируемость алгоритмов (T_{A3})	Стандартизация и задокументированность (T_{S1}), целостность (T_{S2}), нормализация (T_{S3}) базы данных	Модульность каркаса (T_{G1}), высокая модифицируемость компонентов (T_{G2}), сопровождаемость проекта (T_{G3})

Критерии эффективности информационных процессов в цифровых ИПД.
 Для оптимизации процессов хранения и практического использования пространственных данных проектно-ориентированная ИПД должна содержать связанные за счет интерфейсов системные компоненты анализа, хранения и распространения данных.

Достижимость целевых эффектов (уменьшение влияния рисков), снижение ресурсоемкости и временной сложности модификации ИПД позволяют обосновать целесообразность внедрения ИПД для решения задач управления организационными территориально распределенными системами.

Внедрение эффективных геопортальных технологий и разработка новых архитектурных паттернов визуализации и распространения пространственно-временных данных на основе современных веб-технологий и поведенческой оптимизации позволяют организовать фундаментальную основу для получения и системного анализа экспертной информации при принятии управленческих решений в области оптимизации функционирования организационных территориально

распределенных систем, прогнозирования стихийных процессов, обеспечения основ для устойчивого развития территорий [78, 24].

Теоретико-множественный подход к анализу системных свойств, элементов и их связей проектно-ориентированных ИПД позволяет выделить опорные моменты, которые являются критическими в вопросе оптимизации процессов хранения и практического использования пространственных данных.

1. Повышение точности и быстродействия методического, алгоритмического и программного обеспечения процесса анализа пространственных данных и прогнозирования пространственно-временных процессов.

2. Совершенствование систем хранения больших пространственно-временных данных путем разработки новых физических и логических моделей хранилищ, синтеза реляционного и NoSQL-подходов.

3. Внедрение эффективных геопортальных технологий и разработка новых архитектурных паттернов визуализации и распространения пространственно-временных данных на основе веб-технологий.

4. Разработка системы рекомендаций по проектированию, разработке, внедрению и эффективному использованию проектно-ориентированных цифровых ИПД для принятия управленческих решений в области оптимизации использования природных и социальных систем.

Достижение комплексного решения опорных задач позволит получить систему эффективных методов, алгоритмов и архитектурных паттернов хранения, оперативного анализа и распространения пространственно-временных данных для построения проектно-ориентированных ИПД.

2.2 Системные аспекты анализа геопространственной информации в цифровых инфраструктурах пространственных данных

Стратегическая цель развития ИПД заключается в формировании системного инструмента, позволяющего моделировать структуру и динамику природных, социальных, производственных систем, особенности их взаимодействия, проводить

оценку природных и социальных процессов, прогнозировать развитие природно-техногенных чрезвычайных ситуаций в географической оболочке [47, 105]. В качестве важнейшего объекта исследования в ИПД целесообразно использовать геосистему, определяемую академиком Б. В. Сочавой, как «...особый класс управляющих систем; земное пространство всех размерностей, где отдельные компоненты природы находятся в системной связи друг с другом и как определенная целостность взаимодействуют с космической сферой и человеческим обществом» [72, с. 292]. В расширенной трактовке геосистемы выступают как «тотальные системы» (метагеосистемы), включающие многообразие природных, социальных, экономических процессов, взаимодействующих на локальном, региональном и глобальном уровнях организации географической оболочки.

В глобальном измерении объектом моделирования выступает географическая оболочка – зона контакта и активного взаимодействия литосферы, атмосферы, гидросферы и биосферы. В региональном аспекте объектами анализа в организационных системах выступают геосистемы, которые обособляются в географической оболочке под влиянием неравномерного распределения солнечной энергии, энергии внутриземного происхождения и эффектов саморазвития. Они отличаются относительной однородностью структуры, режима функционирования и динамики. Геосистемы имеют иерархическую пространственно-временную организацию, их систематизация проводится на уровне систем, классов, групп, типов, родов и видов.

Ландшафтная оболочка и иерархия геосистем – это арена развития глобальных, региональных и локальных процессов хозяйственного освоения [80]. В этой связи приведем формулировку К. П. Космачева: «Общество всегда является активной стороной, определяющей тип развития территории... Но результат развития во многом зависит от естественной основы территории, от того, как оно воспринимает влияние общества, насколько оно способно накапливать результаты человеческого труда и сохранять их надолго» [39]. В результате взаимодействия природных и техногенных процессов создается специфическая структура землепользования, сопровождающаяся активацией специфического спектра геоэкологических процессов [28].

Между природными и социальными системами выделяются связи, особенности которых раскрыты Н. А. Солнцевым. В трактовке автора связь-отношение – это форма соответствия явлений, которая может быть представлена в виде функциональной зависимости переменных величин, имеющей либо однозначный характер, либо вероятностный» [71], а связь-взаимодействие – это «процесс взаимного воздействия объектов, протекающий в реальном пространстве и времени и выраженный в определенном ходе событий, которые происходят с веществом и энергией на определенном участке пространства». Наличие связей между природой, населением и хозяйством на определенной территории приводит к изменениям их состояний во времени [200].

Диагностика и оценка связей в сложной иерархии геосистем является важнейшим направлением в разработке и практическом применении новых автоматизированных методов и алгоритмов интерпретации данных ДЗЗ и вспомогательной пространственно-временной информации с использованием машинного обучения в рамках ИПД, постоянной актуализации облачных хранилищ больших массивов пространственно-временных данных, для организации которых актуально использование мультимодельного подхода. Решение задачи эффективного распространения пространственных данных достигается посредством внедрения геопортальных систем, характеризующихся свойством проектной ориентации и являющихся безальтернативной основой работы органов государственного и муниципального управления, обеспечивающих функционирование стратегических отраслей экономики [123, 250].

Разнообразие мира порождает огромное количество информации. Почти невозможно полностью отобразить все, поэтому прибегают к определенному количеству обобщения и абстракции, то есть все богатство и разнообразие окружающего пространства приводят к созданию определенных моделей, то есть к конечному количеству некоторых природных объектов и свойств [207]. В результате экспериментов и первоначального обобщения материалов можно утверждать, что в ИПД для оценки процессов функционирования природных и социальных систем целесообразно выделить уровни интеграции и использования данных (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Интегральный синтез геопространственной информации в цифровой ИПД

1. *Уровень базовых пространственно-временных данных*, включающий базовую картографическую основу и описывающий современную и историческую пространственно-временную структуру географической оболочки, закономерности взаимодействия геосфер.

2. *Уровень пространственных моделей*, предполагающий систематизацию данных по следующим модулям:

1) «природные системы» (описывает структуру, динамику и функционирование географической оболочки и ее структурных частей; энергетические и информационные свойства геосфер);

3) «экономические системы» (характеризует территориальную организацию хозяйственной деятельности общества: природные ресурсы, промышленность, транспорт, сельское хозяйство, третичный сектор, инновации, инвестиционный комплекс);

4) «геоэкологические системы» (представляет пространственно-временные системы, отражающие структуру географической оболочки как среды обитания человека и ее изменение в условиях техногенеза и мероприятия по обеспечению устойчивого развития).

3. *Уровень принятия решений*, предполагающий проектно-ориентированное использование данных для организации процессов географического прогнозирования (в первую очередь пространственно-временной прогноз эколого-социально-экономического развития) и формирования комплексной характеристики стран и регионов (систематизирующей данные о природе, населении, экономике, культуре и социальной организации).

В первом приближении геосистему в структурно-функциональном отношении можно представить в природных и социальных системах. Население и хозяйство – это составные социальных систем, в которые, кроме них, входят и другие компоненты, например непродовольственная сфера в части духовно-интеллектуальной составляющей. Более детально в структурно-функциональном отношении территориальные системы могут быть дифференцированы на пять главных блоков в зависимости от принципиального строения взаимоотношения природы, человека и общества, а именно:

1) блок *природа* как естественная база социально-экономической деятельности общества, в пределах которого выделяются подблоки *природно-ресурсного потенциала*, состоящего из действий по оценке природных условий, и *геоэкологии* в

виде экологического мониторинга;

2) блок *производство* как процесс воспроизводства материальных благ и производственных отношений;

3) блок *непроизводственная сфера деятельности и общественная инфраструктура*, в составе которого выделяются четыре подблока, а именно: *обращение материальных благ*, включающий распределение, обмен и потребление материальных продуктов труда, *бытовые и производственные услуги*, *административно-управленческая деятельность* и *силовая деятельность государства*;

4) блок *воспроизводство населения*, включающий два подблока: *материальная основа воспроизводства населения* (прежде всего как рабочей силы) и *формирование духовно-интеллектуального потенциала человека*, в который входит деятельность по всесторонней подготовке человека как личности;

5) блок *воспроизводство природных условий*, в который включаются три подблока, а именно: *защита природной среды* от загрязнения, засорения и разрушения, *преобразование природных условий* и *восстановление природных объектов*, нарушенных антропогенной деятельностью.

Наиболее распространенная типологическая классификация природных геосистем была предложена В. А. Николаевым [54]:

1) система (разряд) – макроклиматические факторы: радиационный режим, характер атмосферной циркуляции, водный и тепловой баланс, соотношение тепла и влаги;

2) класс (подкласс) – морфотектоника: тектонические формы рельефа, отличающиеся по возрасту и динамике развития, видоизмененные выветриванием, эрозией и процессами аккумуляции; составляющие литогенную основу геосистем, проявления высотной поясности и высотной зональности;

3) группа (подгруппа) – характер водного и геохимического режима, определяющий сочетание двух основных миграционных потоков: радиального, осуществляющего обмен веществом между ярусами геохимического ландшафта, и латерального – склонового и внутрипочвенного потоков в сопряженных системах;

4) тип (подтип) – почвенно-биологические процессы, формирующие и определяющие классы растительных формаций;

5) род (подрод) – морфоскульптурные формы земной поверхности;

6) вид – типы местопроизрастаний и сообщества растений.

Общая схема составления цифровой карты геосистем в региональном геопортале реализуется путем решения следующих задач: 1) сбор и подготовка системы тематических карт и баз данных; 2) систематизация информации с построением иерархии геосистем; 3) машинный анализ многозональных космических снимков с построением синтетической карты геосистем; 4) оценка результатов моделирования; 5) получение и практическое использование пространственной информации (рисунок 2.3). Можно выделить основные иерархические уровни социально-экономической структуризации территории. На самом нижнем локальном уровне располагаются небольшие по размерам занимаемой территории и, как правило, объемам производства производственные предприятия.

Второй уровень занимают такие территориальные комплексы, как небольшие по численности населения промышленные пункты, села, лесхозы, небольшие водные бассейны. Третий уровень занимают административные (сельские) районы, малые и средние по численности населения промышленные центры и узлы. Вторую и третью ступени относят обычно к местному, или муниципальному, уровню территориальной дифференциации.

На четвертой ступени стоят субъекты федерации (и им подобные административные образования), а также производственные комплексы, образованные на основе тех или иных энергопроизводственных цепочек, а также агломерации. Этот уровень часто называют на практике территориальным, провинциальным, областным, мелкострановым.

Две следующие ступени соответствуют уже региональному уровню территориального деления, здесь формируются крупные экономические районы и макро-регионы. В целях конкретизации обозначения этих уровней один из них назовем собственно *региональным*, другой – *макрорегиональным*.

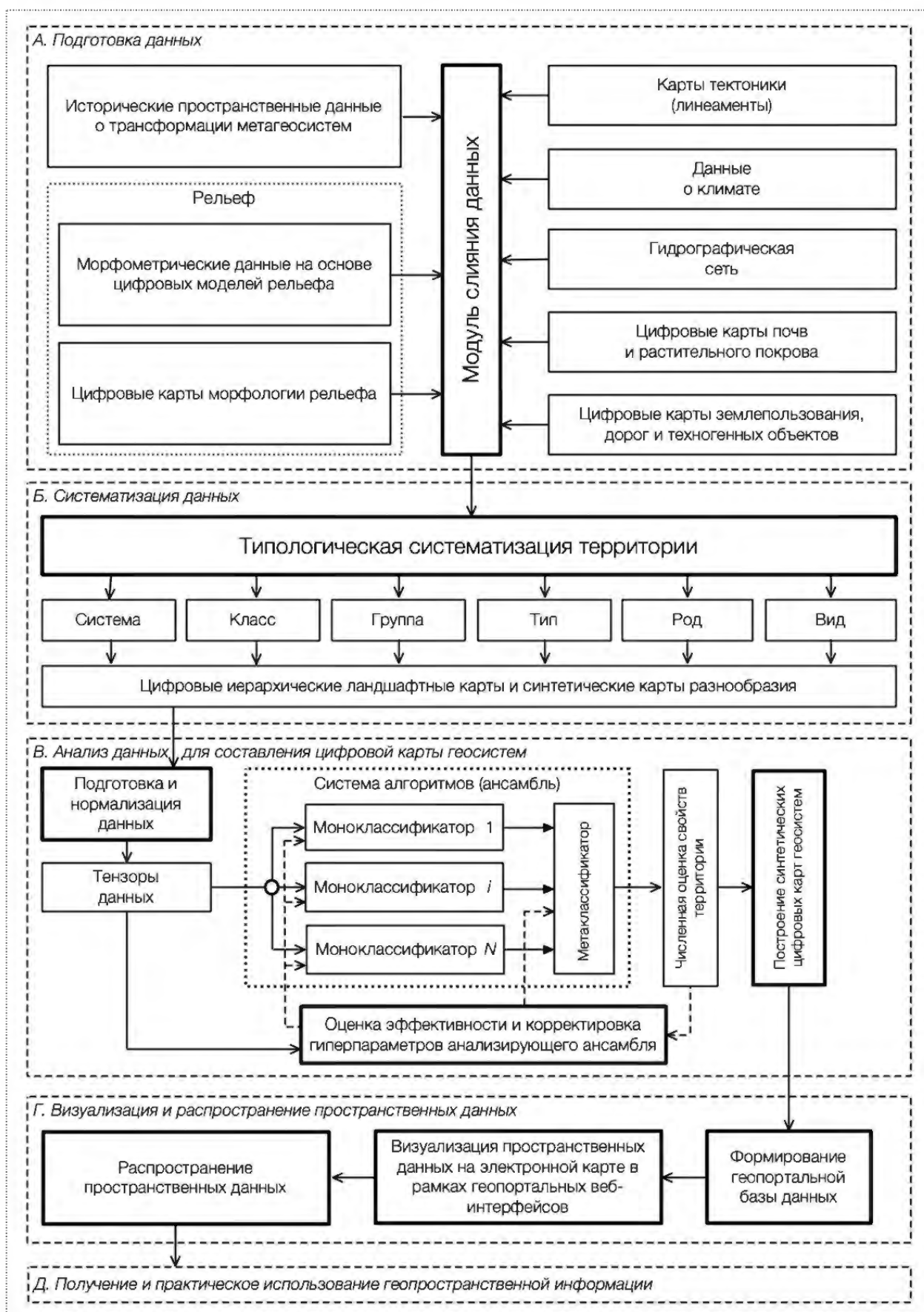


Рисунок 2.3 – Концепция формирования структуры баз данных регионального геопортала с позиции геосистемного подхода

В больших по размерам территории странах в крупные экономические районы объединяются субъекты административного устройства (в России сегодня субъекты федерации объединены на этом уровне в федеральные округа). Макрорегионам соответствуют либо территории крупных государств, либо совокупности государств на территории континентов и субконтинентов и акватории океанов и/или крупных их частей.

Предпоследний субпланетарный уровень в иерархической системе территориальной дифференциации планеты занимают традиционные формы экономической организации, основанные на международном разделении труда. Эти экономические образования имеют межконтинентальный (надмакрорегиональный) характер.

Самую высокую, глобальную иерархическую ступень занимают предельно возможные на планете формы территориальной организации природно-социально-экономических систем – мировое хозяйство и мировая цивилизация.

Территориально распределенные организационные системы всех основных уровней дифференциации можно рассматривать в качестве носителей материальных и духовно-интеллектуальных связей и отношений между входящими в эти природные и социальные системы составными частями.

Выделение структурно-функциональных элементов организационных территориально распределенных систем дает возможность определить основные виды территориальных систем: природно-ресурсная; мониторинга природной среды и природопользовательской деятельности; производства; обращения материальных благ; рекреационно-бытовых и производственных услуг; административно-территориального управления; безопасности граждан, общества, государства и человечества; материальной основы воспроизводства населения; формирования духовно-интеллектуального потенциала человека; защиты природной среды; преобразования природных условий, или территориальная система геомелиораций; восстановления природных условий (объектов), или территориальная система георециклики.

Еще одним важным критерием структуризации территориальной системы следует считать функциональную иерархию составных частей, позволяющую

выделить в территориально распределенных организационных системах материальный базис и интеллектуальную надстройку. В качестве базиса, естественно, определяется материальный процесс взаимоотношения природы и общества, на базе которого формируются и от особенностей которого зависят надстроечные интеллектуальные компоненты – познание (наука и инновации), воспитание-образование и управление. Структурно-функциональные элементы организационных территориально распределенных систем имеют взаимоотношения друг с другом по типу «объект – субъект», причем в случае как прямых, так и обратных связей.

Процесс управления территориальной системой включает действия по управлению материальным процессом, протекающим в организационных территориально распределенных системах, научной и инновационной деятельностью населения данной территории, педагогической (воспитательно-образовательной) деятельностью на территории, а также по регулированию самого механизма управления территорией. В расширенной трактовке геосистемы выступают как иерархически упорядоченные системы, включающие многообразие природных, экологических, социальных, экономических процессов [72].

В отличие от функционально-организационного и базисно-надстроечного, аспектный принцип связан не с организационной структурой объекта, а с теми или иными нюансами функционирования. Основными сквозными аспектами являются натуральные, временные (исторические, прогнозные), правовые, организационно-директивные, информационные (включающие картографические, геостатистические, геосемантические), математические, экономические (стоимостные), инженерные (инженерно-технические), политические (национально-политические, социально-политические, административно-политические), нравственные.

Производство цифровых моделей в современных условиях представляет собой многоэтапный, относительно длительный процесс, в котором задействованы большое количество исполнителей разных специальностей, сложный набор аппаратного и программного обеспечения. Выделим два ключевых способа представления геопространственных данных: растровый и векторный. Растровые данные представляют собой матрицу, каждая ячейка которой хранит в себе информацию

об атомарном территориальном участке. Векторные данные строятся на базе точек, описываемых кортежем координат, определяющих местоположение в пространстве, и представляющих собой единицу выстраивания более сложных объектов: линий, многоугольников, поверхностей и тел. По стандарту ISO 19109:2015 «Географическая информация. Правила для прикладной схемы» описываемые таким образом объекты представляют собой абстракцию явлений реального мира и могут быть описаны пространственными и тематическими атрибутами.

Для управления пространственным расположением и отношениями объектов необходимо использовать системы координат. В настоящее время применение находит система координат CRS. Она основана на координатах и позволяет определить местоположение географических объектов, установить взаимосвязи между ними, включает геоцентрическую систему координат, всемирную систему геодезических параметров Земли WGS84, универсальную поперечную проекцию Меркатора (UTM) и декартову систему координат (для локальных систем).

Для обеспечения эффективной информационной поддержки дистанционных измерений целесообразно сформировать систему тестовых полигонов, которая должна характеризоваться структурным разнообразием, высокой изученностью, стандартизированной задокументированностью [77]. Тестовые полигоны необходимо использовать для разработки и оптимизации новых методов и алгоритмов анализа пространственных данных, которые должны удовлетворять следующим требованиям: структурного разнообразия, оптимального расположения и размера, грамотного методического и технологического обеспечения процесса сбора данных, наличия информативного метаописания.

2.3 Организация микросервисной архитектуры управления пространственными данными на основе мультимодельного хранилища

К неотъемлемым проблемам обработки геопространственных данных следует отнести увеличение потребности в одновременном доступе к пространственной информации; большой, растущий объем анализируемых данных; сложность

алгоритмов пространственной обработки, ориентированных на высокую точность и автоматизацию. Растущий объем геопространственных данных и сложность алгоритмов их обработки часто сталкиваются с недостатком вычислительных возможностей локальных рабочих станций. Это в свою очередь приводит к смещению концепции реализации современных геоинформационных систем от настольных решений к облачным, обеспечивающим практически неограниченное пространство для хранения больших объемов данных и запуска ресурсоемких алгоритмов и моделей.

С целью решения задачи эффективного функционирования систем консолидации, обработки и анализа геопространственных данных и выполнения геопространственных автоматизированных процессов в облачной среде могут быть применены микросервисные архитектурные решения, предполагающие в том числе использование языков программирования, специфичных для предметной области [4]. Облачная организация инфраструктуры пространственных данных решает проблемы масштабируемости, доступности, отказоустойчивости и подходит для хранения и обработки растущих объемов данных.

Традиционные настольные ГИС имеют функции, внедрение которых представляет интерес и в облачной системе. Важное место среди них занимает возможность автоматизации многократно повторяющихся рабочих процессов, позволяющей значительно сэкономить время и ресурсы. Актуальной проблемой является развитие систем управления рабочими процессами обработки геопространственных данных, дающих возможность координировать и распараллеливать существующие алгоритмы.

В рамках использования облачных геоинформационных систем конечные пользователи заинтересованы в реализации следующих функций:

- 1) использование геопортальных интерфейсов, предоставляющих возможность обработки и визуализации больших наборов геопространственных данных;
- 2) работа с инструментарием для создания и управления процессами автоматизации повторяющихся задач без необходимости взаимодействия с деталями организации вычислительной инфраструктуры;

3) внедрение масштабируемых компонентов, направленных на обработку и анализ мультимодельных пространственных данных с возможностью их комбинирования для создания сложных цепочек на основе процессов обработки.

Микросервисная архитектура предполагает организацию взаимодействия изолированных служб, каждая из которых выполняет свою и только свою конкретную задачу. Архитектура облачного хранилища пространственных данных должна быть основана на использовании интерфейсов и точек расширения, позволяющих непрерывно интегрировать модули анализа пространственных данных без необходимости внесения фундаментальных изменений. Слабое зацепление компонентов системы представляет собой основной аспект формирования микросервисной архитектуры, обеспечивающий легкое расширение системы за счет интеграции новых компонентов и ее эффективное сопровождение.

Представим набор качественных свойств, достигаемых благодаря облачной организации инфраструктуры пространственных данных:

1) масштабируемость, предполагающая обеспечение обработки произвольно больших объемов данных из различных источников с целью решения достаточного набора проектно-ориентированных задач;

2) модифицируемость, опирающаяся на интеграцию слабо-связанных и независимо разворачиваемых микросервисов (модулей) для обеспечения высокой устойчивости инфраструктуры в целом;

3) диверсифицируемость процесса разработки, основанная на вовлечении распределенных команд инженеров и ученых, разрабатывающих независимые компоненты, которые можно интегрировать в общую систему для создания единого приложения;

4) отказоустойчивость, базирующаяся на создании и внедрении изолированных компонентов, работающих в своем окружении и обменивающихся данными по стандартизированным протоколам.

Достижение обозначенных свойств определяет высокую устойчивость формируемой инфраструктуры к ошибкам различного уровня, появление которых не приводит к остановке работы системы при выходе из строя отдельных

компонентов. Иным преимуществом при этом становится возможность вовлечения нескольких команд разработчиков в процесс постоянного развертывания новых версий своих компонентов без влияния на работу инфраструктуры в целом.

В системе ИПД можно выделить следующие ограничивающие контексты для микросервисов (рисунок 2.4): геопорталы (инструменты визуализации и управления пространственными данными), системы анализа и обработки данных и управления ими, а также распределенные облачные хранилища [3]. Разграничение на подсистемы визуализации, обработки и интеграции информации позволяет, начиная с верхнего уровня декомпозиции архитектуры системы, достичь усиления связности модулей и ослабления зацепления.

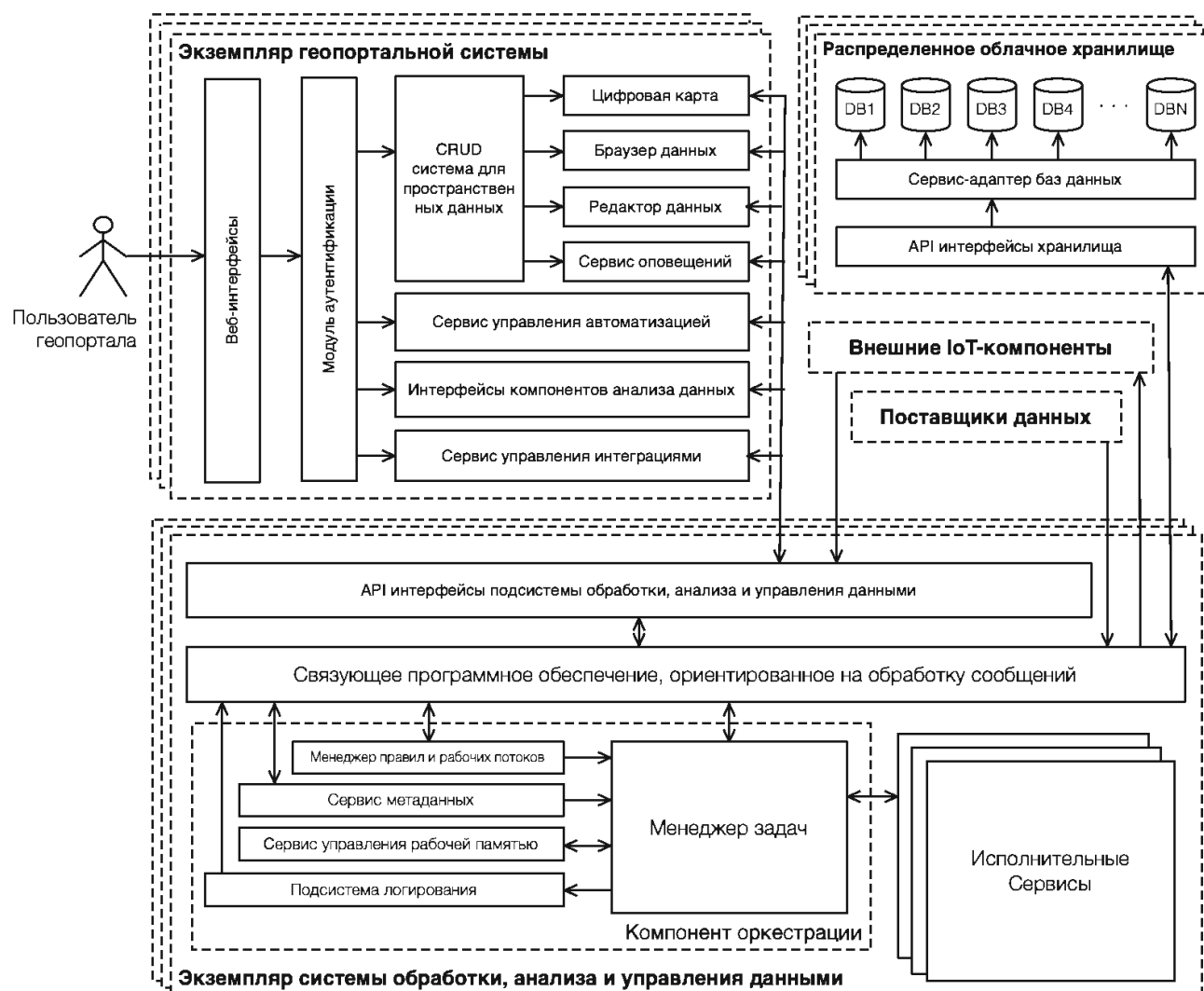


Рисунок 2.4 – Организация взаимодействия сервисов в ИПД

Необходимо отметить, что при этом может быть развернуто несколько распределенных экземпляров геопортальных систем, хранилищ данных и систем анализа, причем каждая из них может иметь уникальные функциональные и качественные характеристики. Геопортальные системы представляют собой точку доступа к информации, консолидированной в цифровых инфраструктурах пространственных данных, и проектируются с учетом из решаемых задач. Исходя из набора консолидируемых данных и перечня проектных задач, требующих решения, формируются веб-интерфейсы, посредством которых решается задача взаимодействия ключевых акторов системы с инфраструктурой пространственных данных. Так, отдельные геопорталы могут быть нацелены на решение задач интеграции информации об объектах природного, исторического и культурного наследия, управление системами землепользования (например, предприятиями сельского хозяйства), а также производства и службы, деятельность которых основана на внедрении и использовании компонентов Интернета вещей.

На основе модуля аутентификации решается задача управления доступом на основе ролей (Role Based Access Control, RBAC), предполагающая внедрение политик избирательного управления доступом, при этом права доступа акторов системы на использование функционала и данных группируются с учетом специфики их применения, формируя роли в системе.

От цели развертывания геопортала в значительной мере зависят сервисы, разворачиваемые в рамках CRUD-системы управления пространственными данными и решающие задачи создания, чтения, обновления и удаления информации. Центральным сервисом в данном контексте выступает сервис визуализации цифровой карты, позволяющий управлять послойным отображением различных тематических слоев пространственных данных, который может быть организован на основе архитектурного паттерна Model-View-Presenter. В рамках отдельного тематического слоя должны быть обеспечены функции интерактивного взаимодействия с пространственными объектами, решаться задачи асинхронной подгрузки данных и кластеризации.

Браузер пространственных данных позволяет осуществлять взаимодействие пользователя с системой фильтров для осуществления интерактивного поиска пространственной информации. Несмотря на то, что этот сервис во многих случаях используется совместно с цифровой картой, это отдельный компонент геопортальной системы, развивающийся независимо.

Сервисы редактирования пространственных данных разрабатываются и развертываются с целью реализации возможности управления хранилищем пространственных данных, позволяют осуществлять единичное и пакетное добавление пространственных объектов, осуществлять импорт и экспорт блоков информации, модифицировать пространственный и атрибутивный контекст.

Наконец, сервисы оповещений обеспечивают оперативное получение важных уведомлений, в том числе визуализируемых в рамках цифровой карты геопортала или браузера пространственных данных.

Сервисы организации интерфейсов взаимодействия с компонентами анализа пространственных данных представляют собой связующее звено, позволяющее осуществлять взаимодействие с исполнительными сервисами подсистемы обработки, анализа и управления пространственными данными, являющимися внешними по отношению к геопортальным системам. С другой стороны сервис управления триггерами автоматизации позволяет решить проблему оптимизации рутинных задач, осуществляя запуск определенных вычислительных расчетов при наступлении определенных условий: временных (наступление определенного времени, истечение периодического промежутка) и событийных (выполнение пространственных или атрибутивно-ориентированных условий). При этом условия могут быть нацелены как на анализ текущих параметров, так и на использование статистических характеристик накапливаемой информации.

Сервисы интеграции с внешними компонентами дают возможность настраивать взаимодействие с удаленными системами, в том числе объектами Интернета вещей, и при этом должны быть организованы на основе паттерна Адаптер, позволяющего осуществлять оперативное и унифицированное добавление оборудования новых поставщиков.

Распределенные облачные хранилища пространственных данных формируются на основе мультимодельных хранилищ данных, подходы к построению которых представлены ранее. Общая архитектура программно-определяемой облачной среды хранения пространственных данных реализуется на основе сервисов-адаптеров баз данных, определяющих особенности управления консолидируемой информацией на основе различных политик с целью управления, абстрагирования, объединения и автоматизации взаимодействия с физическими системами хранения на основе технологий виртуализации. Интерфейсы хранилища предоставляют доступ ко всем ресурсам пространственных данных, которыми управляют сервисы-адаптеры, делают среду открытой и расширяемой, благодаря чему возможно осуществлять интеграцию хранилища нескольких поставщиков.

Связующим звеном между геопортальными системами и распределенными облачными хранилищами инфраструктуры пространственных данных выступают системы анализа, обработки и управления пространственными данными, основанные на технологиях автоматизированной обработки информации и анализа данных. Ядром систем этого типа являются исполнительные сервисы, инкапсулирующие в себе программную реализацию алгоритмов обработки и анализа пространственных данных. Для оркестрации процесса выполнения и взаимодействия отдельных сервисов необходимо развертывание менеджера задач, функционирование которого основано на подсистеме определения правил запуска сервисов и выстраивания потока выполнения работ.

Посредством сервиса метаданных решается задача описания унифицированного интерфейса для запуска сервисов обработки, анализа и управления пространственными данными. Благодаря систематизации метаданных о сервисах возможна организация упорядоченного выполнения слабо зацепленных исполнительных сервисов.

Для управления информацией о текущем состоянии выполнения рабочих потоков обработки и анализа данных используются сервисы для управления рабочей памятью. Наконец, модуль логирования представляет собой инструмент сохранения знаний о выполненных процессах.

Связующее программное обеспечение инфраструктуры пространственных данных как комплекс программ для обеспечения взаимодействия между различными сервисами и компонентами целесообразно выстраивать на основе ориентации на обмен сообщениями в распределенном окружении. В отличие от технологий удаленного вызова процедур и использования брокеров запросов, формирующих системы из сильно-связанных компонентов, связующее программное обеспечение, ориентированное на обработку сообщений, позволяет организовать слабое связывание компонентов.

Для организации систем интеграции, хранения и обработки больших массивов пространственно-временной информации в ИПД целесообразно комплексное использование научно обоснованного набора систем управления базами данных.

В настоящее время основные геопространственные базы данных классифицируются по двум категориям: реляционные базы данных и NoSQL-хранилища. Первые используются наиболее широко: самые зрелые СУБД десятилетиями применяются в различных отраслях. В хранилищах этого класса организация процесса интеграции данных основана на сущностях и связях, установленных между ними. Высокоорганизованная структура и гибкость делают реляционные хранилища мощными и адаптируемыми к различным типам пространственных данных [73]. Для обогащения хранилища геопространственными функциями и возможностями обработки геопространственных данных в современные реляционные СУБД внесены дополнения. Так, PostGIS представляет собой открытое программное обеспечение, добавляющее поддержку географических типов данных и геометрии, индексов для быстрых пространственных запросов в реляционную базу данных PostgreSQL. Ключевым преимуществом PostGIS при этом является наличие нескольких методов индексирования многомерных пространственных данных: GiST, BRIN и SP-GiST.

Анализ больших наборов пространственных данных в СУБД возможен на основе пространственной индексации, организующей данные в определенную структуру. Классический метод В-дерева при этом неудобен для анализа многомерной геометрии пространственных данных. Решение может быть достигнуто

посредством использования обобщенного дерева поиска (GiST), систематизирующего данные по разным принципам: на основе операторов взаимного расположения, пересечения, вхождения. Доступ к пространственным данным при этом организуется на основе R-дерева, в рамках которого многомерное пространство разбивается на множество иерархически вложенных. Метод индексирования, работающий на основе пространственно разделенного обобщенного дерева поиска (SP-GiST), позволяет анализировать несбалансированные структуры данных, такие как деревья квадрантов, k-мерные и префиксные деревья.

Для анализа больших пространственно отсортированных, по возможности необновляемых данных целесообразно использовать индекс BRIN (Block Range Index), работающий на знаниях о естественной корреляции с физическим положением строки в таблице.

В реляционных СУБД согласно стандарту ISO/IEC 13249:2016 «Информационные технологии. Языки баз данных. Мультимедийные и прикладные пакеты SQL. Часть 3. Пространственные данные» должно поддерживаться 27 типов описания геометрии, из которых 24 типа геометрии имеют функции конструктора. Схемы таблиц и отношений между ними генерируются и изменяются, основываясь на правилах нормализации данных. Основные операции над отношениями определены классическими операциями над множествами (объединение, пересечение, разность), выборкой подмножества атрибутов по критериям фильтрации (проекция), соединением таблиц (декартово произведение). Язык SQL является стандартом выполнения представленных выше операций.

Реляционные СУБД имеют ряд недостатков, не позволяющих с их помощью развернуть крупномасштабные среды доступа к пространственным данным. Новые геопространственные приложения, реализуемые в системе ИПД, требуют эластичной масштабируемости, устойчивости к высоким нагрузкам, быстрого времени ответа на запросы со сложными агрегационными параметрами. Традиционные пространственные реляционные СУБД эту возможность обеспечить не могут. Так, потоковые запросы от компонентов Интернета вещей к серверам легко могут привести к недоступности системы и увеличению времени ответа.

Альтернативные преимущества процессу интеграции пространственных данных способны предоставить NoSQL-хранилища, представляющие собой распределенные СУБД, не требующие жесткой структуризации данных. Они не ограничены реализацией стандартного для реляционных хранилищ свойств ACID (атомарность, согласованность, изоляция и надежность), что делает их открытыми для горизонтального масштабирования. При этом NoSQL СУБД демонстрируют возможность интегрировать и индексировать большие наборы данных, поддерживая значительное количество одновременных и сложных пользовательских запросов.

Необходимо учесть, что пространственных типов данных и геометрических функций в реляционных СУБД явно больше, чем в базах данных NoSQL, в которых пространственные объекты могут описывать точечные, линейные, полигональные объекты и геометрические коллекции.

Каждая отдельная СУБД, основанная на определенной парадигме интеграции пространственно-временной информации в ИПД, не может предоставить ключ к решению всех задач в области консолидации пространственной информации. Проблему интеграции, хранения и обработки больших массивов пространственно-временной информации целесообразно решать на основе мультимодельных хранилищ, гибридной базы данных, основанной на функциональных возможностях СУБД разных классов [2]. Комплексный анализ потенциальных функциональных требований к разворачиваемым ИПД, опыт проектной реализации систем данного класса, исследование рынка современных СУБД позволили сформировать реестр компонентов, на основе которых целесообразно организовать мультимодельное хранилище пространственной информации (таблица 2.2).

Представим описание СУБД, а также подходов к их организации, формирующих основу для мультимодельного хранилища пространственных данных.

Таблица 2.2 – СУБД в рамках мультимодельного хранилища

СУБД	Модель данных	Поддержка пространственных данных	Пространственные индексы	Лицензия	Управление транзакциями	Применение в ИПД
MySQL	Реляционная	Базовые пространственные операции индексации, хранения и анализа	R-дерево	GPL	ACID	CRUD-манипуляции с нормализованными базовыми данными о территориальных объектах в рамках геопорталов
PostgreSQL	Реляционная	Исчерпывающая поддержка пространственных данных и операций	R-дерево, GiST, BRIN и SP-GiST	BSD	ACID	CRUD-манипуляции с нормализованными большими данными о метагеосистемах
MongoDB	Документная	Базовые пространственные операции индексации, хранения и анализа	2d sphere index, геохэш	SSPL (на базе GNU AGPL)	Многодокументные ACID-транзакции с изоляцией моментальных снимков	Систематизация слабоструктурированных данных, в том числе о мониторинге пространственных процессов, хранение и регистрации событий
Redis	Резидентная, ключ-значение	Базовые операции с точечными данными	геохэш	BSD	Атомарное выполнение команд, оптимистическая блокировка	Организация высокоскоростного буфера обмена данными ИПД с внешними агентствами и системами, системы кеширования
Neo4j	Граф-ориентированная	Базовые пространственные операции индексации, хранения	R-дерево	GPL	ACID	Хранение информации о горизонтальных и вертикальных связях геосистем
ClickHouse	Колоночная	Базовые пространственные операции индексации, хранения	гексагональный иерархический пространственный индекс	Apache	Нет (атомарность и изоляция поддерживаются для отдельных операций)	Организация модулей интерактивной аналитической обработки данных (OLAP-компонентов) в ИПД
TimescaleDB	Хранилище временных рядов	Базовые пространственные операции индексации, хранения геовременных данных	R-дерево	MIT	Поддержка обеспечения целостности данных после неатомарных манипуляций	Сбор и управление пространственными данными, меняющимися с течением времени: показатели развития стихийных процессов, транзакций Интернета вещей

1. Реляционные СУБД (работающие под управлением MySQL или PostgreSQL) обеспечивают консолидацию в ИПД информации, требующей строгой нормализации и категоризации и обеспечения возможности CRUD-манипуляции с данными о территориальных объектах. Использование пространственных индексов позволяет повысить скорость и точность поиска информации на основе географических критериев.

2. Резидентные хранилища (основанные на Redis) предоставляют наиболее простую форму хранения данных (в формате «ключ-значение»), благодаря чему обладают свойством ресурсной эффективности и применяются в качестве высокопроизводительных внутрипроцессных баз данных. Предпочтительны для разработки систем кеширования данных, буферов высокоскоростного обмена с внешними системами.

3. Документная база данных (функционирующая на базе MongoDB) характеризуется организацией данных без единой схемы (записи имеют разные атрибуты, отличные внутри себя по типам данных, и могут иметь различную структуру). Актуальны для систематизации слабоструктурированных данных, информации о мониторинге пространственных процессов, хранении и регистрации событий.

4. Граф-ориентированные хранилища (выстраиваемые на основе Neo4j) систематизируют данные в графовых структурах в виде вершин и ребер (отношений между вершинами) и позволяют эффективно консолидировать данные в такой форме и вычислять свойства графа. Целесообразны для хранения информации о горизонтальных и вертикальных связях геосистем.

5. Хранилища временных рядов (основанные на TimescaleDB) внедряются для эффективного сбора и управления временными рядами с большим объемом транзакций. СУБД временных рядов предназначены для эффективного сбора, хранения и запроса различных временных рядов с большими объемами транзакций. Пригодны для систематизации пространственной информации, для которой характерно изменение с течением времени (например, показателей развития стихийных процессов).

6. Колоночная база данных (формируемая на основе ClickHouse) консолидирует данные с возможностью хранения большого количества динамических столбцов, поэтому их можно рассматривать как двумерные хранилища ключей и значений. Представляет безальтернативное решение для организации модулей интерактивной аналитической обработки данных (OLAP-компонентов) в ИПД.

В реестр СУБД, формирующих основу для организации мультимодельного хранилища данных ИПД, вовлечены системы, относящиеся к классу открытого программного обеспечения и поддерживающие операции с пространственными данными на том или ином уровне. Результаты сравнительного тестирования производительности колоночного хранилища (на основе ClickHouse), реляционных баз данных (PostgreSQL) и системы хранения временных рядов (TimescaleDB) представлены в таблице 2.3.

Измерение производительности выполнялось на одном сервере на базе двухъядерного процессора Intel Xeon с тактовой частотой 2,60 ГГц, оперативной памятью – 128 Гб. Хранилище организовано на базе накопителей на жестких магнитных дисках. Его объем измеряется 100 миллионами записей.

Таблица 2.3 – Производительность баз данных разного класса в рамках мультимодельного хранилища

Тип запроса	Время выполнения запроса, с.			
	ClickHouse	MySQL	PostgreSQL	TimescaleDB
Простая выборка	$2,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^0$	$3,1 \cdot 10^0$
Условная выборка	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$3,1 \cdot 10^2$	$7,9 \cdot 10^0$	$6,5 \cdot 10^0$
Группировка по одному полю с агрегацией и сортировкой	$7,3 \cdot 10^{-1}$	∞	$4,5 \cdot 10^1$	$2,5 \cdot 10^1$
Группировка по множеству полей с агрегацией и сортировкой	$2,1 \cdot 10^0$	∞	$2,5 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^1$

Как видно из таблицы, реляционные СУБД и хранилища временных рядов могут иметь преимущества или по крайней мере показывать сравнимые характеристики при выполнении простых запросов на выборку данных. Необходимость агрегации больших данных по нескольким полям делает использование классического реляционного подхода невозможным, особенно в условиях высокой нагрузки на систему хранения данных. Колоночные СУБД позволяют решить данную

проблему, при этом реляционные системы остаются актуальными для хранения хорошо структурированных нормализованных данных. Решение задачи проектирования хранилища пространственных данных производилось на основе реляционного подхода, позволяющего реализовать структурирование данных о пространственных объектах. Анализ рынка современных СУБД доказывает необходимость выбора PostgreSQL с расширением PostGIS в качестве опорного решения для консолидации данных. ER-диаграмма, описывающая логическую организацию хранилища геоданных о пространственных объектах, представлена на рисунке 2.5.

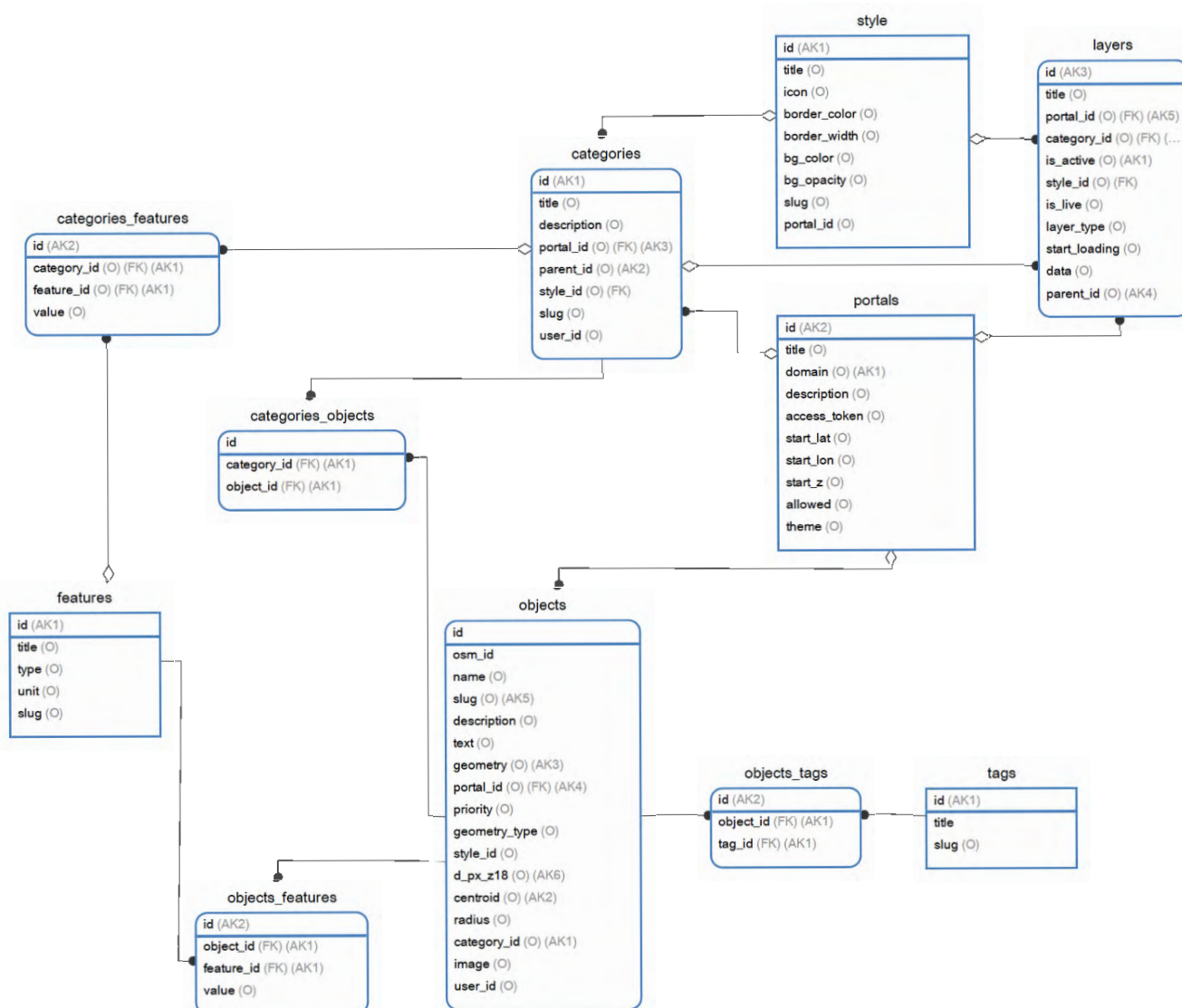


Рисунок 2.5 – ER-диаграмма, описывающая принцип систематизации данных о геопространственных объектах

Ключевые сущности системы – геообъекты (objects), категории объектов (categories), порталы (portals), тематические слои (layers), теги (tags),

характеристики объектов (features). Ряд вспомогательных таблиц (object_features, object_tags, categories_objects, categories_features) обеспечивает возможность формирования связей между обозначенными функциями по принципу «многие-ко-многим». Геометрия геообъектов хранится в формате WKB (Well-known binary), а для решения задачи индексации данных о пространственных координатах используются пространственные индексы, выстраиваемые на основе древовидной структуры данных.

Дополнительно принято решение хранить вспомогательную информацию о пространственных объектах, используемую для ответа на асинхронные запросы по получению данных определенного масштаба: координаты геометрического центра, радиус минимальной описывающей окружности, размер с привязкой к пикселям в определенном масштабе отображения тайлов.

Предложенная структура хранилища позволяет систематизировать данные о геообъектах по категориям, описывать их свойства, сопоставлять теги, хранить реестр геопорталов-спутников и определять наборы тематических слоев для каждого из них.

Реляционное нормализованное хранилище данных о сущностях, отвечающих за возможность развертывания сети устройств Интернета вещей вокруг геопортальной системы, обеспечивает достаточную масштабируемость системы. На рисунке 2.6 представлена ER-диаграмма, описывающая сущности и связи геопортального хранилища, отвечающие за хранение данных, обеспечивающих управление устройствами и их мониторинг.

К ключевым сущностям хранилища относятся устройства (devices), информация об устройствах (device_info), конкретные устройства пользователей (user_devices), параметры устройств пользователей (user_devices_parameters), параметры устройств (device_parameters), производители устройств (brands), навигационные маршруты (navigation), объекты навигационных маршрутов (navigation_objects), команды устройств (device_commands), параметры телеметрии (telemetry_parameters), данные телеметрии (telemetry_data), группы телеметрических параметров (telemetry_parameters_groups), событие записи телеметрии

(telemetry_events), условия автоматизации (triggers), действия автоматизации (trigger_actions), условия срабатывания условий автоматизации (trigger_conditions), объекты автоматизации (trigger_objects), лог автоматизации (trigger_logs), оповещения (notifications), поля настройки оповещений (notifications_fields), параметры настройки Telegram-ботов (telegram), лог управляющих команд (command_log), лог ответа на управляющие команды (command_response_log), протоколы передачи данных (protocols). Также для хранения связей «многие-ко-многим» в хранилище имеются промежуточные таблицы.

Для интеграции геопортальной системы с внешними устройствами Интернета вещей в состав мультимодельного хранилища необходимо вовлечение документно-ориентированной СУБД, резидентного хранилища для организации буфера обмена данными, а также колоночно-ориентированного хранилища (ClickHouse). На рисунке 2.6 представлен принцип работы мультимодельного хранилища для обеспечения дистанционного мониторинга и управления организационными территориально распределенными системами посредством взаимодействия с устройствами Интернета вещей на основе различных протоколов.

Для осуществления интеграции устройства Интернета вещей с геопортальной системой был разработан TCP FLEX-сервер, функционирующий на основе фреймворка Tornado, обеспечивающего эффективное решение сетевых задач. В рамках разработки обозначенного компонента реализован модуль кодирования и декодирования данных, передаваемых по протоколу FLEX различных версий. Получаемые от устройства телеметрические данные обрабатываются TCP FLEX-сервером, после чего происходит создание записи с задачей на обработку сырых телеметрических данных в резидентной системе управления базами данных Redis.

Сервер на основе Redis Queue осуществляет обработку заданий на основе очередей в фоновом режиме с помощью организации рабочих процессов. Использование связки Redis Queue совместно с резидентным хранилищем данных Redis позволяет накапливать необработанные задачи на запись телеметрии в реляционное хранилище с целью снижения нагрузки на него с точки зрения количества устанавливаемых соединений.

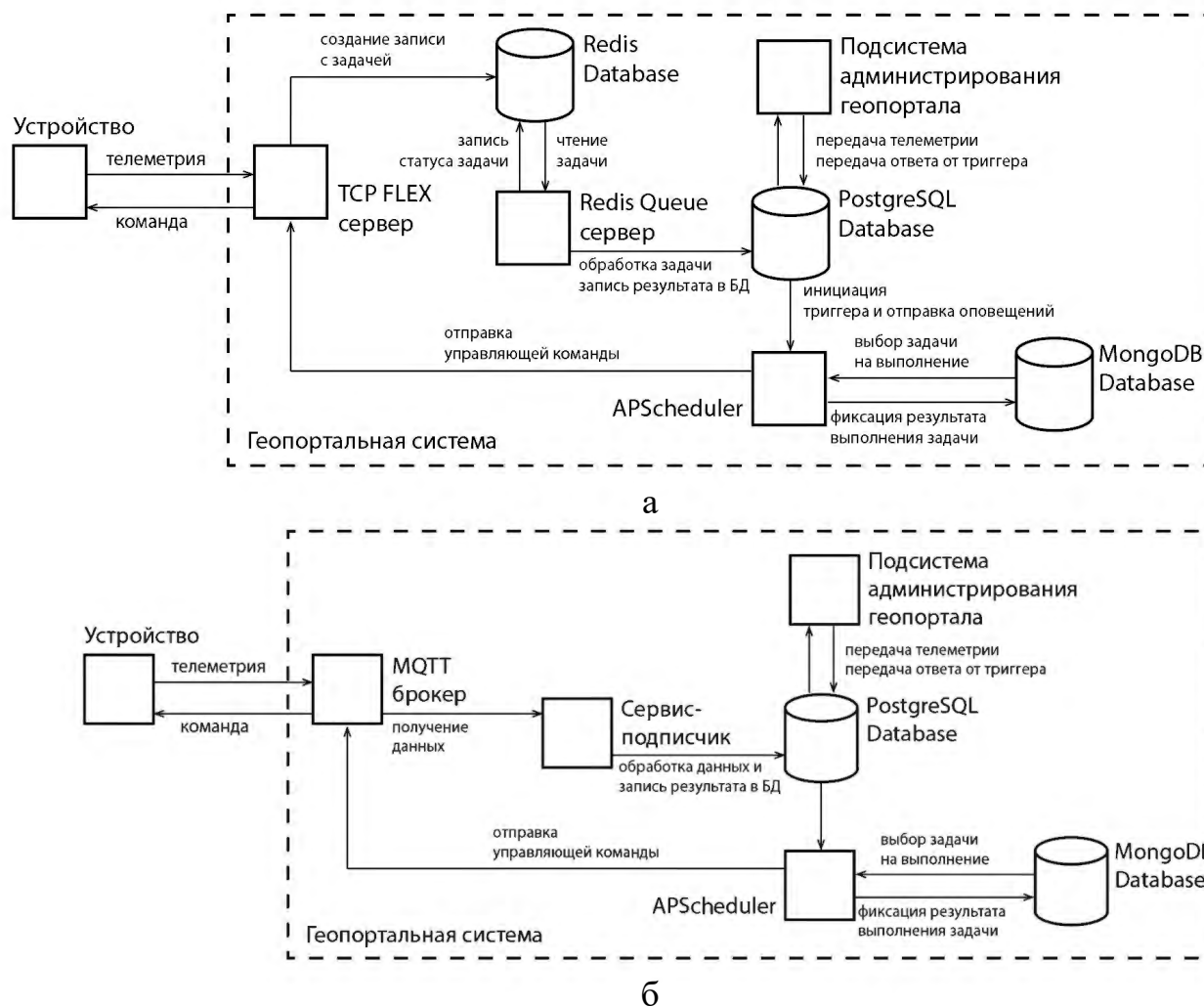


Рисунок 2.6 – Принцип работы мультимодельного хранилища для обеспечения дистанционного мониторинга и управления организационными территориально распределенными системами посредством взаимодействия с устройствами на основе протоколов FLEX (а) и MQTT (б)

Это повышает устойчивость и стабильность работы системы в условиях обработки больших массивов телеметрических данных. Данные записываются в хранилище, управляемое СУБД PostgreSQL, и становятся доступны из инструментов аналитической обработки геопортальной системы. В случае вариантов использования, связанных с отправкой управляющих команд (по инициации пользователя системы или на основе триггера автоматизации), задача на выполнение управляющей команды записывается в документно-ориентированное хранилище MongoDB.

Планировщик задач Advanced Python Scheduler (APScheduler) инициирует периодические запросы к документно-ориентированному хранилищу задач с целью выборки заданий на отправку устройствам на исполнение. Также планировщик производит фиксацию результата выполнения задач. Управляющая команда направляется на устройство через TCP FLEX-сервер.

В рамках геопортального каркаса платформы реализован способ дистанционного автоматизированного управления устройствами на основе протокола MQTT, в рамках которого MQTT-брокер выполняет работу посредника в решении задачи передачи телеметрии и управляющих команд между устройствами Интернета вещей и геопортальной системой. Сервис-подписчик получает данные от MQTT-брокера, обрабатывает и отправляет их на запись в хранилище данных PostgreSQL. Отдельное место занимает проблема интеграции моделей анализа пространственных данных в единую систему в рамках ИПД. Подсистема анализа и синтеза пространственных данных как системный компонент ИПД может функционировать на основе жестких и мягких вычислений. Для достижения свойства проектной ориентации хранилища моделей анализа пространственных данных алгоритмы должны быть ассоциированы с проектными задачами, в которых они могут быть применены, и с данными, которые они анализируют.

Существующего базового решения для этой задачи до настоящего времени не существовало в силу междисциплинарного характера проблемы. В главе 5 представлено решение задачи проектирования и разработки репозитория глубоких нейросетевых моделей для анализа и прогнозирования развития пространственных процессов.

2.4 Инфраструктуры пространственных данных как центральное звено изготовления картографических материалов

Пространственные данные, консолидируемые в цифровых ИПД, становятся безальтернативным источником информации для разработки картографической продукции. Реализация проекта «Серия настенных карт Русского географического

общества "Природное и культурное наследие Республики Мордовия"» осуществлена в рамках гранта РГО (договор № 38/2016-Р) и нацелена на решение следующих задач:

- формирование информационного пространства в проводимых в 2018 году в Саранске игр чемпионата мира по футболу и предоставление информации о деятельности Русского географического общества;
- создание информационного портрета Республики Мордовия в кабинетах руководителей и специалистов, переговорных комнатах, наглядно демонстрирующего географическую уникальность и привлекательность региона;
- обеспечение образовательного процесса в средних общеобразовательных школах, колледжах и высших учебных заведениях региона наглядной географической информацией о Республике Мордовия и деятельности РГО.

В ходе проведения первого проектного этапа «Подготовка информационной базы исследования» на основе данных геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» исследована географическая характеристика региона с выделением особенностей размещения объектов природного и культурного наследия. На территории региона, площадь которого сравнима с площадью таких государств, как Албания, Армения и Бельгия, проживает множество народов: эрзя, мокша, русские, татары, белорусы, украинцы, удмурты, армяне. В результате многовековой истории развития хозяйства Мордовия стала индустриально-аграрным регионом. При построении основных карт использована картографическая основа Мордовского геодезического центра – филиала ФГУП «Верхневолжское аэрогеодезическое предприятие» масштаба 1:200 000, которая путем генерализации была приведена к масштабу 1:400 000. При построении мелкомасштабных карт использовалась картографическая основа Географического атласа Республики Мордовия [20]. При составлении тематических карт использовались региональная ГИС «Мордовия», разработанная в ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарева», а также материалы Министерства лесного, охотничьего хозяйства и природопользования Республики Мордовия, Территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Республике Мордовия.

В рамках второго проектного этапа «Разработка цифровых карт и накопление материалов» последовательно решены следующие задачи:

- разработка системы цифровых географических карт региона, легенды и тематического содержания, формирование тематических банков иллюстративного материала;
- итерационное развитие алгоритмов анализа пространственных данных, уточнение технологии создания географических карт.

Для проведения проектных работ использована единая концепция, предполагающая: привлечение имеющихся исторических, археологических, этнографических, геологических и географических информационных ресурсов; широкое применение исторического и культурного наследия; интегрирование материалов о природном и историческом наследии путем выделения культурных ландшафтов. Для создания серии настенных карт собраны иллюстративные и фотоматериалы различной тематической направленности.

Серия настенных карт создавалась на основе использования актуальных геопространственных данных, собранных в геопортале «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» и реестровых документах. С целью получения геопространственных данных и информации о регионе были проведены следующие работы:

- разработка географической основы, уточнение цифровой модели рельефа Мордовии, на базе которой создана типовая географическая основа карт;
- сформированы базы данных природного и историко-культурного наследия региона, выделены особенности природы, населения, хозяйства Республики Мордовия;
- проведен анализ географической обстановки и организации природных и социальных систем, геоконцептов культурных ландшафтов и особенностей организации природных и социальных систем Республики Мордовия;
- разработаны система географических карт региона, номенклатура, легенды и тематическое содержание, осуществлена ревизия пространственных данных на

основе геопортальных систем, решена задача отображения данных на проектируемых картах;

– сформированы тематические банки иллюстративного материала, выполнены авторские составительские работы по созданию карт на основе консолидированных пространственных данных.

В ходе третьего проектного этапа «Верстка и публикация» были решены задачи по созданию карт и выполнению типографских работ. В результате разработана система цифровых географических карт Республики Мордовия, которые разделены на три блока (три листа настенных карт): «Природное наследие Республики Мордовия», «Историко-культурное наследие Республики Мордовия», «Хозяйство и экономическое развитие Республики Мордовия». Для каждого блока созданы по одной карте масштаба 1:400 000 и система тематических карт масштаба 1:1 500 000, подобраны иллюстрации и численные данные для диаграмм.

1. Блок «Природное наследие Республики Мордовия» включает следующие артефакты:

– *основная карта масштаба 1:400 000* имеет слои, содержащие следующую тематическую информацию: особо охраняемые природные территории (федерального значения – Мордовский государственный природный заповедник им. П. Г. Смидовича, Государственный национальный парк «Смольный»; регионального значения – геологические, водные, ботанические, зоологические, комплексные), ключевые орнитологические территории, распространение редких видов растений;

– *вспомогательные карты*: «Рельеф и месторождения полезных ископаемых», «Дочетвертичные отложения», «Климат», «Реки», «Ресурсы подземных вод», «Почвы», «Растительность» (1:1 500 000).

2. Блок «Историко-культурное наследие Республики Мордовия» включает:

– *основную карту масштаба 1:400 000* со следующими тематическими слоями: памятники истории и культуры федерального значения (археологии, истории, градостроительства и архитектуры, искусства), населенные пункты с разделением по преобладающему национальному составу (русские, мордва-эрзя, мордва-мокша,

татары, украинцы, смешанные), музеи (Музей военного и трудового подвига 1941–1945 гг., Мордовский республиканский музей изобразительных искусств им. С. Д. Эрьзи (г. Саранск) и его филиалы, ГУК «Мордовский республиканский объединенный краеведческий музей имени И. Д. Воронина» (г. Саранск) и его филиалы, дома-музеи), монастыри;

– карты в масштабе 1:1 500 000: «Памятники археологии», «Старейшие города», «Национальный состав населения по районам», «Плотность населения и людность населенных пунктов», «Выдающиеся люди».

3. Блок «Хозяйство и экономическое развитие Республики Мордовия» включает:

– основную карту в масштабе 1:400 000, содержащую следующие тематические слои: промышленные центры и пункты (по объему валового производства – крупные, средние, малые, прочие значимые) с указанием отраслей промышленности (производство машин и оборудования, транспортное машиностроение, электротехническое машиностроение, предприятия строительной индустрии, цементная промышленность, деревообрабатывающая промышленность, химическое производство, производство пищевой продукции, текстильное и швейное производство), индустриальные зоны (высокотехнологичный центр, зона инновационного развития, зона по производству электрооборудования, электронного и оптического оборудования, транспортно-логистический центр; Zubovo-Полянско-Теньгушевская индустриальная зона по обработке древесины и производству изделий из дерева; Чамзинско-Комсомольская индустриальная зона – центр производства строительных материалов; Ковылкинская зона производства энергетических ресурсов (строительство ГРЭС), производство строительных материалов (Темниковско-Ковылкинская туристско-рекреационная зона, Центры перерабатывающей промышленности), ТЭЦ, воздушный транспорт (международный аэропорт, аэропорт малой авиации), пути сообщения (железные дороги, автодороги федерального значения, прочие автодороги с покрытием, прочие автодороги без покрытия, грунтовые проселочные дороги, мосты), границы (субъектов РФ и районов Республики Мордовия), гидрография (реки, озера, водохранилища, болота);

– карты масштаба 1:1 500 000: «Транспорт», «Промышленность», «Сельскохозяйственные земли», «Сельскохозяйственные районы», «Перерабатывающие предприятия АПК», «Заготовка древесины», «Газопроводы и обеспеченность газом жилого фонда».

Настенные карты Русского географического общества «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» объединяет единое назначение, классификация и изображение элементов содержания, а также единообразное оформление. Серия является информационно-справочным картографическим изданием для широкого круга потребителей и предназначена для получения информации о природе, административно-территориальном устройстве, населенных пунктах, промышленных и социально-культурных объектах, истории, путях сообщения.

2.5 Выводы по второй главе

1. Стратегическая цель развития ИПД заключается в формировании инструмента, позволяющего моделировать структуру и динамику организационных территориально распределенных систем, особенности их взаимодействия, проводить оценку и прогнозирование процессов развития территориально распределенных организационных систем.

2. Теоретико-множественный подход к анализу системных свойств элементов проблемно-ориентированных ИПД и их связей определяет необходимость формирования слабо-зацепленных за счет интерфейсов микросервисных компонентов следующих контекстов: подсистем хранения пространственных данных, модулей автоматизированного анализа, визуализации и распространения пространственных данных (в виде геопортальных систем).

3. Для оптимизации процессов хранения и практического использования пространственных данных выработаны критерии эффективности ИПД, формируемые на основе набора целевых эффектов системы, показателей ресурсоемкости, параметров сложности процессов построения, модификации и практического использования.

4. Развитие теории и практики управления для обеспечения условий устойчивого развития природных, социальных и производственных систем возможно в направлении решения задачи повышения эффективности анализа закономерностей пространственно-временной организации сложных динамических иерархически организованных геосистем.

5. Целесообразно выделить следующие уровни интеграции и использования данных: базовых пространственно-временных данных; пространственных моделей; принятия решений (обеспечивающий использование пространственных данных в процессе управления). Для структуризации информации о территориальных системах целесообразно применение генетического, исторического, территориально-структурного принципов. Структурно-функциональные элементы организационных территориально распределенных систем имеют взаимоотношения по типу «объект – субъект». Структуризация территориально распределенных систем позволяет провести их упорядочение с выделением иерархии природных таксономических единиц (систем, классов, групп, типов, родов и видов) и социально-экономических уровней.

6. Проблему интеграции, хранения и обработки больших массивов пространственных данных в ИПД могут решить мультимодельные хранилища, гибридные базы данных, основанные на функциональных возможностях СУБД разных классов (реляционные, резидентные, документные, граф-ориентированные, колоночные, хранилища временных рядов). Отдельное место занимает проблема формирования репозитория алгоритмов анализа пространственных данных. Следствием использования мультимодельных хранилищ является усиление качественных характеристик цифровой ИПД – гибкое масштабирование хранилища по мере необходимости, повышение надежности и отказоустойчивости.

7. Проект «Серия настенных карт Русского географического общества "Природное и культурное наследие Республики Мордовия"» реализован в рамках гранта РГО (договор № 38/2016-Р) и представляет собой практический пример того, как пространственные данные, консолидируемые в цифровых ИПД, становятся ключевым источником информации для разработки картографической продукции.

3 МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

3.1 Геосистемный подход как инструмент решения открытых проблем в области решения задачи интерпретации пространственных данных

Решение задач управления позитивными и негативными рисками в организационных территориально распределенных системах различного масштаба должно представлять основную цель проектирования, разработки и внедрения практико-ориентированных инфраструктур пространственных данных. При этом данные дистанционного зондирования становятся важнейшим источником информации, позволяющим получать достоверные и оперативные знания для организационных систем значительного территориального охвата. Анализ данных ДЗЗ должен основываться на автоматических и автоматизированных алгоритмах анализа данных, обеспечивающих высокие (достаточные) точность и скорость синтеза информации о территориально распределенных системах. В данном контексте актуально использование методов ландшафтной индикации, позволяющих анализировать структуру и состояние территориально распределенных систем, их компонентов и протекающих в них процессов по данным дистанционного зондирования [17] для ускорения и удешевления процесса мониторинга состояния организационных территориально распределенных систем.

Особенности процесса природной индикации существенно зависят от решаемой задачи управления, исходя из которой определяется набор индикаторов, которые целесообразно подвергнуть анализу. Таким образом, тип индикации может быть определен из задачи и области управления (индикация инженерно-геологических, аграрных, природоохранных, гидрологических, геологических условий), особенностей объекта (индиката) управления (индикация горных пород, почв, водных, растительных, техногенных объектов) и типа управления рисками (индикация прошедших и развивающихся процессов, решение задач прогнозирования). Под

индикаторами при этом следует понимать показатели, позволяющие распознавать (классифицировать, сегментировать, детектировать) территориальные объекты (природные сообщества, техногенные комплексы) для решения задачи обеспечения процесса управления организационными территориально распределенными системами. Следует выделить две группы индикаторов: физиономические (доступные непосредственно дистанционному наблюдению) и деципиентные (труднонаблюдаемые признаки, регистрируемые на основе специальных средств или оцениваемые на основе источников дополнительной априорной информации). К первой группе можно отнести структуру и тип растительности и выходящих на поверхность горных пород, водные объекты, техногенную застройку, а ко второй – геологическое строение, структуру почв, уровень грунтовых вод.

Физиономические и деципиентные индикаторы дают характеристику природных, социальных и производственных подсистем, а также позволяют смоделировать особенности их взаимодействия. С точки зрения решения задачи управления организационными территориально распределенными системами на основе процесса идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками индикаторы, получаемые посредством технологий дистанционного зондирования и баз пространственных данных, позволяют:

- проанализировать и спрогнозировать уязвимость и устойчивость территориально распределенных систем с угрозам и возможностям различной природы;
- оценить последствия (в том числе ущерб) природных и природно-техногенных процессов и явлений, предложить направления восстановления и развития природных и социальных систем.

Таким образом, разработка и экспериментальное обоснование новых геоинформационных методов и алгоритмов автоматизированного анализа пространственных данных (космических снимков, цифровых моделей и карт, атрибутивной пространственно-временной информации) для решения задач анализа структуры и состояния земель и прогнозирования природных и техногенных чрезвычайных ситуаций – актуальная научная проблема современности. Результаты анализа космических снимков и других

пространственных данных становятся важным инструментом управления организационными системами, деятельность которых связана с использованием пространственно распределенных ресурсов. Артефакты интерпретации данных ДЗЗ позволяют создавать карты систем землепользования и планы развития территорий. Космическая съемка может также использоваться для мониторинга изменений, происходящих в окружающей среде (например, для оценки масштабов лесных пожаров, определения площадей затопления) [95]. Анализ космических снимков используется для решения задач прогнозирования природных и природно-техногенных чрезвычайных ситуаций, а также для управления ресурсами и системами логистики.

В связи с этим алгоритмы работы с большими массивами пространственно-временных данных и функционирующие на их основе программные комплексы становятся неотъемлемой частью инфраструктур пространственных данных. Развитие технологий машинного обучения, в том числе на основе моделей глубоких нейронных сетей [198], основанных на использовании различных уровней нелинейной обработки данных для извлечения и преобразования признаков, анализа и классификации образов, позволяет осуществлять высокоточный автоматизированный мониторинг систем природопользования и анализировать закономерности протекания природных процессов и явлений.

Характеристика индикаторов территориальных систем и их роль в решении задач управления организационными территориально распределенными системами представлена в таблице 3.1.

Прогнозирование пространственных процессов в географической оболочке сопряжено с решением задач диагностики связи отдельных элементов с природными факторами, установления закономерностей хозяйственного освоения природно-ресурсного потенциала, оценки антропогенных воздействий и их последствий [201]. Точность автоматизированных методов анализа пространственных данных, в том числе развивающегося в настоящее время машинного обучения, в значительной мере зависит от информации, которая заключена в исходных данных [173].

Таблица 3.1 – Индикаторы территориальных систем и их роль в решении задач управления организационными территориально распределенными системами

Индикатор	Источник данных	Значение	Задача управления
1	2	3	4
Состояние, ширина, связность и протяженность дорог, путей, мостов, плотность дорожной сети	Данные ДЗЗ высокого разрешения	Анализ доступности, оценка пропускной способности сети, потенциал эвакуации	Оценка уязвимости и устойчивости территории к проявлению чрезвычайных ситуаций, оценка последствий стихийных процессов и явлений
Наличие транспортных средств	Данные ДЗЗ высокого разрешения	Состояние транспорта и функционирование дорог	Мониторинг процессов восстановления, хозяйственного использования территории
Площадь затопления паводковыми водами	Данные ДЗЗ различного разрешения	Определение уровня охвата земель паводковыми водами для оценки ущерба	Оценка ущерба и последствий стихийного процесса
Территории с непроницаемым покрытием	Данные ДЗЗ высокого разрешения, цифровые модели рельефа (ЦМР)	Оценка устойчивости территории к затоплению	Оценка уязвимости и устойчивости территории к стихийным процессам, в том числе паводкам
Плотность дренажных и речных сетей	Данные ДЗЗ высокого разрешения. ЦМР	Оценка уязвимости территории на основе плотности дренажных и речных сетей	Оценка уязвимости и устойчивости территории к наводнениям, паводкам, половодьям
Текстура и материал застройки, тени зданий	Данные ДЗЗ высокого разрешения, цифровые карты застройки, аэрофотоснимки	Оценка устойчивости зданий к последствиям природных опасностей, а также последствий стихийных бедствий	Оценка структуры и состояния техногенной застройки, а также уязвимости и устойчивости территории
Тип, структура и состояние систем землепользования (в том числе посевов)	Данные ДЗЗ среднего и высокого разрешения, цифровые карты земель, аэрофотоснимки	Анализ типа и состояния хозяйственной деятельности, использования природных ресурсов	Оценка состояния систем землепользования, формирование стратегий развития хозяйства, анализ ущерба, восстановления, устойчивости, уязвимости земель
Крутизна и экспозиция склонов	ЦМР	Устойчивость территории к оползневым процессам	Оценка уязвимости и устойчивости территории к экзогеодинамическим процессам
Оценка неоднородности (энтропии) территории	Данные ДЗЗ среднего и высокого разрешения	Изучение структуры сложных природных и социальных систем, оценка ландшафтного разнообразия	Оценка природного, биологического, ландшафтного разнообразия территории, прогнозирование уязвимости и устойчивости земель

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4
Особенности водных объектов и акваторий	Данные ДЗЗ среднего и высокого разрешения	Оценка загрязнения и состояния водоемов	Оценка уязвимости и устойчивости акваторий, прогноз потенциала использования водных ресурсов в хозяйстве
Структура, текстура и состояние растительного покрова	Данные ДЗЗ среднего и высокого разрешения, цифровые карты земель, аэрофотоснимки, карты индексов	Анализ типа и состояния хозяйственной деятельности, устойчивости территории к пожарам, оценка деградации и восстановления лесов	Оценка состояния сельскохозяйственных земель, лесного фонда. Прогноз уязвимости и устойчивости территории к стихийным процессам, в том числе пожарам
Особенности расселения, размещения объектов интереса, доступность инфраструктуры	Цифровые карты земель, пространственные базы данных объектов	Анализ возможностей хозяйственного использования территории, туристского и рекреационного потенциала	Оценка возможностей использования территориальных систем в социальной инфраструктуре
Освещенность в ночное время	Данные ДЗЗ в инфракрасном диапазоне	Интенсивность ночного освещения характеризует районы различной техногенной застройки	Оценка степени развития территориальных хозяйственных систем

С целью повышения эффективности геоинформационных методов и алгоритмов комплексной интерпретации геопространственных данных следует использовать не только традиционные источники сведений о территории, но и материалы, которые выступают конечным артефактом процесса ее изучения (в частности, цифровых карт геосистем) [249, 257].

Для решения задачи изучения динамики природно-техногенных процессов и прогнозирования направления и скорости их развития целесообразно проведение экспериментального исследования системных связей и закономерностей функционирования и развития организационных территориально распределенных систем на основе комплексного применения глубоких сверточных и рекуррентных нейронных сетей к анализу данных ДЗЗ и электронных ландшафтных карт. Ключом к формированию процесса обучения прогностических нейронных сетей выступит гипотеза о том, что на любой стадии освоения территории вследствие взаимодействия природных и технологических процессов создается определенная структура

природопользования, сопровождающаяся активизацией спектра деструктивных геоэкологических процессов, особенности которых почти всегда проистекают от свойств вмещающего природного ландшафта; одновременно с этим черты развития процессов хозяйственного освоения в настоящее время характеризуются развертыванием новых этапов освоения на техногенных модификациях геосистем прошлых периодов.

Пространство поиска моделей определяет, какие архитектуры могут быть представлены для решения задачи анализа больших пространственных данных [114]. Использование априорных систематизированных знаний позволит уменьшить размер пространства поиска и упростить его [116].

Поиск нейросетевых архитектур основывается на выборе пространства поиска, определяющего типы используемых моделей; стратегии поиска, определяющей подходы к исследованию пространства поиска; стратегии оценки производительности формируемой нейросетевой модели [19]. Прямое применение к мультиспектральным пространственным изображениям контролируемых сверточных сетей является сложной задачей из-за высокой размерности входных данных и относительно небольшого количества доступных помеченных данных [15].

Применение моделей глубоких нейронных сетей должно быть проблемно-ориентированным: процессы проектирования архитектуры машинного анализатора, выбора его гиперпараметров, формулирования требований к выводу данных и консолидации объемов обучающих, проверочных и тестовых выборок должны определяться спецификой задачи, которую необходимо решить [46]. Также имеет значение качество документации по применению и точной настройке выбранной модели. Использование глубокого обучения снижает стоимость проводимых исследований за счет возможности автоматизированного выделения сложных иерархических признаков. Методы и алгоритмы глубокого обучения облегчают решение проблемы выделения признаков из многомерных пространственных данных, которая традиционно решалась путем трудоемкой экспертной работы.

Анализ публикаций показал, что применение методов и алгоритмов глубокого обучения к решению задачи интерпретации геопространственных данных сталкивается с рядом проблем, требующих решения.

1. *Обучение глубоких моделей в условиях дефицита размеченных данных.* Несмотря на то, что глубокие модели способны извлекать информационные признаки из многомерных данных, эффективность этого процесса сильно зависит от большого количества обучающих выборок. Вместе с тем, создание банков размеченных пространственных данных высокого разрешения представляет собой затратный и трудоемкий процесс, поэтому задача обеспечения способности глубокой модели извлекать признаки на основе меньшего количества дорогостоящих или трудноизвлекаемых обучающих выборок является открытой.

2. *Внутренняя сложность изображений, получаемых на основе технологий ДЗЗ,* определяется тем, что конкретные пространственные объекты характеризуются разными размерами, спектральными яркостями, структурными признаками и взаимным положением по отношению к соседним объектам. Это приводит к усложнению задачи извлечения из этих данных надежных и устойчивых признаков. Следует с осторожностью использовать традиционные для изображений методы расширения обучающей выборки, основанные на применении примитивных искажений при работе с данными ДЗЗ: природные системы часто не инвариантны к ориентациям по сторонам света. Так, экспозиция склона является информативным признаком, который нельзя не учитывать при решении многих задач.

3. *Конфигурирование гиперпараметров модели при анализе сложных пространственных данных является открытой проблемой.* Глубокие нейросетевые модели могут изучить большее количество функций, но при этом они сильно подвержены переобучению. Не последнюю роль играет фактор высокой ресурсоемкости процесса обучения чрезмерно емких моделей, что предполагает либо необходимость высоких затрат на дорогостоящее вычислительное оборудование, либо увеличение временных издержек.

4. *Проблема адаптации к новому набору пространственных данных* актуальна при решении задачи классификации земель нового пространственного района.

Возможность повторного использования обученной модели для дешифрирования спутниковых снимков другой местности может значительно повысить рентабельность и скорость проводимых работ, а способы получения повторно используемых моделей машинного анализа требуют системного исследования.

Геосистемный подход опирается на положение о том, что географическая оболочка, системы ландшафтов, отрасли хозяйства и производственные комплексы переплетены внутренними глубинными взаимосвязями, на основании которых можно сделать вывод о происхождении и состоянии объекта [155]. Внедрение геосистемного подхода опирается на рассмотрение структуры сложных объектов, образованных из более простых, органически связанных между собой, что позволяет решать вопросы геоинформационного обеспечения региональных схем и проектов. Иерархическое структурирование геосистем для анализа и классификации земель должно основываться на выделении типологических единиц (таксонов). Моделирование иерархической системы таксонов геосистем ориентируется на выделение разрядов, классов, групп, типов, родов и видов по В.А. Николаеву [54]: разряд (GS_1), класс (подкласс) (GS_2), группа (GS_3), тип (GS_4), род (GS_5) геосистем.

При геосистемном подходе состояние и свойства каждой территориальной единицы определяется [27]: 1) особенностями ее взаимодействия с соседними объектами того же иерархического уровня; 2) характеристиками вмещающей геосистемы более высокого иерархического уровня; 3) взаимодействием между объектами более низкого иерархического уровня, из которых состоит анализируемая территория. Специфика каждой территории во многом определяется ее положением в структуре окружающей среды. Иерархичность и самостоятельность являются типичными чертами геосистем, поэтому большой объем информации о принадлежности пространственного объекта к определенному классу потенциально может содержаться в данных о геосистеме более высокого уровня иерархии, в которой находится классифицируемая область. В дальнейшем мы будем опираться на такое понятие, как геосистема – иерархически организованная система, сформированная в результате сложного взаимодействия природных, социальных и техногенных факторов.

Сформулируем гипотезу о том, что точность классификации земель на основе пространственных данных может быть повышена, если классифицирующая модель будет учитывать и анализировать не только свойства конкретной территории, но и особенности геосистем, с которыми она взаимодействует и, в частности, частью которых является. Для проверки гипотезы необходимо подготовить несколько наборов данных для обучения моделей – базовый (состоящий из экспертно размеченных выборок областей) и расширенный (дополненный данными, содержащими информацию о соседних и вмещающих геосистемах). После этого следует предложить классифицирующую модель, которая принимает на вход исходные данные о местности и связанных с ней геосистемах, анализирует эту информацию и принимает решение о классификации данной территории. При выявлении закономерностей в повышении точности классификации можно говорить о целесообразности применения геосистемного подхода при обучении моделей глубоких нейронных сетей.

Решение задачи классификации данных ДЗЗ путем глубокого обучения с использованием геосистемного подхода должно основываться на предварительной аугментации данных и создании глубокой модели, способной эффективно эти данные анализировать. Под классификацией будем понимать функцию f , осуществляемую моделью M , имеющей опыт E , и позволяющую сопоставить локальный объект, характеризующийся набором параметров $\mathbf{x}_{Local}$ и непосредственно взаимосвязанный с геосистемами, описываемыми значениями вектора $\mathbf{x}_{Geosystem}$, с определенной меткой класса y :

$$y = f(\langle \mathbf{x}_{Local}, \mathbf{x}_{Geosystem} \rangle, M, E). \quad (3.1)$$

Если $\mathbf{x}_{Geosystem}$ – представляет собой пустое множество, то можно говорить о классификации без привлечения геосистемной информации. Набор признаков локального территориального объекта $\mathbf{x}_{Local}$ (в том числе пространственных, спектральных и радиометрических характеристик) может быть сформирован на основе материалов космической съемки или иных источников, при этом пространственную область можно классифицировать на основе попиксельного анализа либо путем выделения признаков из фрагментов области разного размера. Совокупность

признаков локального объекта, которые сами по себе могут быть упакованы в тензоры, определяет базовый уровень создаваемой геопространственной модели местности.

Система признаков локального объекта, которые сами по себе могут быть упакованы в разноразмерные тензоры, определяет уровень L0 создаваемой геопространственной модели местности (рисунок 3.1).

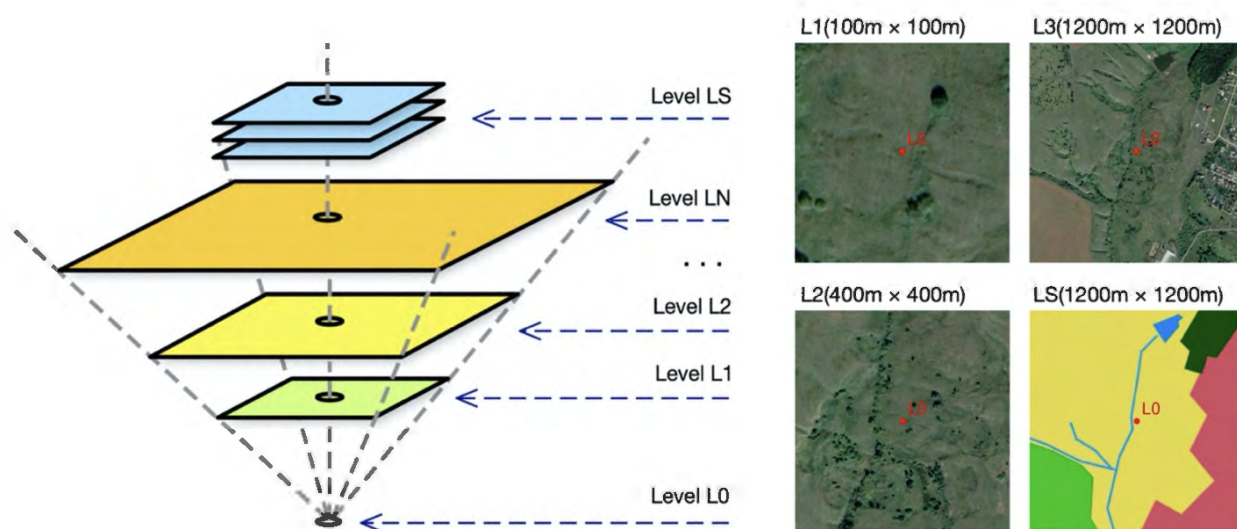


Рисунок 3.1 – Геосистемная модель территории

В приведенном примере слои L1, L2 и L3 представляют собой вмещающие геосистемы разных иерархических уровней в видимом спектре, а слой LS представляет собой фрагмент ландшафтной карты местности.

Под $x_{Geosystem}$ понимаются данные, характеризующие вмещающие иерархические геосистемы, которые согласно геосистемному подходу оказывают существенное влияние на свойства территории. Данные дистанционного зондирования являются полезным источником информации о вмещающих геосистемах. В то время как к данным L0 по объекту $x_{Geosystem}$ предъявляются жесткие требования (они должны быть получены строго в определенное время и иметь высокое разрешение) и, как следствие, достаточно дорогие, требования к данным уровней начиная с L1 можно ослабить, обеспечив упрощение и удешевление процесса их получения. В настоящее время данные ДЗЗ среднего и высокого пространственного

разрешения открыто поставляются различными провайдерами через Интернет, а некоторые из них предоставляют интерфейсы прикладного программирования (API) для их быстрого получения. Тот факт, что эти данные имеют относительно низкое временное разрешение, объясняет их невысокую стоимость. Одновременно с этим, они по-прежнему являются полезным источником информации о вмещающих геосистемах разных иерархических уровней [214].

Процесс интеграции расширенных данных о геосистемах уровней $L_1, L_2, \dots, L_N$ при определенных допущениях подлежит потенциально полной автоматизации: имея данные о географических координатах (широте и долготе) классифицируемой области, можно сделать запрос к API поставщика геопространственных данных на получение фрагмента спутникового снимка местности, включающего эти координаты и характеризующегося необходимым масштабом и разрешением. Таким образом, мы получаем возможность алгоритмического расширения обучающей выборки за счет импорта фрагментов космических снимков, описывающих геосистемы более высокого иерархического уровня и вмещающих классифицируемую территорию.

Следует отметить, что не только данные дистанционного зондирования определенного масштаба могут характеризовать геосистемы разного иерархического уровня, эта функция вполне может быть возложена и на синтетические цифровые карты. Карты систем землепользования, электронные ландшафтные и другие тематические карты, традиционно являющиеся конечным артефактом интерпретации данных ДЗЗ, содержат значительный объем информации о свойствах территорий, и, как следствие, их можно использовать для создания наборов дополнительной информации. Несмотря на то, что эти карты часто имеют относительно низкое разрешение, их высокий уровень абстракции позволяет говорить о значительном потенциале для обогащения информации по классификации небольшого по размерам региона. Синтетические цифровые карты формируют еще один уровень геопространственной модели местности и становятся важным источником семантического расширения набора вспомогательных данных. Множество $\mathbf{x}_{Geosystem}$ может

быть пустым, в этом случае можно говорить о классической классификации без учета данных о вмещающих геосистемах.

3.2 Глубокая нейросетевая модель для классификации геосистемной модели территории

Для классификации на основе кортежа данных $\langle \mathbf{x}_{Local}, \mathbf{x}_{Geosystem} \rangle$, необходимо спроектировать глубокую нейросетевую систему, которая получает на вход тензоры данных о классифицируемой области (L_0) и вмещающих ее геосистемах ($L_1, L_2, \dots, L_N, L_S$) и выдает гипотезу о принадлежности этого района к определенному классу.

Разработка архитектуры модели GeoSystemNet [65], основанной на применении геосистемного подхода к анализу земель, базировалась на методе итерационного построения дерева формирования моделей классификатора (рисунок 3.2). С позиции «черного ящика» модель GeoSystemNet представляет собой функциональный элемент, получающий на вход спутниковые снимки местности (L_0) и вмещающих ее геосистем (L_i), а также синтетические карты (L_s). Количество входов может варьироваться в зависимости от числа уровней модели геосистемы местности, но с их ростом следует быть осторожным, так как это неизбежно приведет к необходимости увеличения мощности модели. Модель имеет один выход в виде вектора, каждый i -й элемент которого определяет прогнозируемую вероятность принадлежности территории к i -му классу. Окончательная гипотеза о принадлежности площади к определенному классу выдвигается по принципу «победитель получает все», когда объект принадлежит к тому классу, для которого модель предсказывает максимальную вероятность. Рисунок 3.2 иллюстрирует декомпозицию описанной модели.

Блок Unit L_x , извлекающий иерархические признаки F_{xi} разных уровней $i = \overline{1, N}$ из исходного изображения L_x , вводится в начальное выделение признаков на основе данных каждого входа $L_x \in \langle L_0, \dots, L_i, \dots, L_s \rangle$. Блок Unit L_x декомпозируется на N блоков извлечения данных, каждый из которых имеет внешний выход.

Структура каждого блока представляет собой цепочку слоев. Первый слой, выполняющий операцию разделимой по глубине двумерной свертки, позволяет извлекать признаки из исходного изображения и, в отличие от применения традиционного слоя свертки, сделать глубокую модель более компактной и, следовательно, устойчивый к переобучению.

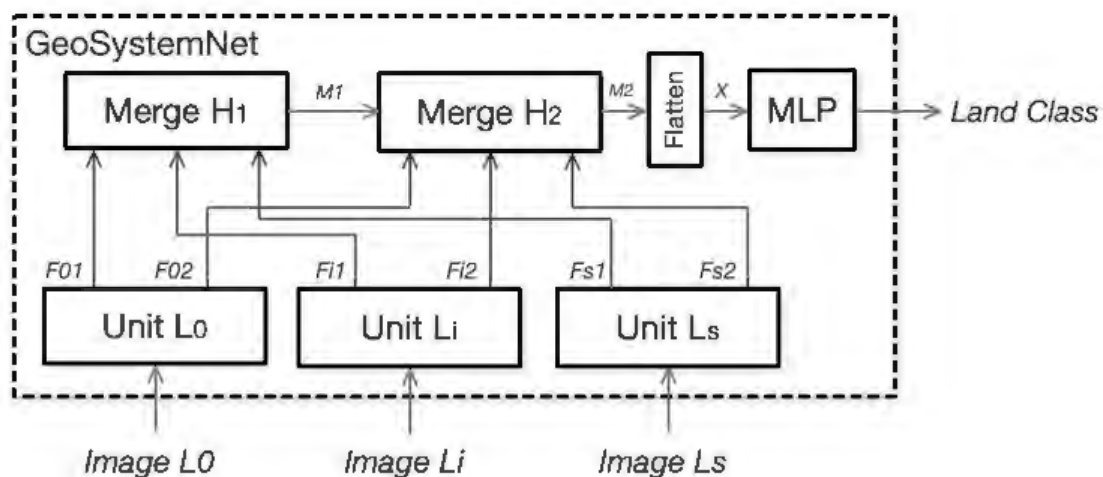


Рисунок 3.2 – Обобщенная структура модели GeoSystemNet с 3 входами

Операция двумерной свертки с ядром W размера K как основа функционирования слоя, представляет собой линейное преобразование, при котором каждое значение $y_{i,j}$ выходной матрицы Y вычисляется на основе значений x исходной матрицы X согласно следующему уравнению:

$$y_{i,j} = WX = \sum_{a=0}^{K-1} \sum_{b=0}^{K-1} W_{a,b} x_{i+a,j+b}. \quad (3.2)$$

Операция свертки обладает рядом важных свойств: она сохраняет входную структуру и геометрию, характеризуется разреженностью и многократным использованием одного и того же веса. Разделимые по глубине свертки работают не только с пространственным измерением, но и с измерением глубины, например с каналами изображения, и, в отличие от классической свертки, предполагают использование отдельных ядер свертки, на основе которых к исходному тензору последовательно применяются две свертки – по глубине и поточно.

Следует отметить, что при решении тестовых задач по классификации земель было проведено сплит-тестирование моделей с классическими сверточными

слоями и с разделяемыми по глубине 2D-сверточными слоями, подтвердившее эффективность второго подхода. Слой пакетной нормализации, позволяющий добиться регуляризации и стабильности модели, был следующим слоем блока выделения признаков, эффективность которого была проверена экспериментально [148].

Для выполнения операции активации была выбрана операция линейной ректификации, осуществляемая через преобразование типа $x = \max(0, x)$. Слой субдискретизации, выполняющий задачу прореживания данных посредством взятия максимального значения в пределах участка матрицы настраиваемого размера, введен для уменьшения размера полученных представлений, завершает блок выделения признаков. Операция субдискретизации, примененная к элементам $x_{i,j}$ исходной матрицы X , приводит к получению матрицы Y , для которой значение каждого элемента $y_{i,j}$ при размере окна субдискретизации d вычисляется по формуле:

$$y_{i,j} = \max_{\substack{0 \leq a < d \\ 0 \leq b < d}} (x_{i+a,j+b}). \quad (3.3)$$

Эксперименты показали, что наилучший результат дает применение операции по достижению максимума.

Важно отметить положение о том, что количество выходных фильтров в свертке и размер ядра свертки целесообразно выбирать в соответствии с принципом минимизации этих значений, чтобы классификация была достаточно точной. Рекомендуется увеличивать количество выходных фильтров для разделяемой по глубине двумерной свертки с каждым новым шагом выделения признаков следующего уровня. На рисунке 3.3 представлена структурная схема блока Unit Lx, позволяющая извлекать иерархические признаки двух уровней из изображения Lx.

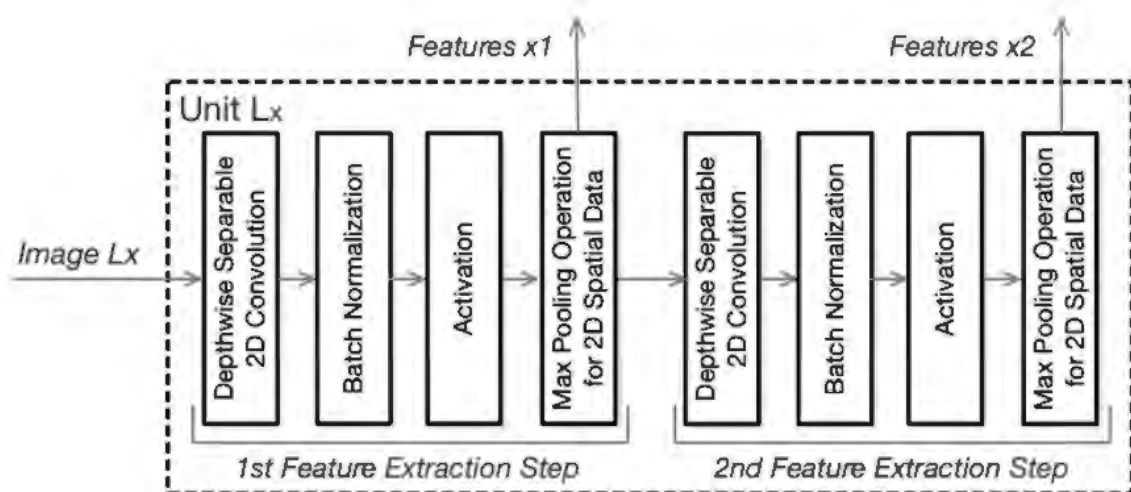


Рисунок 3.3 – Модуль Unit L_x выделения иерархических признаков двух уровней

Следующим компонентом модели GeoSystemNet является модуль объединения признаков, представленный на рисунке 3.4. Он принимает на вход признаки уровня N, извлеченные из изображений классифицируемой области и связанных с ней геосистем. Модули слияния второго и последующих уровней также получают выходные данные предыдущего модуля слияния. Общее количество модулей слияния признаков равно количеству уровней иерархического выделения признаков в секциях блока Unit L_x.

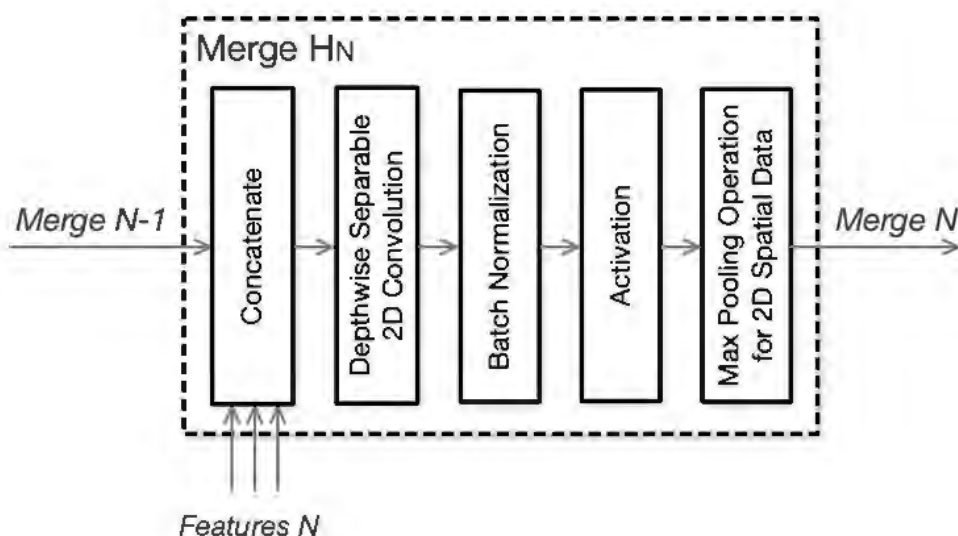


Рисунок 3.4 – Модуль слияния признаков уровня Merge H_N

Все входные данные объединяются в один тензор и обрабатываются конвейером выделения признаков, структура которого аналогична той, что используется

в модуле Unit Lx. Он состоит из таких слоев, как разделяемая по глубине двумерная свертка, пакетная нормализация, активация и максимальное объединение для двумерных пространственных данных. Предлагается выбрать большее количество выходных фильтров в свертке для единицы Merge H_N , чем размерность фильтра, в процессе выделения признаков на соответствующем уровне N в модуле Unit Lx. Выходные данные модуля слияния признаков преобразуются в вектор с помощью операции выравнивания и вводятся в многослойный персептрон (рисунок 3.5).

Число плотно связанных слоев многослойного персептрона и их мощность выбираются по принципу минимизации этих параметров с обеспечением достаточной точности классификации. Кроме того, для решения проблемы переобучения рекомендуется применять к выходным данным плотно связанных слоев операции пакетной нормализации, активации (линейной ректификации) и прореживания. Для выходного слоя блока функция активации устанавливается сигмоидной в случае двоичной классификации и логистической (softmax) для многоклассовой классификации.

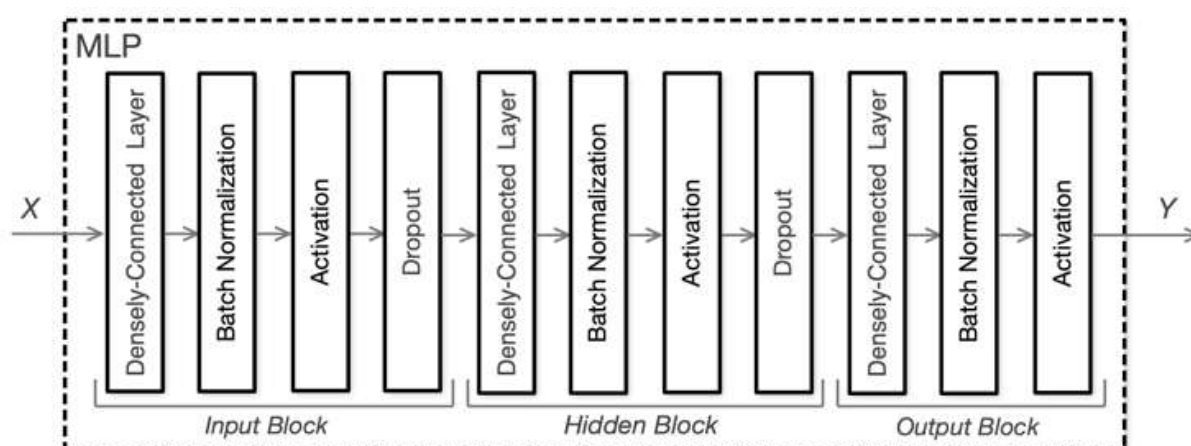


Рисунок 3.5 – Модуль классификации геосистем
на основе иерархических признаков

При обучении классификатора GeoSystemNet в качестве оптимизатора использовался алгоритм среднеквадратичного распространения (RMSProp), основанный на методе стохастического градиентного спуска, при этом в качестве функции

потерь выступала перекрестная энтропия. Особенности конкретной задачи классификации влияют на тонкую настройку модели GeoSystemNet.

В качестве математического аппарата для расчета объективных показателей эффективности модели выбран метод матриц ошибок, выстраиваемых по результатам классификации. Для первичной апробации предложенного метода применен открытый набор данных EuroSAT, сформированный для обучения и тестирования классифицирующих моделей при решении задачи классификации систем землепользования и растительного покрова на основе спутниковых снимков Sentinel-2. Набор данных равномерно размечен по 10 классам и состоит из 27 000 изображений, содержащих информацию о земельных участках, распределенных по территории Европейского союза, в 13 спектральных диапазонах. Размер каждого элемента набора данных составляет 64 на 64 пикселя с пространственным разрешением 10 м. на пиксель и характеризуется географической привязкой (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Примеры фрагментов изображений 10 классов, охватываемых набором данных EuroSAT

Проектировщики набора данных EuroSAT предоставляют и характеристики точности классификации на основе различных соотношений между обучающей и тестовой выборками (таблица 3.2). Нейросетевая модель ResNet-50 демонстрирует точность 96,43 % (при разбиении обучающей и тестовой выборок в соотношении 80 к 20) и 75,06 % (при соотношении 10 к 90). Неглубокая двухслойная сверточная сеть достигает точности 87,96 % (при соотношении 80 к 20) и 75,88 % (при соотношении 10 к 90). Следует обратить внимание на то, что глубокие сверточные модели в основном демонстрировали более высокую точность, чем машины опорных векторов.

Таблица 3.2 – Точность классификации (%) по набору данных EuroSAT для различного деления обучающих и тестовых выборок.

Модель	Число объектов	Набор данных	Время обучения	Разделение на тестовые и обучающие выборки								
				10/90	20/80	30/70	40/60	50/50	60/40	70/30	80/20	90/10
CNN (2 layers)	422 378	EuroSAT	164	75.88	79.84	81.29	83.04	84.48	85.77	87.24	87.96	88.66
GoogleNet	6 797 700	EuroSAT	902	77.37	90.97	90.57	91.62	94.96	95.54	95.70	96.02	96.17
DenseNet121	8 062 504	EuroSAT	1381	73.11	79.48	84.14	86.35	88.31	91.50	94.45	96.64	97.64
InceptionV3	23 851 784	EuroSAT	1044	75.03	89.13	92.20	93.01	95.25	95.77	96.02	96.86	97.93
ResNet50	25 636 712	EuroSAT	955	75.06	91.01	93.75	94.01	94.45	95.26	95.32	96.43	96.37
ResNet101	44 707 176	EuroSAT	1505	79.77	84.77	87.81	89.60	90.67	92.99	96.17	95.57	96.89
VGG16	138 357 544	EuroSAT	1134	76.53	85.59	88.23	89.88	91.86	93.02	94.66	96.65	96.08
GeoSystemNet	1 324 526	Расширенный EuroSAT	895	86.23	91.52	93.98	94.11	94.29	94.35	94.41	94.65	95.30

Таким образом, глубокие сверточные сети демонстрируют отличную точность классификации спутниковых изображений при относительно большом объеме обучающей выборки набора данных EuroSAT, но представленные подходы показывают существенную потерю точности при дефиците обучающих данных. В то же время повышение точности методов и алгоритмов анализа пространственных данных с учетом их дефицитности является актуальной задачей.

Решение обозначенных проблем приходится искать за счет не только совершенствования архитектур глубоких моделей, но и разработки методов и алгоритмов оптимального обогащения обучающих наборов данных, чего можно достичь посредством геосистемного подхода и интеграции с поставщиками пространственных данных. Для получения расширенных данных о вмещающей геосистеме был разработан алгоритм аугментации обучающего набора, позволяющий загружать разномасштабные изображения анализируемой области на основе программных интерфейсов (API) поставщика данных MapBox, используя географические координаты территории, хранимые в метаданных изображений EuroSAT [66]. Поэтому базовый набор данных (уровень L0) был расширен дополнительными уровнями информации без существенных затрат. Окончательный набор данных (расширенный EuroSAT) получил следующую структуру.

– *Уровень L0*. Размеченные данные набора данных EuroSAT (изображения размером 64 на 64 пикселя в видимом спектральном диапазоне, натуральные цвета). Обучающая и тестовая выборки разделены в соотношении 10:90, чтобы смоделировать ситуацию нехватки данных.

– Уровни $L1$, $L2$, $L3$. Фрагменты открытых спутниковых снимков в видимом спектральном диапазоне, полученных автоматически от поставщика онлайн-карт MapBox через прикладной программный интерфейс (API) в масштабе 8, 12 и 14 соответственно.

Первоначальная аугментация набора данных привела к тому, что каждый классифицированный полигон стал представлен четырьмя разномасштабными изображениями местности.

Эксперимент проводился на оборудовании со следующими ключевыми характеристиками: центральный процессор – Skylake X (14-ядерный, 3,30 ГГц Intel Core i9-9940X); оперативное запоминающее устройство – 3 000 МГц DDR4 32 ГБ; графический процессор – Nvidia Titan RTX на базе архитектуры Turing (576 тензорных ядер, 24 ГБ GDDR6). Программный код, реализующий модель GeoSystemNet и возможность проведения экспериментов и сравнительного анализа, написан на языке Python с привлечением фреймворка TensorFlow и библиотеки Keras.

Модуль выделения иерархических признаков Unit L_x реализован на двух уровнях. Эксперименты доказывают, что оптимальное значение числа выходных фильтров в свертках для этих уровней должны быть равны 64 и 128 (уменьшение этих значений приводило к снижению точности, а их увеличение – к нестабильности процесса обучения на ранних эпохах и к увеличению ресурсоемкости). Сверточные фильтры имеют квадратную форму со стороной 3, окно субдескритизации – 2.

Модуль объединения признаков первого уровня Merge H_N имеет слой, выполняющий операцию разделимой по глубине двумерной свертки с количеством выходных фильтров, равным 128, второго уровня – 256. Фильтры свертки имеют квадратную форму со стороной 3. Многослойный персептрон, предназначенный для классификации геосистем по иерархическим признакам, имеет слои емкостью 128, 64 и 10 элементов. Коэффициент прореживания был экспериментально подобран равным 0,4. Глубокая модель обучалась в течение 50 эпох. Сравнительные значения точности предлагаемой модели GeoSystemNet и современных моделей глубокого обучения (GoogleNet, DenseNet121, InceptionV3, ResNet50, ResNet101, VGG16) приведены в таблице 3.3.

Предложенная модель демонстрирует наилучший результат при анализе данных при разделении набора данных на тестовую и обучающую выборки в соотношении 40 % и ниже, а относительная эффективность улучшается при уменьшении обучающей выборки до 10 % (86,23 % против 79,77 % для второго результата, показанного моделью ResNet101). По мере роста обучающих данных GeoSystemNet уступает модели ResNet-50, но этот разрыв находится в пределах 3 %.

Модель GeoSystemNet показала такие результаты благодаря анализу набора данных EuroSAT, расширенного посредством геосистемного подхода (в то время как другие модели обучались и анализировали исходный набор данных EuroSAT). Разница в условиях эксперимента нивелировалась дешевизной и быстротой полностью автоматизированного процесса аугментации обучающей выборки, а также меньшей емкостью модели GeoSystemNet – 1,3 млн нейронов против 138 млн у VGG16. Таким образом, преимущества глубокого обучения модели в условиях дефицита данных были получены за счет: а) малозатратной автоматизированной аугментации набора данных на основе геосистемного подхода и б) создания эффективной глубинной модели для ее анализа.

Представляет интерес анализ процесса обучения GeoSystemNet. Поскольку обучение нейронной сети является вероятностным процессом, была проведена серия экспериментов, в результате которых построена зависимость математического ожидания E точности классификации данных от эпох обучения. Результаты эксперимента в условиях дефицита обучающих данных (разбиение произведено в соотношении 10:90) представлены на рисунке 3.7.

Модель GeoSystemNet демонстрирует низкую точность классификации расширенного набора на ранних этапах процесса обучения, которая начинает расти практически с нулевого значения. Легкая двухслойная сверточная сеть и другие глубокие модели достигают точности более 40 % с первой эпохи. Тем не менее GeoSystemNet опережает другие модели после 10-й эпохи обучения, достигая точности 86 %. Существенным является низкое стандартное отклонение от математического ожидания зависимости, типичное для GeoSystemNet при обучении на небольшом наборе данных. Это указывает на более высокую устойчивость

процесса обучения глубокой модели и высокую возможность правильного обобщения информации об анализируемых признаках.

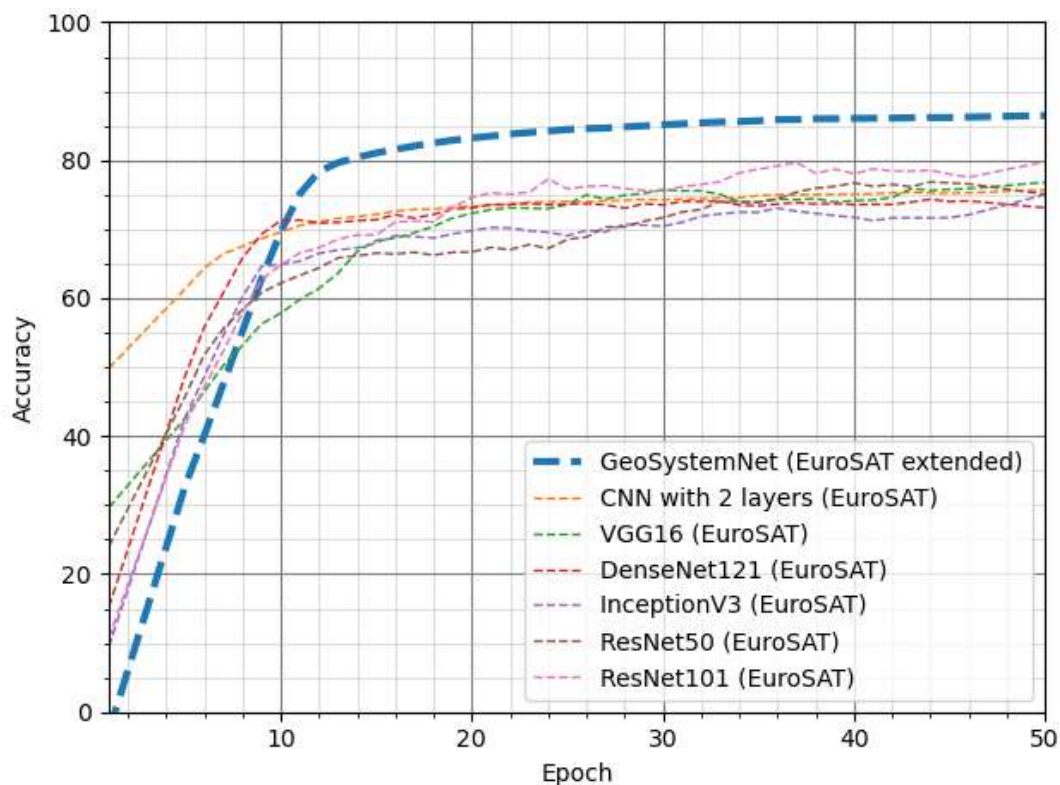


Рисунок 3.7 – Зависимость математического ожидания точности классификации тестового (90 % от общего) набора данных от числа эпох обучения

Информативные относительные метрики рассчитывались на основе абсолютных показателей процесса классификации: TP_{class} – количество попаданий (правильно обнаруженных объектов класса), FP_{class} – ошибка I рода или ложное срабатывание (показывает, сколько раз объекты были неправильно классифицированы как принадлежащие к классу), FN_{class} – ошибка или промах II рода (показывает, сколько раз объекты класса были классифицированы неправильно). Они послужили основой для определения таких относительных показателей, как точность ($precision_{class}$), полнота ($recall_{class}$), оценка (F_1_{class}) и Fbeta Score ($F_{\beta_{class}}$) для каждого класса земной поверхности согласно следующим уравнениям:

$$\left\{ \begin{array}{l} precision_{class} = \frac{TP_{class}}{TP_{class} + FP_{class}}, \\ recall_{class} = \frac{TP_{class}}{TP_{class} + FN_{class}}, \\ F_1_{class} = \frac{precision_{class} \cdot recall_{class}}{precision_{class} + recall_{class}}, \\ F_{\beta}_{class} = (1 + \beta^2) \frac{precision_{class} \cdot recall_{class}}{\beta^2 \cdot precision_{class} + recall_{class}}. \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Результирующие значения показателей эффективности приведены в таблице 3.3. Видно, что модель GeoSystemNet, обученная в условиях дефицита исходных данных, во многих случаях показывала лучший результат вплоть до увеличения показателей эффективности более чем на 30 %. Отметим и слабые стороны модели – более низкие показатели эффективности, зафиксированные в детектировании лесных и техногенных территорий (отстает от лучшего результата не более чем на 5 %).

На рисунке 3.8 представлена матрица ошибок моделей GeoSystemNet в рамках проведенного эксперимента в условиях дефицита обучающей выборки. Величины элементов главной диагонали свидетельствуют, что показатели метрики «истинно положительное» для модели GeoSystemNet принимают относительно низкие значения только для классов Industrial (вода) и Water (вода). Это связано с тем, что учет изображений вмещающих геосистем в процессе классификации неизбежно приводит к увеличению объема анализируемых данных, для анализа которых может потребоваться более высокая емкость модели.

Кроме того, в некоторых случаях дополнительные изображения могут дезинформировать глубокую модель: с точки зрения алгоритма, безусловно, проще классифицировать единственное однородное изображение водной поверхности, чем изображение, дополненное несколькими фрагментами меньшего масштаба, включающими прибрежные районы.

Таблица 3.3 – Показатели классификации (%) различных моделей, обученных в условиях дефицита данных

Метрика	Модель	Класс территории									
		Кустар-ники	Леса	Трава	Шоссе	Промыш-ленность	Пастбища	Многолетняя раститель-ность	За-стройка	Реки	Водоемы
Точ-ность	Shallow CNN	85,40	90,28	54,99	68,02	82,63	73,04	67,45	90,46	67,15	93,36
	GoogleNet	85,90	81,17	57,22	56,15	91,03	81,75	69,50	83,93	57,12	96,91
	DenseNet121	71,12	75,39	52,39	51,54	94,52	63,11	57,23	79,74	78,34	91,82
	InceptionV3	86,80	80,27	56,32	57,15	91,03	82,71	68,51	84,96	56,18	97,90
	ResNet50	82,87	92,79	67,11	53,29	71,54	81,98	65,25	85,88	67,51	93,41
	ResNet101	83,61	91,62	72,54	57,70	73,07	61,95	59,18	87,08	53,55	92,04
	VGG16	79,03	80,69	50,27	66,38	86,64	58,16	58,03	93,77	66,82	89,74
	GeoSystemNet	93,30	90,40	89,29	70,38	91,74	89,85	84,47	92,52	67,30	98,32
Полнота	Shallow CNN	83,41	93,44	65,90	50,50	91,24	68,78	63,26	96,03	65,73	90,06
	GoogleNet	76,45	98,03	71,80	46,21	70,04	55,20	55,68	95,06	79,91	82,41
	DenseNet121	85,67	92,40	64,38	53,81	40,39	74,97	53,33	95,66	53,88	7218
	InceptionV3	77,58	97,54	72,94	44,00	71,30	56,84	56,76	96,47	78,79	83,40
	ResNet50	83,01	90,01	48,88	62,61	93,34	60,27	73,63	84,03	66,21	94,07
	ResNet101	81,32	93,88	45,90	53,24	86,07	68,28	44,73	94,62	59,21	15,18
	VGG16	80,45	92,33	56,33	49,97	83,01	63,84	54,09	92,16	66,91	86,66
	GeoSystemNet	89,21	98,18	85,44	58,05	90,59	84,29	87,84	94,82	83,43	92,62
F1-оценка	Shallow CNN	84,39	91,84	59,95	57,97	86,72	70,85	65,29	93,16	66,43	91,68
	GoogleNet	80,39	89,25	62,52	48,69	82,71	66,35	64,18	92,01	64,34	89,41
	DenseNet121	77,72	83,03	57,77	52,65	57,29	68,53	55,21	86,98	63,85	80,82
	InceptionV3	81,93	88,07	63,56	49,72	79,97	67,38	62,08	90,35	65,59	90,07
	ResNet50	82,94	91,38	56,56	57,58	81,00	69,47	69,19	84,94	66,85	93,74
	ResNet101	79,42	63,19	58,18	44,15	79,04	74,27	50,95	88,95	56,24	76,06
	VGG16	79,73	86,12	53,12	57,02	84,78	60,87	55,99	92,96	66,87	88,18
	GeoSystemNet	91,21	94,13	87,32	63,62	91,16	86,98	86,12	93,65	74,50	95,38
Fbeta-оценка ($\beta=0,5$)	Shallow CNN	84,99	90,90	56,87	63,61	84,22	72,15	66,57	91,52	66,86	92,68
	GoogleNet	84,18	82,38	61,97	53,01	87,31	74,01	67,37	86,93	61,54	95,50
	DenseNet121	73,62	78,27	54,42	51,98	76,50	65,18	56,40	82,48	71,82	87,08
	InceptionV3	84,78	83,22	59,01	53,93	86,26	75,81	65,79	87,03	59,60	94,61
	ResNet50	82,90	92,22	62,45	54,93	75,04	76,47	66,77	85,50	67,24	93,54
	ResNet101	86,32	90,82	63,34	40,04	75,34	78,63	55,59	80,04	54,59	45,74
	VGG16	79,31	82,78	51,37	62,29	85,89	59,21	57,20	92,44	66,84	89,11
	GeoSystemNet	92,45	91,86	88,49	67,51	91,51	88,68	85,12	92,97	70,01	97,12

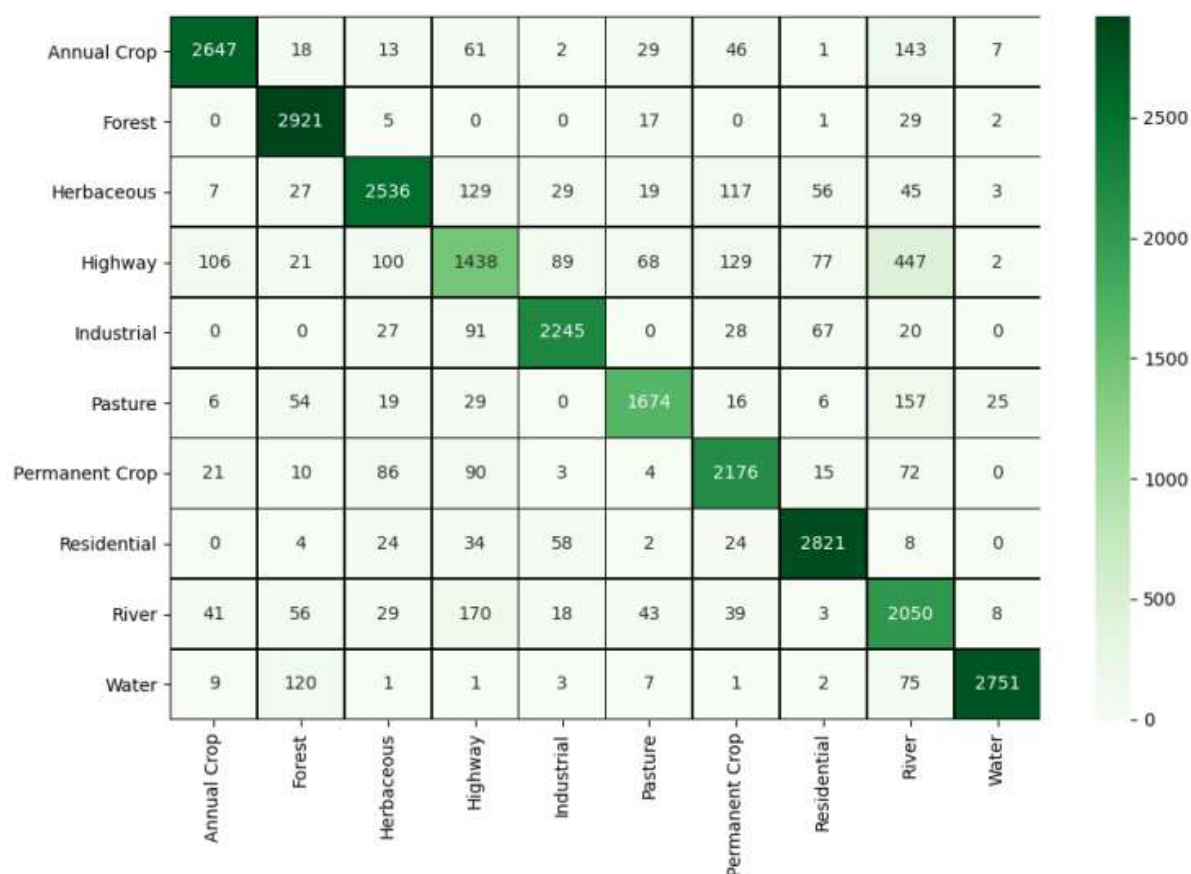


Рисунок 3.8 – Матрица ошибок для GeoSystemNet, обученная в условиях нехватки данных (диапазон разделения 10 : 90 для обучающих и тестовых данных) на наборе данных EuroSAT, расширенном в соответствии с геосистемным подходом

Диаграммы рассеивания (рисунок 3.9) позволяют провести сравнительную оценку эффективности рассмотренных моделей. На представленном изображении чем больше радиус каждой точки, тем больше количество нейронов в соответствующей модели. Первая диаграмма описывает результаты эксперимента в условиях обучения моделей на 10 % размеченных данных, вторая — на 90 %. Видно, что в условиях дефицита обучающих данных модель GeoSystemNet показала максимальную точность, при этом время, затраченное на ее обучение, было меньше, чем у других моделей (за исключением неглубокой сверточной сети (shallow CNN), которая показала относительно низкую точность).

В условиях достаточного количества размеченных данных модель GeoSystemNet уступает известным глубоким моделям по показателям точности до

3 %, однако модель быстрее обучается и характеризуется меньшим количеством нейронов.

Увеличение скорости обучения и меньший размер с небольшой потерей точности классификации данных являются преимуществом, которое имеет значение в условиях высокой стоимости графических процессоров.

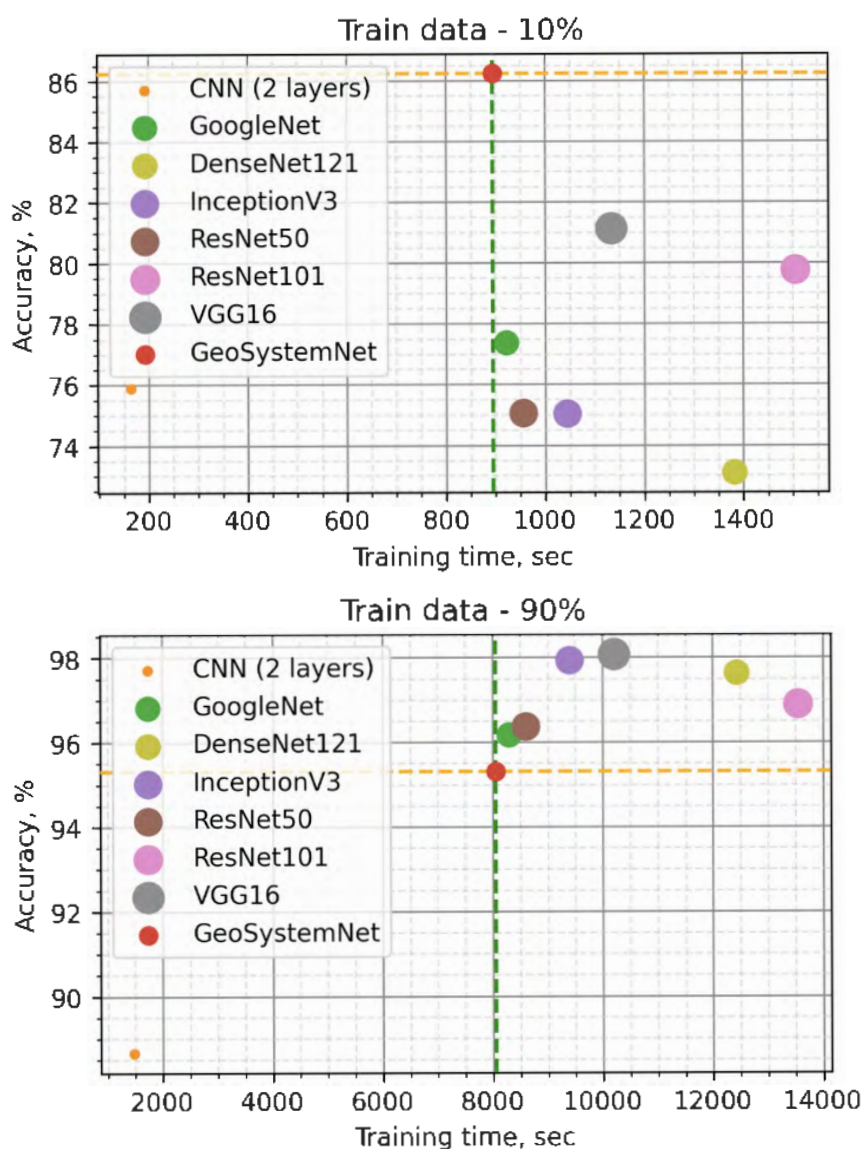


Рисунок 3.9 – Диаграмма рассеивания, отображающая характеристики точности и времени обучения сравниваемых моделей в условиях разных объемов обучающих данных

Применение геосистемного подхода по методике, предложенной в данной главе диссертации, не является абсолютным решением проблемы повышения эффективности классификации данных ДЗЗ в условиях дефицита информации.

Каждая конкретная задача анализа геопространственных данных требует индивидуального подхода к выбору модели данных и организации процесса ее обучения.

Одним из преимуществ модели GeoSystemNet является большое количество степеней свободы, обеспечивающее гибкую настройку при решении поставленных задач. Переменные параметры модели включают: 1) количество входных данных модели, 2) количество уровней выделения признаков с помощью Unit Lx; 3) емкость и количество модулей слияния признаков Merge H_N; 4) гиперпараметры многослойного персептрона, который дает результат решение.

Наконец, процесс выбора источников информации о вмещающих геосистемах имеет множество вариантов: это могут быть как данные дистанционного зондирования разного масштаба и разрешения, так и фрагменты цифровых карт разного типа. Необходимо осознавать ответственность при отборе данных по вмещающим геосистемам – неверное решение приведет к ситуации, когда расширенная обучающая выборка скорее дезинформирует модель классификации GeoSystemNet, чем повысит ее эффективность.

Методика увеличения эффективности методов анализа данных ДЗЗ средствами глубокого машинного обучения с применением геосистемного подхода была представлена в научном журнале первого квартиля реферативной базы данных Scopus [183] и вызвала интерес в научном сообществе. В статье [191], опубликованной в научном издании «Artificial Intelligence Review» (Scopus, Q1) и направленной на всесторонний анализ последних тенденций в области расширения наборов цифровых изображений для решения задач обучения глубоких моделей, отмечена роль предложенной методики в решении задачи классификации растительного покрова на базе данных дистанционного зондирования с использованием изображений разного масштаба. В статье [171], опубликованной в научном издании «Journal of Civil Structural Health Monitoring» (Scopus, Q1), проведенное исследование рассматривается как пример прогресса в разработке алгоритмов глубокого обучения, используемых в анализе данных ДЗЗ. Аналогичная оценка дана в научной публикации [242] в журнале «Optik» (Scopus, Q2).

В научной публикации [223], вышедшей в журнале «Remote Sensing» (Scopus, Q1) полученные результаты рассматриваются в качестве решения проблемы классификации изображений дистанционного зондирования высокого разрешения с использованием методов глубокого обучения в условиях дефицита помеченных данных. В частности, отмечено, что модель GeoSystemNet решает проблему классификации на основе анализа генетического единообразия пространственно соседних объектов разного масштаба и иерархического уровня.

3.3 Пространственное прогнозирование чрезвычайных процессов в организационных системах на основе геосистемного подхода

Актуальность оценки устойчивости геологической среды и прогнозирования экзогеодинамических процессов определяется возрастающим числом возникновения сложных природно-техногенных чрезвычайных ситуаций. Решение задачи по минимизации последствий эколого-социально-экономических проблем может быть достигнуто путем внедрения в науку и практику региональных географических информационных систем, обеспечивающих сбор, обработку, систематизацию, прогнозирование и своевременное представление данных о состоянии геотехнических систем для принятия конкретных управленческих решений [218]. Такая постановка проблемы предполагает решение следующих задач [96]: 1) разработка методики ГИС-картографирования условий возникновения и развития процессов; 2) разработка алгоритмов геоинформационного анализа и синтеза данных по объектно-структурному строению литогенной основы геосистем; 3) выявление пространственно-временных закономерностей проявления процессов; 4) обоснование схемы геоэкологического зонирования региона по вероятности возникновения чрезвычайных природно-техногенных ситуаций.

Прогнозирование экзогеодинамических процессов (ЭГП) выполняется на основе предположения о том, что природно-техногенные чрезвычайные ситуации с высокой вероятностью могут произойти в тех же условиях, в которых они проявлялись в прошлом [158].

Процесс сбора и подготовки данных должен опираться на данные ДЗЗ, а также документальные материалы цифровых инфраструктур пространственных данных. К факторам, отражающим развитие ЭГП, следует отнести морфометрические (уклон, высота, кривизна профиля) и морфологические характеристики рельефа, тектонику, геологию и гидрогеологию, климат и гидрологический режим поверхностных вод, тип почвенного и растительного покрова, землепользование, геотехнические системы и плотность этих объектов [98]. После ревизии исходная информация должна быть подготовлена для формирования нормализованных наборов данных, пригодных для обучения и тестирования алгоритмов машинного обучения, построения и проверки моделей.

Систематизация данных. Учитывая многофакторность происхождения ЭГП, геодиагностика их индикации решается путем разработки синтетической карты геосистем. Результаты проектирования ГИС «Мордовия» показали, что в исследовании закономерностей развития ЭГП перспективно использование таксонов геосистем, предложенных В. А. Николаевым, – система, класс, группа, тип, род и вид (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Таксоны геосистем

№ п/п	Таксон	Геосистемные процессы, индикаторы экзогеодинамических процессов
1	Система	Макроклимат (арктический, субарктический, бореальный и др.) определяет особенности развития климатогенных и геоэкологических процессов
2	Класс	Тектоника и отличающиеся по возрасту и динамике развития макроформы рельефа, определяющие типы и интенсивность развития экзогеодинамических процессов
3	Группа	Тип водного и водно-геохимического режима
4	Тип	Развитие почвообразовательных и биологических процессов, распространение типов почв и классов растительных формаций
5	Род	Морфоскульптурные формы рельефа и развития экзогеодинамических процессов (эрозионных, карстовых, суффозионных, оползневых и т. д.)
6	Вид	Факторально-динамическая структура местопроизрастаний растительности на топологическом уровне

Иерархическое структурирование и анализ геосистем ориентированы на выделение литогидрогенных геосистем – генетически однородных, территориально смежных образований, обособливающих под действием определенного режима поверхностных и подземных водных потоков, обуславливающих развитие

определенного спектра экзогеодинамических, почвообразовательных и биогенных процессов. Диагностика литогидрогенных геосистем основывается на системном анализе грунтовых и межпластовых вод междуречных пространств с учетом комплекса дешифровочных признаков стратиграфо-генетических водопроводящих горизонтов и их частей, локализации водопроявлений, элементов гидрографической сети разных порядков. Структура литогидрогенных систем формирует пространственные взаиморасположения и взаимосвязи потоков подземных вод – областей питания, транзита и разгрузки.

Исследуемый тестовый полигон «Мордовия» расположен в геосистемах пластово-ярусной Приволжской возвышенности. Лесостепные геосистемы контрастно переходят в лесную провинцию водно-ледниковых равнин пластовой Окско-Донской низменности. Территория ограничена следующими координатами: 42,16" в.д., 46,78" в.д. с запада и востока и 53,62" с.ш., 55,21" с.ш. с юга и севера.

В качестве основных источников информации использовались многозональные космические снимки и крупномасштабные топографические карты. Пространственная база данных оползневых процессов включила характеристики 1 370 оползней. Каждому из них в атрибутивной таблице присвоено значение ширины, длины, глубины, экспозиции и абсолютной отметки. База данных по водопроявлениям включила информацию по 3 315 истокам, 2 808 родникам, 865 мочажинам.

Систематизация данных для установления пространственных закономерностей проявления процессов проводилась с использованием цифровой модели рельефа, синтетической карты геосистем и тематических карт природных компонентов.

Для повышения точности детектирования оползневых процессов на тестовом полигоне «Мордовия» использованы методы, предложенная в данной главе диссертации.

Основными источниками информации для анализа стали многозональные космические снимки, цифровые модели рельефа и синтетические ландшафтные карты. Геосистемная модель данных при этом принимает следующий вид.

– Уровень L0. Данные, полученные со спутника Sentinel-2 и представленные в виде фрагмента 32x32 пикселей в трех спектральных каналах – 2 (синий), 4 (красный), 12 (коротковолновый инфракрасный диапазон). За основу были взяты весенние (апрель – май) снимки полигона, так как они наиболее ярко демонстрируют проявление оползневых процессов.

– Уровень L1. Фрагменты спутниковых снимков в видимом спектральном диапазоне размером 32 на 32 пикселей, полученные алгоритмически через MapBox API в 14-м масштабе тайлового представления 8.

– Уровень LS. Фрагменты цифровой ландшафтной карты ГИС «Мордовии», соответствующие квадратным участкам со стороной 1 км и дискретизированные на участки 32 на 32 пикселей.

– Уровень LE. Фрагменты нормализованной карты высот, построенной на основе Google Elevation API и имеющей форму квадрата 32 на 32 пикселей с разрешением 10 м. на пиксель.

На рисунке 3.10 представлена цифровая ландшафтная карта, построенная на основе ГИС «Мордовия». Геосистемы, представленные на карте и выделенные в процессе ландшафтного картографирования, характеризуются общим происхождением и развитием, единообразием взаимодействия поверхностных отложений, форм рельефа, водного и геохимического режимов и, как следствие, сходством морфологического строения земной поверхности, почвенного профиля, водно-воздушного и теплового режима почв [60]. Основными картографическими объектами являются урочища и географические местности, объединенные в ландшафты и систематизированные в типологические комплексы – классы, группы, типы, роды и виды. На ландшафтной карте Мордовии выделены 24 ландшафта, их структуру образуют 19 типов местностей, разделенных на 43 вида урочищ.

Автоматизированный анализ направлен на решение задачи бинарной классификации для выявления того, является ли территория оползнем. Исходные данные уровня L0 были экспертно размечены по материалам спутниковой съемки Sentinel-2, а затем алгоритмически расширены данными уровней L1, LS, LE.

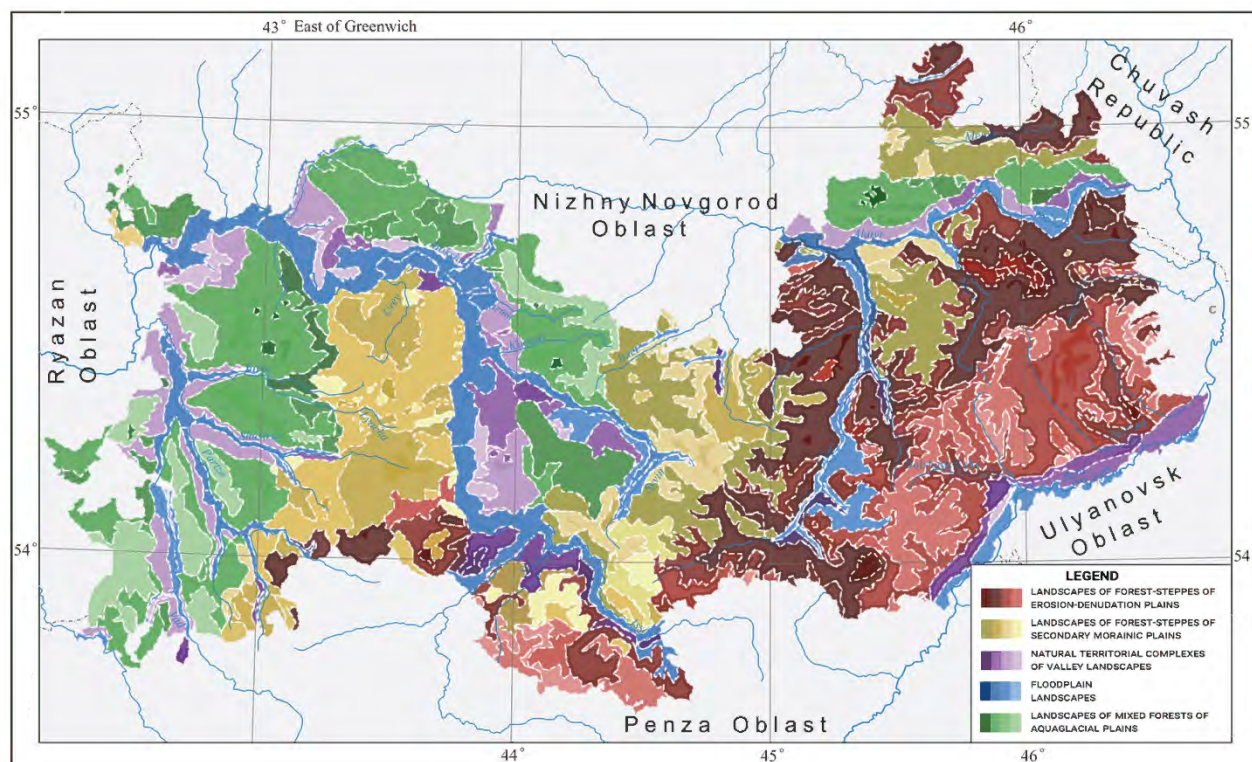


Рисунок 3.10 – Ландшафтная карта тестового полигона «Мордовия»

На рисунке 3.11 представлены ROC-кривые, отражающие корреляцию между чувствительностью и специфичностью при изменении порога решающего правила для предложенной модели GeoSystemNet, обученной на описанной выше геосистемной модели данных, а также для ResNet50, InceptionV3 и Shallow CNN, обученных на материалах космической съемки Sentinel-2. Применение геосистемного подхода к задаче выявления земель, характеризующихся развитием оползневых процессов, с использованием технологий глубокого обучения позволило повысить точность классификации на 5 %.

Результаты классификации позволяют построить карту развития оползневых процессов в Республике Мордовия (рисунок 3.12). Всего было обнаружено 1 370 оползней. По совокупности признаков на основе экспертного анализа выделены следующие типы: глыбовые, селевые, обвалы, вязкопластические, обвальные оползни. Результаты картографирования показали, что наименее подвержены оползнеобразованию возвышенные (выше 245 м) останцово-водораздельные массивы осевой части Приволжской возвышенности, где оползни встречаются единично.

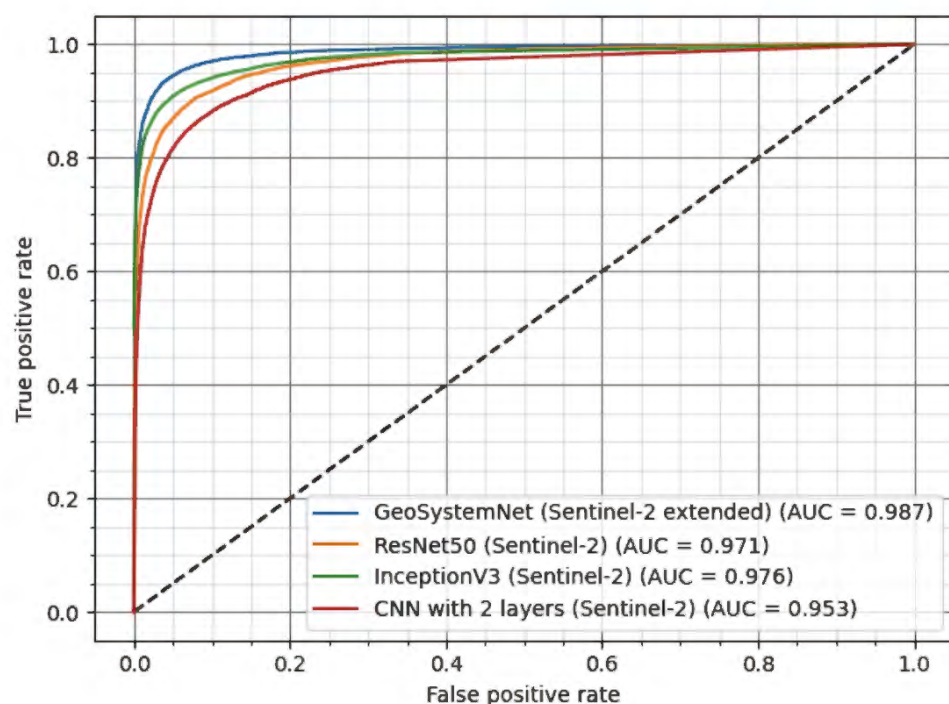


Рисунок 3.11 – ROC-кривые используемых алгоритмов выделения площадей с развитием оползневых процессов

Преобладающая часть оползневых геосистем располагается в высотном интервале от 120 до 250 м с максимальной концентрацией на абсолютных отметках 141–210 м.

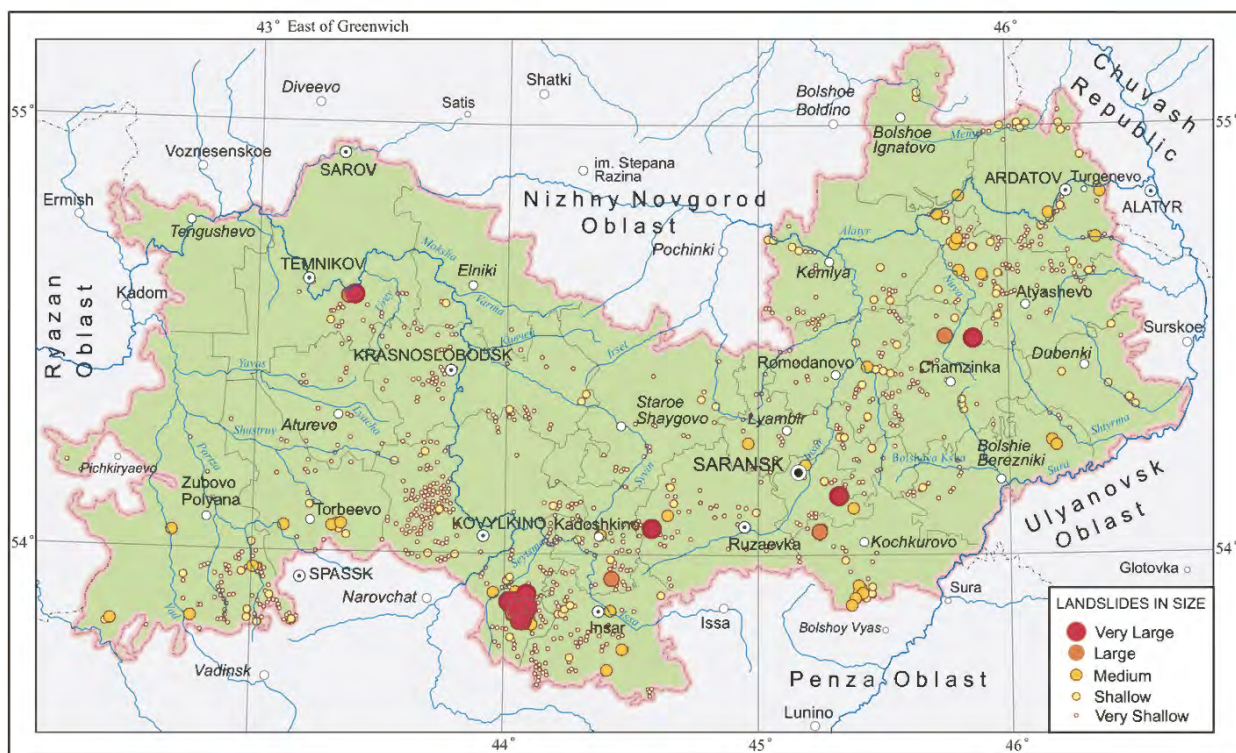


Рисунок 3.12 – Синтетическая карта оползневых процессов

Следует обратить внимание на то, что аналогичную закономерность имеет распространение родников. Возвышенные участки (более 250 м) отличаются малым родниковым стоком (рисунок 3.13).

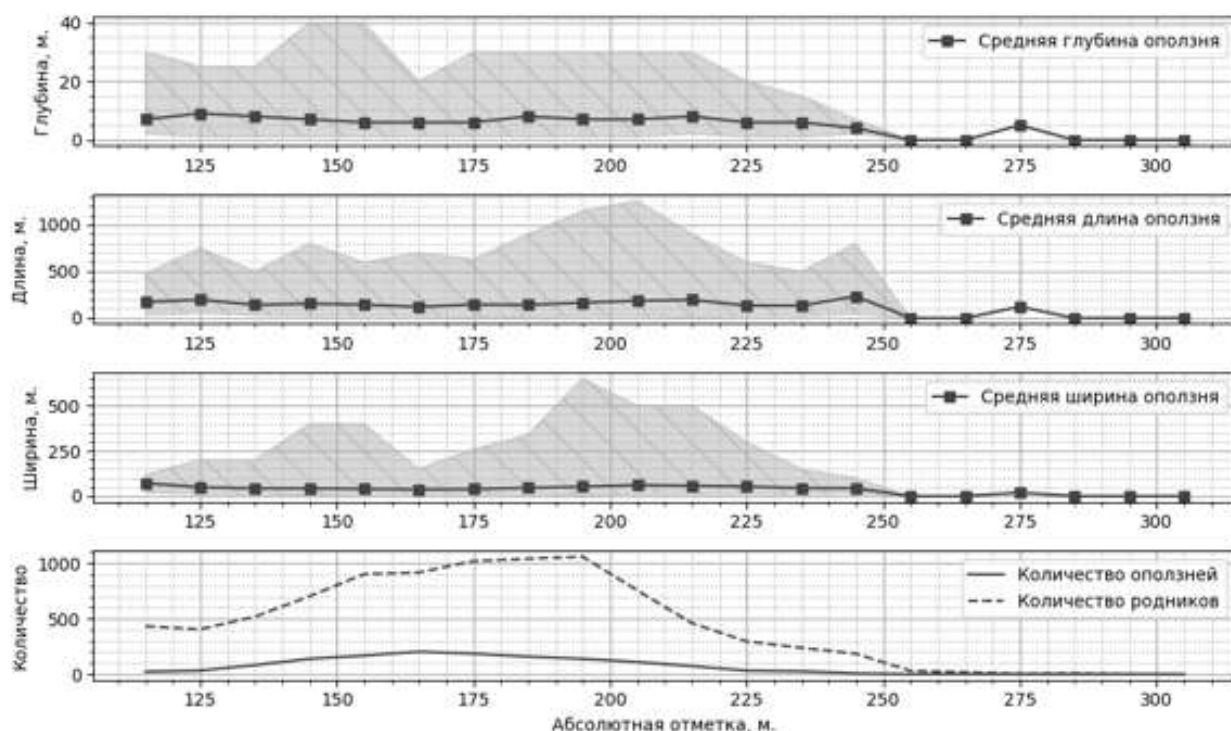


Рисунок 3.13 – Общие закономерности развития оползневых процессов

Из морфоструктурных элементов на многозональных космических снимках наиболее отчетливо выделяются линеаменты. Для выявления закономерностей природной дифференциации по результатам дешифрирования линеаментов составляется карта их густоты с последующим сравнением со структурно-тектонической картой, изготавливаемой на основе интерпретации геофизических данных. На исследуемом полигоне значительная активность ЭГП характерна для областей преобладания ортогональных систем линеаментов (рисунок 3.14). Преобладание коротких штрихов на космическом снимке может свидетельствовать о том, что данная область является потенциальной для активного развития процессов. Важно отметить общие закономерности распространения оползневых процессов – приуроченность к склонам юго-западных, южных и юго-восточных экспозиций и коренным бортам долин рек, которые формируют зоны разгрузки межпластовых вод.



Рисунок 3.14 – Линеаменты на карте оползневых процессов

Сопреженный анализ цифровых карт и материалов космической съемки позволяет оптимизировать оперативную диагностику развития экзогеодинамических процессов. Автоматизацию данного процесса и повышение его эффективности целесообразно проводить посредством формирования глубокой нейронной сети для анализа геосистемной модели территории. Синтетическое картографирование иерархической организации геосистем оптимизирует диагностику взаимодействий зональных и а зональных факторов, влияющих на развитие экзогеодинамических процессов.

Задача оценки устойчивости территории к затоплению в период весеннего паводка были поставлены и последовательно проработаны в ходе реализации следующих этапов: ревизия и сбор данных, предварительная их подготовка, разработка глубокой нейросетевой модели, проведение анализа и оценка точности сформированной модели, создание иерархической модели результирующего растра с целью визуализации результатов в рамках адаптивных веб-интерфейсов. Исследование проведено на основе гипотезы о том, что задача прогнозирования территории

затопления в период весеннего половодья может быть эффективно решена при обработке 3 опорных точек:

1) при условии составления информативной геосистемной модели территории (на базе данных ДЗЗ, климатических и метеоданных, сведений о солнечной активности и вечной мерзлоте и др.);

2) при разработке глубокой нейросетевой модели для анализа данных о геосистемной модели территории;

3) при внедрении геопортальных систем для визуализации результатов машинного анализа с целью обеспечения информационной поддержки принятия взвешенных управленческих решений в области организации устойчивого развития территорий и прогнозирования стихийных процессов.

Анализ проблемной области показал, что для эффективного прогнозирования восприимчивости территории к затоплению в северных широтах целесообразно формирование геоинформационной модели на основе следующих слоев данных: цифровая модель рельефа, данные об условиях вечной мерзлоты и грунтового льда, данные дистанционного зондирования Земли, метеорологические и климатические наблюдения (таблица 3.5).

Были собраны данные об исследуемом тестовом полигоне за три года наблюдений. Данные космической съемки Sentinel-2 взяты в даты максимального разлива рек: 25 мая 2020 г., 31 мая 2019 г., 5 июня 2018 г. Также взята съемка территории во время межени (21 августа 2019 г.). Вследствие того что исследуемый тестовый полигон находится в северных широтах, были собраны данные National Snow and Ice Data Center об условиях вечной мерзлоты и грунтового льда. В качестве цифровой модели рельефа выбраны данные ASTER Global Digital Elevation Map.

Так как эти данные не характеризуются достаточным пространственным разрешением, они были детализированы посредством бигармонической сплайн-интерполяции, при которой неизвестные точки поверхности восстанавливаются по формуле

$$s(x) = \sum_{j=1}^N \omega_j g(x, x_j), \quad (3.5)$$

где $g(x_i, x_j)$ – функция Грина, которую можно рассчитать по формуле

$$g(x_i, x_j) = |x_i - x_j|^2 (\ln|x_i - x_j| - 1). \quad (3.6)$$

Параметр N указывает на число точек, используемых для интерполяции, наконец, были собраны ретроспективные данные о метеоусловиях (температуре и осадках) исследуемого полигона с временным разрешением, равным одной неделе.

Таблица 3.5 – Ревизия данных

ID	Данные	Источник данных	Роль данных
1	2	3	4
E1	Цифровая модель рельефа	ASTER Global Digital Elevation Map	Источник информации о рельефе местности – главная геоморфометрическая составляющая. Формирование модели поверхности
E2		USGS.gov (Геологическая служба США)	
E3		Данные Росрееста; топографические карты (интерполированная растровая модель)	
G1	Данные об условиях вечной мерзлоты и грунтового льда	Данные National Snow and Ice Data Center	Выявление закономерностей между условиями вечной мерзлоты и потенциалом к затоплению территории
R1	Данные ДЗЗ	Геологическая служба США	Проверка результатов моделирования на основе ретроспективных реальных данных
R2		Copernicus Open Hub	
M1	Метеорологические и климатические данные	Данные Росгидромета, открытые интернет-порталы	Выявление зависимостей между накоплением осадков и снежным покровом, изменением солнечной активности, климатическими трансформациями и потенциалом территории к затоплению

Для эффективного решения обозначенной задачи необходимо было собрать данные об исследуемом тестовом полигоне за несколько лет наблюдений. Рекомендуется применение съемки Sentinel-2 в даты максимального разлива рек и во время межени. Для анализа выбраны каналы красного, зеленого и ближнего

инфракрасного диапазона, наиболее информативные при анализе растительного покрова, внешней видимой части ландшафтной оболочки. Для уточнения модели использованы данные о рельефе территории.

На первый вход модели FloodNET подаются данные об анализируемой точке территории во время межени – ее спектральные характеристики, данные о высоте, содержании грунтового льда. На второй вход подается трехмерная матрица, характеризующая в тех же условиях окрестность со стороной 31 пиксель при пространственном разрешении данных в 20 м на 1 пиксель. Геоинформационная модель вмещающей геосистемы строится на основе представленных выше слоев. Наконец, на третий вход модели подаются временные серии наблюдений о погоде. Все данные перед обучением глубокой нейросетевой модели были нормализованы, всего подготовлено 20 000 обучающих выборок.

Для формирования целевых данных, которые будут использованы при обучении модели FloodNET для прогнозирования восприимчивости территории к затоплению, использована космическая съемка территории в период половодья. Сначала на базе данных Sentinel-2 был рассчитан Normalized Difference Water Index (NDWI) по следующей формуле:

$$NDWI = \frac{\alpha x_{green} - \beta x_{NIR}}{\alpha x_{green} + \beta x_{NIR}} - bias, \quad (3.7)$$

где α , β и $bias$ – калибровочные коэффициенты; x_{green} – отражательная характеристика территории в зеленом спектре; x_{NIR} – в ближнем инфракрасном диапазоне.

Класс территории во время половодья определяется по принципу превышения порогового значения индекса NDWI.

После автоматизированного расчета бинарного целевого коэффициента была проведена ручная экспертная корректировка результата. Перейдем к декомпозиции модели FloodNET. На рисунке 3.15 показаны Feedforward Unit и Compleitive Units, представляющие собой нейронные сети прямого распространения на основе использования полносвязных слоев.

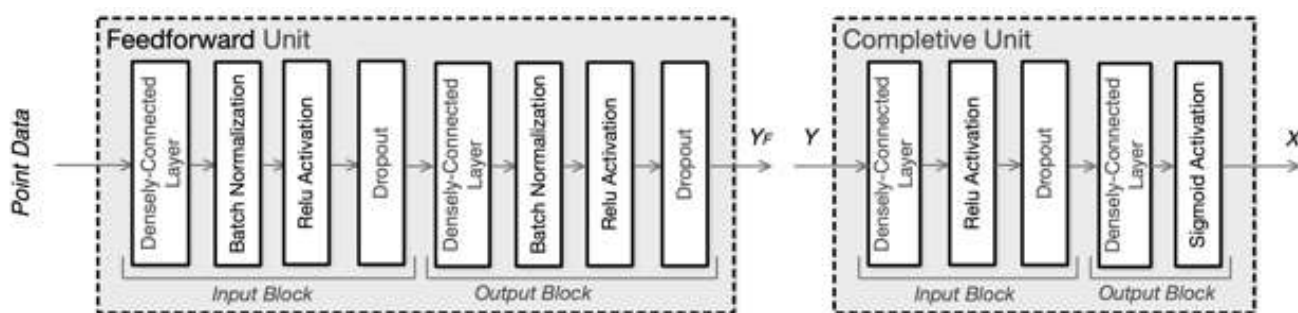


Рисунок 3.15 – Блоки прямого распространения
и модуль принятия решений модели FloodNET

Первый модуль решает задачу анализа данных об исследуемой точке, а второй – выносит результирующее решение после объединения выходов предшествующих модулей. Число полносвязных слоев многослойного персептрона и их мощность выбираются по принципу минимизации данных параметров при сохранении достаточной точности классификации. Кроме этого, для решения проблемы переобучения решено использовать batch normalization и dropout к выходам полносвязного слоя. Для активации выхода входного и hidden слоев выбран rectified linear unit, для выходного слоя – sigmoid при бинарной классификации, решаемой в нашей задаче.

Для выделения признаков из данных об окрестности введен блок Conv Unit, осуществляющий извлечение иерархических признаков различного уровня из анализируемой матрицы (рисунок 3.16). Структура каждого блока представляет собой цепочку слоев. Первый слой, осуществляющий операцию глубокой разделимой свертки, позволяет извлечь признаки из исходного изображения и, в отличие от применения обычного сверточного слоя, сделать глубокую модель более компактной и соответственно устойчивой к переобучению.

Слой batch normalization позволил достичь регулирования и устойчивости модели. Для выполнения активации был выбран rectified linear unit. Завершает блок извлечения характерных черт слой субдескрипции, осуществляющий уменьшение размера получаемых представлений посредством взятия максимума.

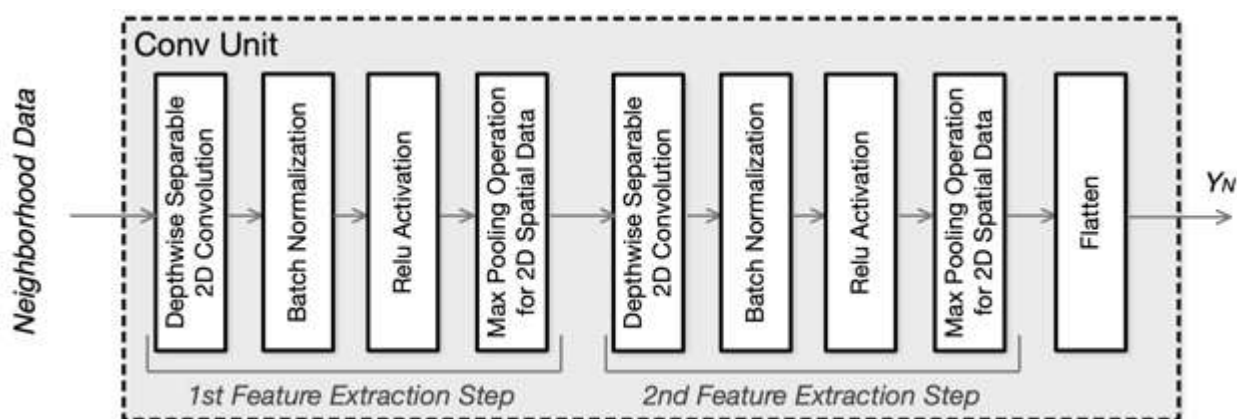


Рисунок 3.16 – Сверточный модуль модели FloodNET

На рисунке 3.17 представлен модуль анализа исторических данных о метеорологических условиях. Он имеет схожую структуру с блоком Conv Unit, однако в нем используется операция одномерной глубинной разделимой свертки, а результирующую обработку проводит полносвязный слой.

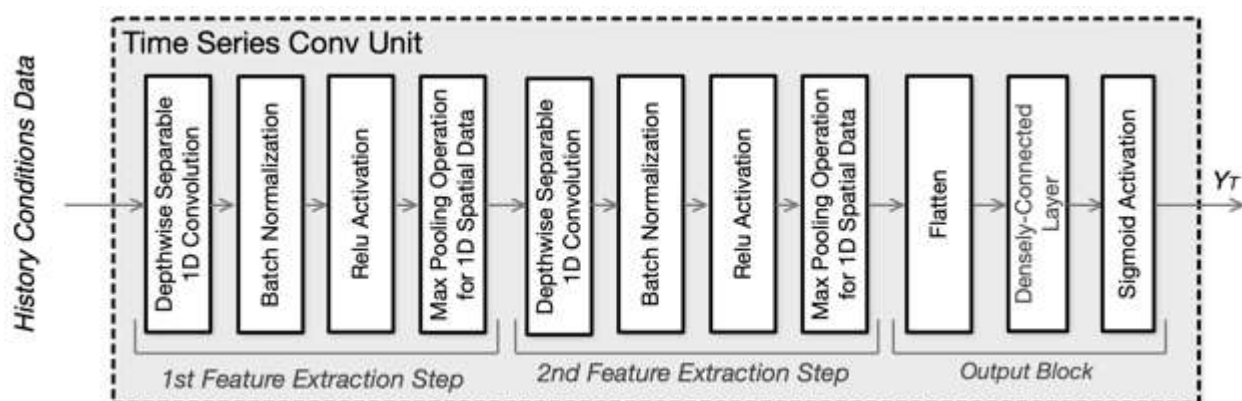


Рисунок 3.17 – Блок анализа временных последовательностей модели FloodNET

Финальное решение о предсказании коэффициента восприимчивости территории к затоплению выносит модуль Compleitive Unit. При обучении модели FloodNET в качестве оптимизатора используется алгоритм Root Mean Square Propagation, основанный на методе стохастического градиентного спуска, а в качестве функции потерь – перекрестная энтропия. С точки зрения черного ящика глубокая модель FloodNET, основанная на применении геосистемного подхода, представляет собой

функциональный элемент, принимающий на вход данные о территории и ее окрестности в период межени и предсказывающий восприимчивость территории к затоплению на основе конкретных исторических метеонаблюдений. Поточечный анализ тестового полигона позволяет построить карту устойчивости территории к затоплению. Спроектированная модель позволила достичь точности в 92 % при решении описанной выше задачи, причем комплексное использование всех слоев, подготовленных ранее, повысило точность на 8 % относительно показателя, достигнутого при использовании только традиционных материалов космической съемки. Гибкая настройка гиперпараметров модели FloodNET обеспечила изначальный прирост точности на 6 %. Основная ценность представленного подхода для прогнозирования восприимчивости территории к затоплению заключается в использовании геосистемного подхода для формирования емкой геосистемной модели территории и разработке глубокой модели FloodNET, способной эти данные эффективно проанализировать. Кроме этого, была решена задача по сбору исторических данных, необходимых для прогнозирования устойчивости территории к затоплению в период весеннего половодья, обеспечивающая возможность осуществления прогноза ее подтопления с целью принятия решений, необходимых для обеспечения безопасности жизни и здоровья населения, а также защиты территорий от затопления.

3.4 Выводы по третьей главе

1. Решение задач управления позитивными и негативными рисками в организационных территориально распределенных системах различного масштаба опирается на данные дистанционного зондирования как важнейший источник информации об организационных системах значительного территориального охвата. Ключевая идея подхода к анализу геопространственных данных с помощью глубокого обучения, представленного в главе, заключается в использовании геосистемного подхода для эффективного расширения обучающего набора данных и разработке глубокой модели GeoSystemNet, способной эффективно эти данные анализировать. Представленный подход приобретает основные преимущества в условиях

дефицита геопространственных обучающих данных при решении задач принятия управленческих решений в организационных системах. Это позволяет приблизиться к точности более глубоких моделей за счет анализа автоматически консолидируемой информации.

2. Одним из достоинств представленной модели GeoSystemNet является большое количество степеней свободы, допускающее ее гибкую настройку в зависимости от решаемой задачи. Переменные параметры модели включают ее входные данные, количество уровней выделения признаков с помощью Unit L_x , мощность и количество модулей слияния признаков Merge H_N и гиперпараметры многослойного персептрона, который принимает результирующее решение.

3. Применение модели GeoSystemNet для классификации наборов пространственных данных, алгоритмически расширенных на основе геосистемного подхода, позволило повысить точность классификации в условиях дефицита обучающих данных на 9 %, и достичь достаточной точности классификации при обучении на большем объеме данных (меньшую на 3 % по сравнению с другими моделями).

4. Совместное использование геосистемного подхода с возможностями глубокого обучения позволяет оптимизировать процесс оперативной диагностики систем землепользования для поддержки принятия решений в процессе управления организационными территориально распределенными системами. Применение геосистемного подхода в соответствии с методами, представленными в третьей главе диссертации, к задаче повышения эффективности классификации данных ДЗЗ в условиях дефицита данных требует индивидуального подхода к настройке модели и организации ее обучения.

5. Задача выбора источника информации о вмещающих геосистемах имеет большое количество решений – это могут быть как данные дистанционного зондирования разного масштаба и разрешения, так и разнотипные фрагменты цифровых карт. Необходимо осознавать ответственность при отборе данных по вмещающим геосистемам – неверно принятое решение приведет к ситуации, когда расширенная обучающая выборка скорее дезинформирует модель GeoSystemNet, чем повысит ее эффективность.

4 ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ И АНСАМБЛЕЙ КЛАССИФИКАТОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ В ПРОЦЕССЕ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

4.1 Методика построения и оптимизации моделей машинного обучения на основе вычисления синтетических территориальных признаков

Модели машинного обучения, применяемые в организационных системах, используемые для решения задачи классификации природных и социальных подсистем, могут иметь различную архитектуру (искусственные нейронные сети, деревья принятия решений, машины опорных векторов) и гиперпараметры. Более того, они способны успешно обучаться на разных наборах данных об управляемой территориальной системе, которые могут быть многомерными и мультимодельными, включая при этом информацию о динамичных спектральных свойствах анализируемого пространственного участка, инвариантных характеристиках геосистем, особенностях и признаках пространственной организации, иную информацию атрибутивного, пространственного и временного характера.

Оптимизационный алгоритм построения модели классификации земель и поиска ее гиперпараметров сформирован и апробирован в ходе выполнения проектных работ и включает следующую последовательность этапов.

Этап L_1 – формирование системы требований к модели: определение входов и выходов, показателей производительности и точности.

Этап L_2 – определение базовой архитектуры модели на основе модульного подхода, описывающего общую организацию классификатора; декомпозиция единицы верхнего уровня на линейные или ветвящиеся структуры.

Этап L_3 – решение проблемы снижения точности классификации и переобучения за счет эвристической конфигурации гиперпараметров глубокой модели и добавления слоев нормализации и регуляризации.

Этап L_4 – оптимизация модели по принципу «меньшее лучше большого», согласно которому процесс обучения больших моделей требует значительных вычислительных ресурсов и, что еще важнее, такие глубокие нейронные сети склонны к переобучению.

Этап L_5 – обучение модели с тестированием различных мер точности, алгоритмов оптимизации, функций потерь и количества эпох обучения; анализ процесса обучения модели путем расчета зависимости математического ожидания и стандартного отклонения точности классификации от эпохи обучения на основе серии экспериментов.

Этап L_6 – оценка качества полученного результата путем построения матриц ошибок и расчета метрик точности и ошибочности по результатам функционирования модели; вывод о соответствии полученной модели объективным и субъективным требованиям к ней.

Предлагаемая цепочка действий C_i приводит к получению экземпляра модели M_i с определенными свойствами, при соответствии которых проектным требованиям поиск может быть завершен. Процесс поиска эффективной модели классификации может быть формализован в виде конечного автомата (рисунок 4.1), начальное состояние S которого предшествует первому этапу алгоритма поиска и соответствует решению задачи постановки задачи исследования.

На каждом этапе на основании эвристик, паттернов, а также автоматизированных алгоритмов формируется пространство гипотез D_{ij} , в рамках которого осуществляется поиск решения по выбору направления детализации и оптимизации модели. Принятие решения P_{ij} обосновывает выбор реализации одной из гипотез, при котором осуществляется переход к узлу дерева N_{ijk} , определяющих вариант состояния модели M_j на i -м этапе алгоритма поиска эффективной модели.

Если свойства спроектированной и обученной модели на определенном этапе i не соответствуют предъявляемым к ней требованиям, необходимо принять решение $P_{B_{ik}}$ о возвращении на несколько этапов назад в рамках алгоритма построения глубокой модели (вплоть до первого этапа, если сформулированные требования

оказались недостижимыми) и осуществить новый поиск в эвристически скорректированном направлении.

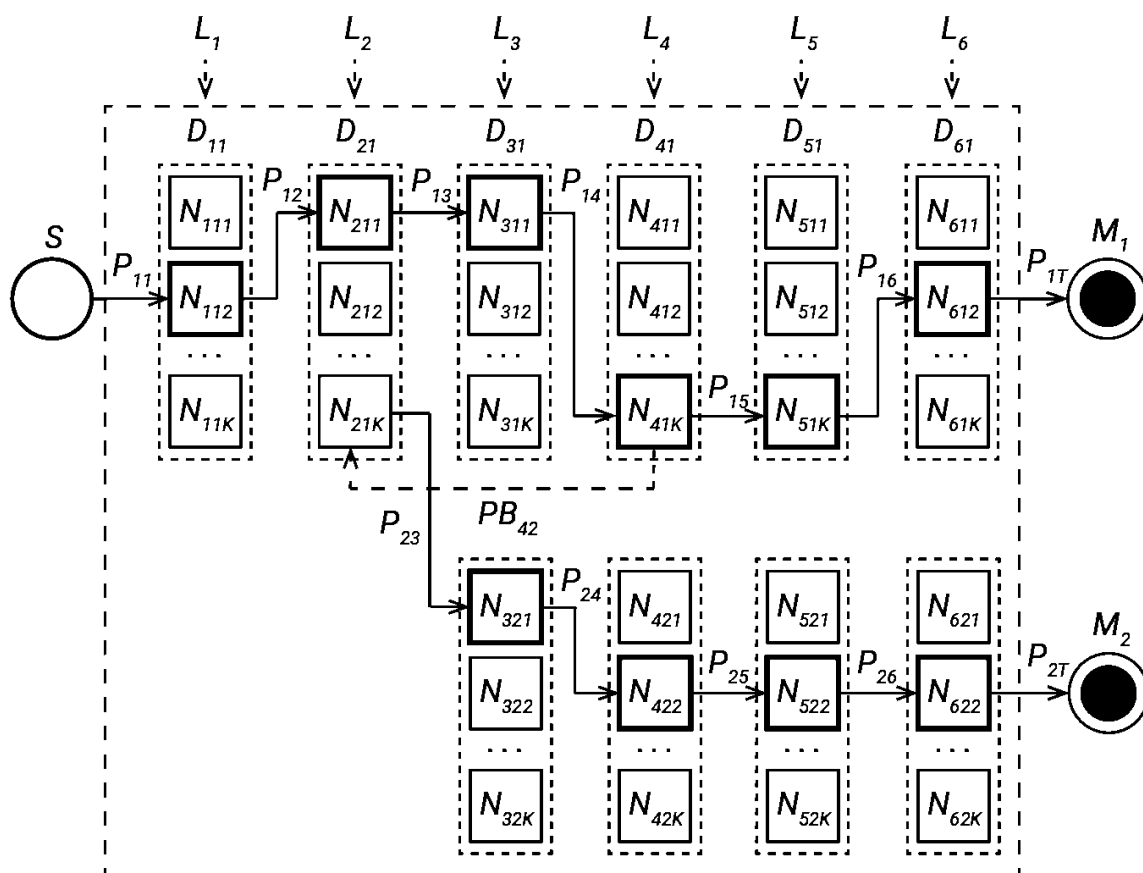


Рисунок 4.1 – Последовательность формирования модели классификатора

Конечные состояния графа соответствуют частному решению задачи поиска оптимальной модели M_i , готовой к использованию. Полученные частные решения могут быть сопоставлены с помощью сплит-тестирования, основанного на сопоставлении объективных численных показателей эффективности модели с субъективной экспертной оценкой качества классификации.

В последние несколько лет значимое место в области анализа пространственных данных занимает концепция глубокого машинного обучения [205]. Многослойные нейросетевые модели, основанные в том числе на сверточных нейросетевых компонентах, показывают его значительную эффективность. Достижение высокой точности интерпретации в данном случае возможно за счет извлечения сложных иерархических признаков и нелинейных зависимостей из пространственно

распределенной информации. Однако использование емких глубоких нейронных сетей связано с рядом препятствий, делающих их внедрение значительно затрудненным. Во-первых, такие модели способны эффективно обучаться лишь на больших наборах размеченных пространственных данных, формирование которых требует серьезных временных и экономических затрат, в том числе значительных объемов полевых исследований и многих часов постобработки. Во-вторых, глубокие нейросетевые модели не являются панацеей с точки зрения выбора инструмента интерпретации пространственных данных: представляя собой черный ящик, они могут быть подвержены проблеме переобучения, плохого обобщения информации и слабой интерпретируемости. Наконец, процесс обучения глубоких сверточных нейросетевых моделей предъявляет высокие требования к аппаратному обеспечению: проведение экспериментальных исследований по тонкой настройке модели может значительно затянуться без использования дорогостоящих графических процессоров [128], которые стали еще более труднодоступными в условиях санкционного давления.

С точки зрения современного состояния исследований следует выделить ряд актуальных и открытых научных проблем в области построения и оптимизации моделей машинного обучения для анализа пространственных данных:

- разработка методологии подготовки данных и построения моделей машинного обучения, защищенных от проблемы переобучения и слабого обобщения, показывающих высокую точность при работе с ограниченными наборами размеченных пространственных данных;

- формирование системы рекомендаций относительно эффективного расширения размеченного набора данных о природных и социальных системах посредством использования автоматизированно консолидируемых вспомогательных данных (в том числе материалов космической съемки, цифровых моделей рельефа, электронных ландшафтных карт), наряду с традиционным использованием серии аффинных преобразований;

- снижение размерности анализируемых пространственных данных и емкости моделей машинного обучения с целью повышения устойчивости алгоритма

классификации и ослабления системных требований к аппаратной платформе его функционирования;

- обобщение алгоритма трансферного обучения при анализе геосистем, при котором разрабатываемая модель, обучаясь на одном наборе размеченных данных, способна адаптироваться для повторного использования на новых наборах данных.

Решение обозначенных проблем возможно при одновременной проработке двух направлений: проектировании методов и алгоритмов интеграции и извлечения информативных территориальных признаков пониженной размерности и внедрении облегченных моделей их интерпретации. Неглубокие широкие нейронные сети не только менее требовательны к вычислительным ресурсам, но и более устойчивы относительно проблем обобщения и переобучения, а также являются потенциально более интерпретируемыми.

Решение задачи интерпретации пространственных данных об организационных территориально распределенных системах должно основываться на осмыслении объективных территориальных характеристик. Инвариантные свойства геосистем выявляются при изучении морфометрических параметров местности (абсолютные и относительные показатели высот, крутизна и экспозиция склонов и т. п.), которые необратимо изменяются в течение длительного времени, а динамические – на основе данных периодического дистанционного мониторинга. Имеющиеся мультиспектральные, гиперспектральные, радиолокационные данные ДЗЗ позволяют исследовать меняющиеся свойства геосистем в различных спектральных диапазонах. На значение коэффициента спектральной яркости при этом в значительной мере влияют физико-химические и геометрические параметры местности, а также состояние атмосферы.

Ключ к расчету информативных характеристик территориальных систем дает представление о георазнообразии, определяющемся как разнообразие литогенной основы ландшафтов, особенностей почв и растительности и протекающих в них процессов и неявно характеризующем гидрологические и климатические процессы [22]. Ландшафтное разнообразие при этом представляет собой более комплексное понятие и определяет системную организацию пространственно-

временных элементов разного уровня: классов, групп, типов, родов и видов геосистем [94]. Концепция ландшафтного разнообразия позволяет рассматривать территорию как хорошо структурированную систему с четко организованным соподчинением природно-территориальных комплексов.

Ландшафтное разнообразие можно определить как форму абстракции реального мира, в рамках которой свойства территориальных объектов и процессов определены численными переменными или качественными понятиями и могут быть систематизированы по классам. Расчет метрик ландшафтного разнообразия может быть основан на выявлении простых численных показателей: цветовых моментов и гистограмм, параметров неоднородности, количества контуров или выделов в рамках того или иного участка, анализируемого на основе дистанционного мониторинга [115]. Наконец, значительный объем информации об исследуемой территории содержится в синтетических цифровых ландшафтных картах, традиционно представляющих собой конечный артефакт научно-исследовательской деятельности и имеющих потенциал использования в качестве исходных данных для автоматизированного анализа.

Извлекаемые численные параметры ландшафтного разнообразия обладают значительно более низкой размерностью, в отличие от многомерных материалов дистанционного мониторинга и цифровых карт, сохраняя при этом высокую информативность. Вследствие этого они могут быть успешно проанализированы устойчивыми моделями машинного обучения более низкой емкости.

Для апробации методики повышения эффективности классификации геосистем на базе системы тестовых полигонов был сформирован набор размеченных данных, представляющих территориальные системы одного из следующих классов: однолетние культуры, леса и парки, травянистая растительность, шоссе и дороги, промышленная застройка, пастбища, многолетние культуры, жилая застройка, реки, озера и водохранилища. Каждый участок представляет собой изображение размера 64 на 64 пикселя, полученное на основе материалов космической съемки спутника Sentinel-2. Для каждого территориального класса собрано около тысячи образцов. Для расширения обучающего набора данных

использованы аффинные преобразования, которые, однако, применены с учетом сохранения ключевых свойств пространственных объектов, например экспозиции склонов.

На первой стадии эксперимента была спроектирована нейросетевая модель с двумя сверточными блоками и модулем принятия решения на основе плотно связанных слоев. Выходные данные сверточных и плотно связанных слоев подаются на вход блока пакетной нормализации. В качестве функции активации выбрана операция линейной ректификации (ReLU). Для повышения устойчивости модели к переобучению введен блок субдискретизации на основе взятия максимальной величины. Перед выходом байесовская вероятность принадлежности территориальной системы определенному классу определяется как выход слоя обобщенной логистической функции для многомерного случая Softmax. Принятие решения о принадлежности территории определенному классу осуществляется на основе принципа «победитель забирает все» путем отбора гипотезы, для которой оценочная вероятность максимальна.

Сверточные нейросетевые модели широко зарекомендовали себя как инструмент классификации многомерных пространственно распределенных данных, информация в атомарных ячейках которых распределена на основе сложных нелинейных закономерностей.

Описываемый эксперимент проведен на аппаратном обеспечении со следующими ключевыми компонентами: центральный процессор (CPU) – Skylake X (14-Core 3.30 GHz Intel Core i9-9940X), оперативная память (RAM) – 3 000 MHz DDR4 32 GB, графический процессор (GPU) – Nvidia Titan RTX на основе Тьюринг-архитектуры (576 тензорных ядер, 24 GB GDDR6). Графический процессор является особо дорогостоящим компонентом, тем не менее он необходим для обучения сверточных моделей.

Исследование осуществлено на системе тестовых полигонов [77], развернутых в Республике Мордовия: «Чеберчинка» (лесостепь эрозионно-денудационной равнины, координаты центра 54°26' с. ш., 46°17' в. д.), «Инерка» (долина реки Суры, координаты центра 54°03' с. ш., 45°53' в. д.), «Смольный» (древняя ложбина стока

ледниковых вод в зоне долины Алатыря, координаты центра 54°44' с. ш., 45°17' в. д.), «Темников – Санаксарь» (краевая часть Окско-Донской низменности, координаты центра 54° 63' с. ш., 43°21' в. д.). В качестве исходных данных для систематизации выбраны данные ДЗЗ спутника Sentinel-2, позволяющие исследовать территории отдельных классов и категорий земель [111].

Обучение модели на 80 % размеченных данных позволило получить высокую точность классификации пространственных объектов разнородных классов, равную 88 % (таблица 4.1). При моделировании жесткого дефицита размеченных данных относительная мощность обучающей выборки была снижена до 20 %, при этом точность классификации на валидационных данных упала до 77 %, при этом точность выделения некоторых классов геосистем снизилась более чем на 20 %. Это закономерный результат при использовании сверточных моделей – для устойчивого обучения они требуют большой мощности обучающей выборки.

Таблица 4.1 – Сравнение точности классификации и времени обучения моделей в рамках эксперимента

Модель и относительная величина обучающей выборки	Относительная точность классификации, %											Время обучения, с	
	Однолетние культуры	Леса и парки	Травянистая растительность	Шоссе и дороги	Промышленная застройка	Пастбища	Многолетние культуры	Жилая застройка	Реки	Озера и водохранилища	Общая точность	на GPU	на CPU
Сверточная сеть	88,7	97,0	77,7	65,2	91,2	89,5	76,8	98,3	76,8	99,0	88,5	3,6×10 ²	8,3×10 ³
Сверточная сеть при дефиците данных	78,9	93,2	65,5	44,0	86,7	86,2	67,5	91,7	59,9	95,2	77,5	1,8×10 ²	4,8×10 ³
ПСМ (D _{ДЗЗ})	81,6	94,5	63,9	39,7	90,7	67,0	64,4	94,2	58,6	94,0	76,1	2,7×10 ²	1,6×10 ²
ПСМ (D _{ДЗЗ} +D _{ЦМР})	84,4	94,8	80,5	42,0	90,8	73,1	67,7	93,9	58,9	96,5	79,4	2,7×10 ²	1,6×10 ²
ПСМ (D _{ДЗЗ} +D _{ЛК})	90,2	83,1	83,1	75,5	94,0	80,6	81,2	96,6	74,5	97,1	87,6	2,7×10 ²	1,6×10 ²
ПСМ (D _{ДЗЗ} +D _{ЦМР} +D _{ЛК})	90,5	96,7	88,7	77,6	93,8	86,5	83,6	96,9	77,8	97,8	89,2	2,7×10 ²	1,6×10 ²

Необходимо отметить и то, что использование более глубоких нейросетевых архитектур потенциально позволит повысить точность классификации благодаря возможности выделения сложных иерархических признаков, однако при этом будут увеличены требования к аппаратному обеспечению, на котором проводятся

вычисления, или потребуются большие временные затраты на проведение экспериментальных исследований.

Таким образом, использование глубоких сверточных нейросетевых моделей при всех преимуществах приводит к возникновению противоречий, требующих решения. Во-первых, для их устойчивого обучения необходима экспертная разметка значительных объемов обучающих данных, что представляет собой весьма затратный с точки зрения времени и ресурсов процесс. Во-вторых, глубокие сверточные модели являются очень требовательными к вычислительным ресурсам, которые не всегда доступны.

Решение обозначенных проблем возможно в результате внедрения более легких моделей, например широких полносвязных моделей (ПСМ) малой глубины. Эти системы устойчивее к переобучению, могут эффективно обучаться на значительно более малых наборах данных и потенциально подходят для повторного использования на основе трансферного обучения. Однако такие нейронные сети способны эффективно анализировать одномерные векторы данных, а не многоканальные изображения территории. По этой причине необходимо предложить алгоритм выделения информационно-емких признаков территории пониженной размерности.

Задача построения признаков является сложной, вследствие того, что при ее решении требуется удовлетворить многим противоречивым слабо формализуемым требованиям, важное место среди которых занимают требования вычислительного характера. Это положение обосновано В. В. Мясниковым, который в статье [53] предложил методику построения эффективных линейных локальных признаков на основе расчета конечной импульсной характеристики (КИХ) и вычисления линейной свертки сигнала с КИХ. В. В. Сергеевым предложена методика расчета статистических параметров и автокорреляционной функции гиперспектральных данных ДЗЗ, позволяющая рассчитывать характеристики на основе в том числе спектрального измерения данных [68].

Получение комплексной пространственно-временной характеристики состояния земель для оценки устойчивости территории и прогнозирования

эмерджентных процессов целесообразно осуществлять на основе системного анализа данных, характеризующих динамические и инвариантные свойства территории. Инвариантные свойства геофизического объекта выявляются при изучении морфометрических параметров местности, которые необратимо изменяются в течение длительного времени, а динамические – на основе данных дистанционного мониторинга.

Ключ к расчету информативных показателей о вмещающих геосистемах дает представление о георазнообразии [22], сформированное в связи с проблемами природопользования и определяющееся как разнообразие геологического строения территории, особенностей почвы, природных систем и протекающих процессов. Данное определение неявно включает и гидрологические, и климатические процессы.

Применение электронных ландшафтных карт и результатов структурно-генетических ландшафтных исследований (школа ландшафтоведения МГУ им. М. В. Ломоносова) имеет высокий потенциал наравне с машинным анализом мультиспектральных и радиолокационных данных дистанционного зондирования, традиционно применяемых в России и в зарубежных странах. Результаты российских исследований в области ландшафтоведения в настоящее время могут проявить себя на острие научно-технологического развития. Ландшафтное разнообразие следует рассматривать в качестве сложного интегрального показателя, содержащего информацию о системной организации ландшафта и особенностях выполнения им природных и социальных функций [64]. Ландшафтное разнообразие можно определить как форму абстракции реального мира, в рамках которой свойства территориальных объектов и процессов определены численными переменными или качественными понятиями и могут быть систематизированы по классам. Уровни ландшафтной организации при этом изменяются согласно цели исследования. Согласно геосистемному подходу, представленному ранее, положительный эффект дает анализ свойств вмещающих геосистем различного масштаба.

Расчет метрик ландшафтного разнообразия может быть основан на выявлении простых численных показателей: количество контуров или выделов [97].

Дадим определение численных характеристик ландшафтного разнообразия, которые могут быть извлечены из материалов дистанционного мониторинга и являются при этом одновременно информативными и наглядными для специалистов из области наук о Земле [206]. Представленные метрики характеризуют различные способы численной оценки ландшафтного разнообразия территории (рисунок 4.2) и могут быть рассчитаны для участков разного масштаба (геосистем различного иерархического уровня) на основе различных данных (например, изображение территории в различных спектральных полосах) [50].

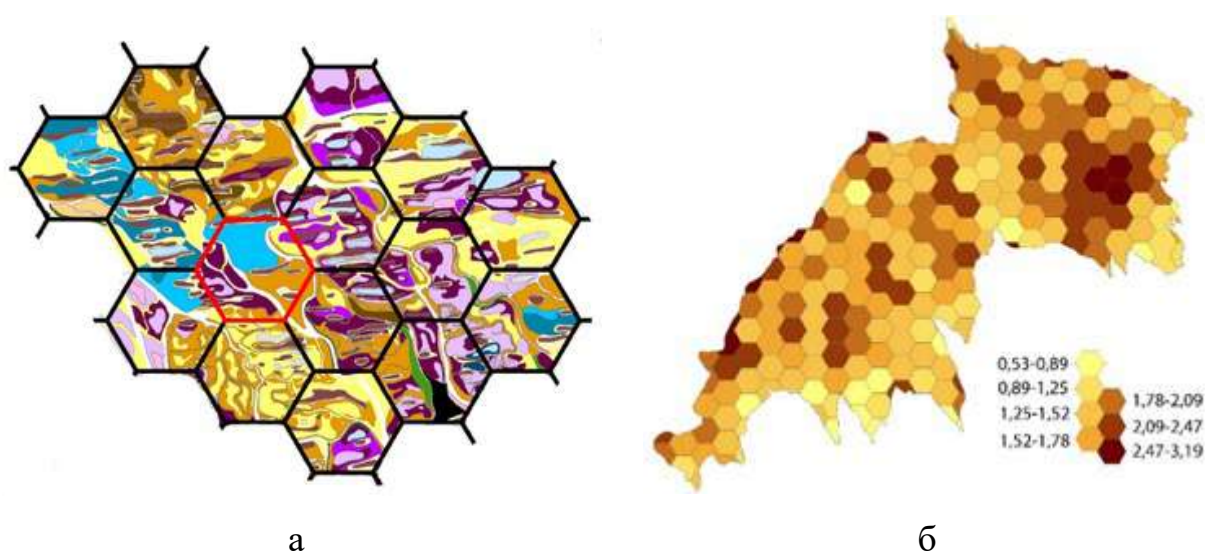


Рисунок 4.2 – Визуализация ландшафтного разнообразия тестового полигона «Дельта Волги»: а) фрагмент ячеек-гексагонов с контурами урочищ; б) ландшафтная неоднородность территории.

К первой группе признаков отнесем дескрипторы территории $D_{дзз}$, которые могут быть рассчитаны на основе изображения территории в определенных спектральных диапазонах (например, в видимом спектре). Предъявим важное ограничение к рассчитываемым параметрам: они должны обладать свойством наглядности – картограммы, построенные на их основе, должны быть информативными для специалистов в области анализа данных и наук о Земле.

В ходе эксперимента на основе космической съемки территории были рассчитаны следующие дескрипторы группы $D_{дзз}$.

1. Ландшафтные метрики неоднородности, основанные на расчете информационной энтропии территории E и разброса Δ (характеризующего изменение спектральной яркости относительно среднего значения):

$$H = \langle E, \Delta \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^R \frac{n_i}{S} \log \left(\frac{n_i}{S} \right), \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right\rangle, \quad (4.1)$$

где R – радиометрическое разрешение изображения;

n_i – количество атомарных территориальных единиц спектральной яркости i в этой окрестности;

S – площадь анализируемой территории;

N – количество пикселей в анализируемой территориальной системе;

x_i – среднее значение спектральной яркости атомарного участка;

$\bar{x}$ – среднее значение спектральной яркости анализируемой территории.

2. Метрики интенсивности, основанные на вычислении инвариантных к шумам и нежелательным искажениям достоверных и стабильных параметров изображения территории. Так, цветовой момент характеризует распределение спектральной яркости территориального участка и определяется как набор математического ожидания ($\bar{I}$), дисперсии (D) и асимметрии (A) яркости атомарного участка территориальной системы в определенном спектральном диапазоне:

$$M = \langle \bar{I}, D, A \rangle = \left\langle \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N c_j, \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (c_j - \bar{I})^2}, \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (c_j - \bar{I})^3} \right\rangle, \quad (4.2)$$

где c_j – яркость j -го атомарного участка в определенном спектре.

3. Гистограмма оттенков, представляющая собой показатель, выстраиваемый по принципу гистограмм и характеризующий распределение количества пикселей изображения определенных оттенков по A группам. Для его расчета определим через τ вектор возможных оттенков пикселей. При этом количество групп A может быть подобрано вручную с целью повышения информативности метрики или определено на основе правила.

$$P = \left\{ h_a \left| \begin{array}{l} h_a = \sum_{i=1}^N \tau_i \left[\begin{array}{l} \tau_i \geq \min(\tau) + (a-1)\sigma \\ \tau_i < \min(\tau) + a\sigma \end{array} \right] \\ (a \in \mathbb{N} \wedge a \leq A_{ij}) \\ \sigma = \frac{(\max(\tau) - \min(\tau))}{A} \end{array} \right. \right\}. \quad (4.3)$$

Данные метрики представляют собой различные способы численной оценки ландшафтного разнообразия территории и могут быть рассчитаны для участков разного масштаба (геосистем различного иерархического уровня) на основе различных данных (например, изображение территории в различных спектральных полосах).

Важнейший источник информации об инвариантных свойствах территории представляют собой цифровые модели рельефа, которые могут консолидироваться из разных источников, таких как SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), 3DEP (3D Elevation Program), GMTED (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data). Важным источником информации о рельефе территории часто становятся региональные геоинформационные системы [101].

Для проведения эксперимента был написан алгоритм, агрегирующий данные о ЦМР классифицируемого участка, на основе использования прикладных программных интерфейсов сторонних поставщиков. Расширение исходного набора данных производилось с помощью атрибутивных параметров изображений территории, содержащих сведения о широте и долготе анализируемого участка.

На основе анализа цифровой модели рельефа территории были рассчитаны следующие дескрипторы группы $D_{\text{ЦМР}}$.

1. Метрики крутизны территории, объективно характеризующие такие свойства территориальной системы, как поверхностный сток, эрозия, количество получаемой солнечной энергии, рассчитывались на основе определения параметров максимума, минимума, математического ожидания и отклонения перепада высот между соседними точками ЦМР. Значение крутизны A при этом можно вычислить на основе значений карты высот.

$$\begin{cases} A = \tan^{-1} \left(\sqrt{A_{EW}^2 + A_{NS}^2} \right), \\ A_{EW} = \frac{h_E - h_W}{2s}, \\ A_{NS} = \frac{h_N - h_S}{2s}, \end{cases} \quad (4.4)$$

где A_{EW} – крутизна склона в направлении с востока на запад;

A_{NS} – крутизна склона в направлении с севера на юг;

$h_{E,W,N,S}$ – высота восточной, западной, северной, южной точки;

s – характеристика масштаба ЦМР (расстояние между точками карты высот).

2. Метрики экспозиции склонов – морфометрический параметр, объективно отражающий ориентацию исследуемого участка к потоку солнечных лучей, а также вероятное направление стока воды, рассчитываемый на основе параметров максимума, минимума, математического ожидания и отклонения карты градиентов ЦМР и характеризующий азимут уклона земной поверхности:

$$F = -\tan^{-1} \left(\frac{A_{EW}}{A_{NS}} \right) \quad (4.5)$$

3. Статистические характеристики (минимум, максимум, математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение) абсолютных и относительных значений высот ЦМР территории также несут информацию, позволяющую в итоге снизить размерность анализируемых данных.

Наконец, цифровые ландшафтные карты, генерируемые в региональных и федеральных географических информационных системах, также представляют собой весомый источник информации, позволяющий повысить точность классификации природных и социальных систем. Несмотря на то, что масштаб таких карт часто меньше масштаба классифицируемых участков, они интегрируют в себе значительное количество информации о вмещающих геосистемах. Получение данных об участке ландшафтной карты может быть осуществлено за счет интеграции модуля подготовки данных с программными API-интерфейсами ГИС-системы посредством использования атрибутивных сведений о координатах анализируемого участка. В ходе эксперимента дескрипторы группы $D_{ЛК}$ рассчитывались на основе

данных региональной ГИС «Мордовия» вычислением метрик, аналогичных тем, что использованы для определения дескрипторов группы $D_{ДЗЗ}$.

Дополнительное отсеивание неинформативных признаков для снижения размерности анализируемых данных может быть произведено на основе алгоритма, предполагающего случайную итерационную выборку образцов из размеченного обучающего набора данных, с последующим обновлением параметра значимости каждого признака на основе разницы между выбранным образцом и двумя ближайшими к нему объектами того же или альтернативного класса. Если наблюдается достаточная разница в значениях признака для определенного количества ближайших соседей одного класса, его важность снижается, и наоборот, в том случае, когда наблюдается различие между значениями признака для объектов разных классов, его важность повышается. Вес признака уменьшается, если его значение отличается для ближайших объектов одного и того же класса больше, чем для ближайших объектов из разных классов; в противном случае вес увеличивается.

Снижение размерности анализируемых данных приводит к потере определенного количества информации, однако в том случае, если результирующий вектор параметров позволяет осуществлять идентификацию территории с допустимой точностью, уменьшение размерности дает возможность подойти к использованию менее глубоких и более устойчивых к проблеме переобучения моделей машинного обучения.

На рисунке 4.3 представлены кривые, характеризующие зависимость математического ожидания точности классификации на валидационных данных в зависимости от эпохи обучения ПСМ.

Видно, что совокупный анализ признаков дает существенный прирост в точности классификации природных и социальных систем. Учет дескрипторов, рассчитанных на основе данных космической съемки территории (группа $D_{ДЗЗ}$), позволил достичь точности 76 %. Вовлечение дескрипторов рельефа (группа $D_{ЦМР}$) увеличивает точность на 3 %, а метрик, рассчитанных на основе ландшафтных карт (группа $D_{ЛК}$), – на 11 %. Наконец, одновременный анализ дескрипторов всех категорий приводит к увеличению точности классификации почти на 12 %.

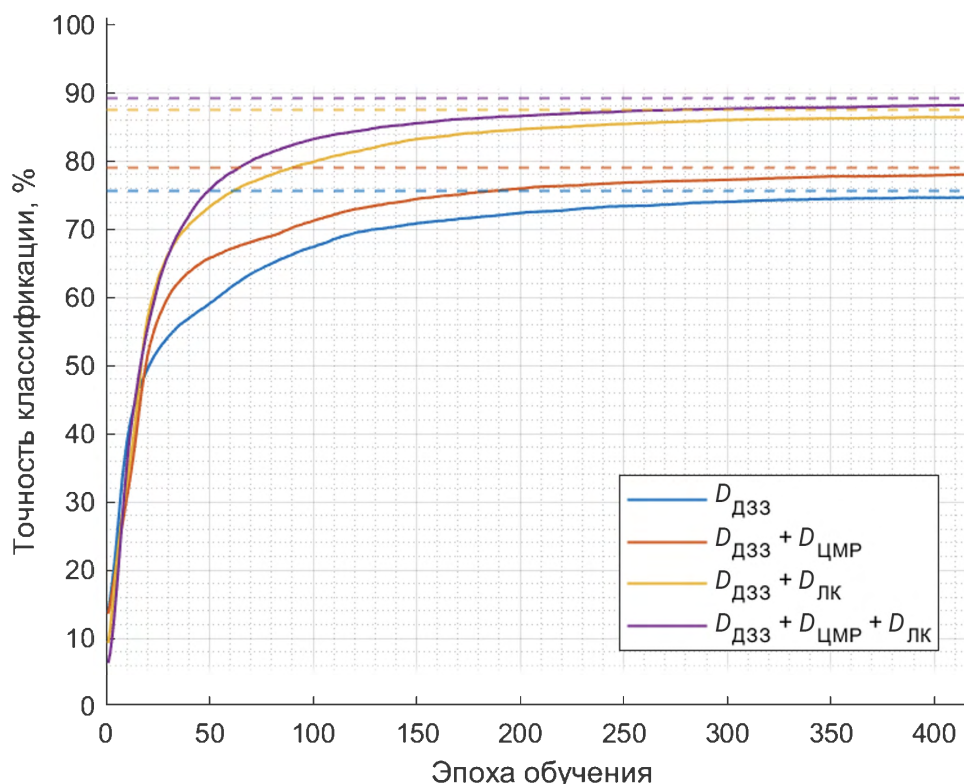


Рисунок 4.3 – Изменение математического ожидания точности классификации на валидационных данных в зависимости от эпохи обучения ПСМ

Признаки, рассчитываемые на основе оценки сложности и разнообразия ландшафтного покрова, характеризуют структурные свойства земель, и при этом для них характерна гораздо меньшая размерность, чем для данных ДЗЗ, представляющих собой многомерные тензоры. При этом за счет потери некоторого объема информации появляется возможность обучения нейронных сетей меньшей емкости, что важно при использовании менее производительного оборудования. У моделей меньшей емкости есть и еще одно преимущество – они могут быть обучены на меньших наборах данных и в более низкой степени подвержены проблеме переобучения.

Использование знаний о ландшафтной неоднородности вмещающих геосистем в качестве атрибутов классифицируемой земли позволяет получать компактные кластеры векторов признаков, образующих локально ограниченные домены в пространстве признаков (рисунок 4.4).

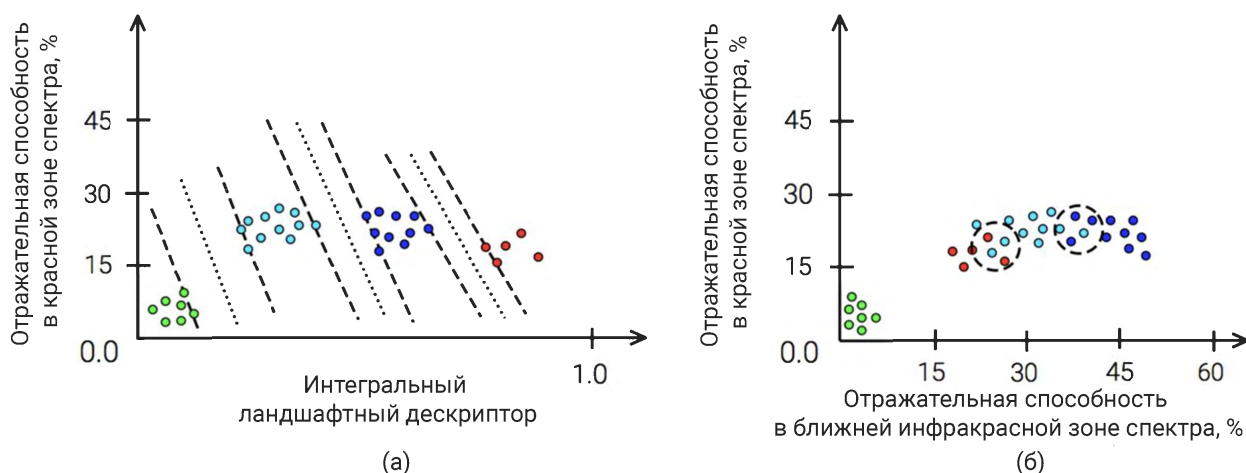


Рисунок 4.4 – Двумерные пространства признаков классифицируемых земель:

а – спектрально-ландшафтных признаков; б – двух спектральных признаков.

Объекты: зеленый – водные объекты, голубой – надпойменные террасы, синий – поймы, красный – водораздельные массивы.

Дескрипторы территории и вмещающих ее геосистем могут быть объединены в структуру «Мешок визуальных слов» (Bag-of-Visual Words, BoV), представляющую собой словарь, определяющий гистограмму значений дескрипторов. Альтернативный механизм агрегации признаков может базироваться на построении вектора Фишера [186], основанного на вычислении ядра Фишера [181], сочетающего преимущества генеративного и дискриминантного подходов к классификации паттернов посредством получения ядра из генеративной модели данных.

В итоге ПСМ малой емкости показала характеристики точности классификации выше, чем у более громоздкой сверточной модели, обученной на многомерных пространственных данных. В частности, более высокая точность достигнута при детектировании территорий следующих классов: однолетние и многолетние культуры, травянистая растительность, шоссе и дороги, промышленная застройка и реки. При этом легкая модель может быть обучена без привлечения мощного графического процессора, что делает ее удобной с точки зрения тонкой настройки и оптимизации гиперпараметров в условиях отсутствия доступа к тяжелому и дорогостоящему аппаратному обеспечению. Таким образом, широкие неглубокие модели машинного обучения, обучаемые на основе набора информативных

территориальных дескрипторов, могут функционировать и дообучаться на относительно тонких устройствах, таких как беспилотные летательные аппараты. Следующим важным преимуществом предложенной ПСМ, обучающейся на территориальных дескрипторах, является устойчивая работа в условиях дефицита размеченных данных. Уменьшение доли обучающей выборки до 20 % не привело к весо-мому снижению точности классификации природных и социальных систем (в то время как точность сверточной нейросетевой модели упала более чем на 10 %). Данное преимущество обусловлено достаточной информативной нагрузкой выделяемых территориальных дескрипторов, их инвариантностью к изменению исследуемого полигона, а также хорошей способностью модели к обобщению анализируемых данных. Таким образом, предложенная ПСМ может быть использована повторно в рамках исследования новых территориальных систем, а также дообучена и тонко настроена на основе нового размеченного набора данных посредством трансферного обучения.

4.2 Методика формирования ансамблей неглубоких моделей для классификации земель

В последние десятилетия исследователи разработали множество методов создания прогнозных карт регионов. Эти подходы основаны на использовании искусственных нейронных сетей, нечеткой логики, деревьев принятия решений, логистической регрессии, машин опорных векторов. Их эффективность можно повысить, используя методы создания систем ансамблей блоков машинного обучения для классификации [213].

Анализ земель на основе систем глубокого машинного обучения используется в решении практических задач: прогнозирования чрезвычайных процессов и явлений, мониторинга окружающей среды. Применение машинного обучения позволяет снизить стоимость исследований благодаря экстраполяции измерений. Обучение ансамблей предполагает использование алгоритмов объединения классификаторов [246, 88]. Алгоритм классификации земель может быть реализован с

использованием ансамблей в четыре основных этапа [109]: 1) сбор и подготовка данных; 2) систематизация данных; 3) построение пространственных моделей; 4) оценка результатов моделирования.

Ансамбль моделей машинного обучения BC формируется на основе моноклассификаторов M_i (отдельных обученных глубоких моделей) и метаклассификатора MC , осуществляющего принятие результирующего решения при решении задачи классификации территориального объекта X_j для определения его принадлежности к классу геосистем.

Набор моноклассификаторов ансамбля BC состоит из обученных моделей M_i , осуществляющих функцию определения принадлежности территориального объекта X_j классу геосистем c_k . Различие моноклассификаторов ансамбля может заключаться как в их архитектурной и топологической организации, так и в данных, использованных для обучения модели.

$$BC = \{M_i: i \in \mathbb{N}, i \leq N\}. \quad (4.6)$$

Алгоритм проектирования метаклассификатора ансамбля. При классификации территориального объекта X_j моноклассификаторы ансамбля M_i формируют вектор гипотез P_j относительно принадлежности данного объекта определенному классу геосистем c_k из номенклатуры классов $\mathbb{C}$ мощностью K :

$$\begin{cases} P_j = \{f(M_i, X_j): i, j \in \mathbb{N}, i \leq N\}, \\ P_j \in \mathbb{C} = \{c_k: k \in \mathbb{N}, k \leq K\}. \end{cases} \quad (4.7)$$

При этом функция $f_i(X_j) = f(M_i, X_j)$ порождается в процессе обучения моноклассификатора M_i при накоплении опыта решения задач классификации геосистем на основе меры качества P и возвращает набор байесовских вероятностей, определяющих степень уверенности моноклассификатора M_i в истинности факта принадлежности территории X_j классу геосистем c_k .

$$f_i(X_j) = \{p_{jik}: k \in \mathbb{N}, k \leq K \wedge 0 \leq p_k \leq 1\}. \quad (4.8)$$

Решение Y_{ij} моноклассификатора M_i о принадлежности определенного территориального объекта X_j конкретному классу геосистемы может быть

вынесено путем выбора класса c_i , для которого рассчитанная байесовская вероятность максимальна.

$$Y_{ij} = \operatorname{argmax}_k p_{ik \in f_i(x_j)} p_{jik}. \quad (4.9)$$

Результирующая гипотеза Y_E об отнесении территории X_j конкретному классу геосистем c_k выносится метаклассификатором MC ансамбля E . В этом случае, принятие результирующего решения на основе выходных данных нейросетевых моделей целесообразно принять на основе взвешенного голосования [37], обобщенное представление которого имеет следующий вид:

$$Y_{Ej} = \operatorname{argmax}_k \sum_{i=1}^N \varphi(M_i, k) \psi(p_{jik}). \quad (4.10)$$

Расчет мер эффективности моноклассификаторов. В данной формуле параметр $\varphi(M_i, k)$ представляет собой весовой коэффициент, представляющий собой меру эффективности моноклассификатора M_i в детекции геосистем класса k . Функция φ определяет преобразование вида $\varphi: M_i \rightarrow \Lambda_{ik}$, при котором весовой коэффициент и мера эффективности Λ_{ik} определяются путем математических преобразований экспериментально полученных данных матрицы ошибок M_i моноклассификатора M_i .

Предлагается следующий алгоритм расчета меры эффективности Λ_{ik} .

1. Построение матрицы ошибок M_i для каждого моноклассификатора M_i системы.

2. Вычисление абсолютных метрик точности для классификатора M_i при определении геосистем класса k : попаданий (TP_{ik}), верных отклонений (TN_{ik}), ошибок I (FP_{ik}) и II (FN_{ik}) типов.

3. Расчет относительной метрики $\mathcal{R}_{ik}$, определяющей точность классификации геосистем класса k , позволяющей осуществить интегральную оценку полученной матрицы ошибок M_i числом в интервале $[0; 1]$. Так, оценка F_β комплексно учитывает показатели точности (*precision*) и полноты (*recall*), а следовательно, ошибки I и II типов, а также число верных попаданий моноклассификатора. Кроме этого,

метрика настраивается посредством конфигурирования параметра β , позволяющего расставить акцент влияния точности и полноты на результат.

$$\begin{aligned}\mathcal{R}_{ik} = F_{i\beta k} &= (1 + \beta^2) \cdot \frac{precision_{ik} \cdot recall_{ik}}{(\beta^2 \cdot precision_{ik}) + recall_{ik}} \\ &= \frac{(1 + \beta^2) \cdot TP_{ik}}{(1 + \beta^2) \cdot TP_{ik} + \beta^2 \cdot FN_{ik} + FP_{ik}}.\end{aligned}\quad (4.11)$$

При решении задачи классификации геосистем важное значение может быть уделено максимизации метрики верных отклонений. Данное обстоятельство учитывается посредством расчета корреляции Мэтьюса:

$$\mathcal{R}_{ik} = \left| \frac{TP_{ik} \cdot TN_{ik} - FP_{ik} \cdot FN_{ik}}{\sqrt{(TP_{ik} + FP_{ik})(TP_{ik} + FN_{ik})(TN_{ik} + FP_{ik})(TN_{ik} + FN_{ik})}} \right|. \quad (4.12)$$

При необходимости может быть спроектирована какая-либо иная метрика, удовлетворяющая требованиям построения ансамбля.

4. Деактивация неэффективных классификаторов относительно порогового значения ϵ может быть осуществлена по следующему принципу:

$$\tilde{\mathcal{R}}_{ik} = \begin{cases} \frac{\mathcal{R}_{ik} - \epsilon}{1 - \epsilon}, & \text{если } (\mathcal{R}_{ik} > \epsilon); \\ 0, & \text{если } (\mathcal{R}_{ik} \leq \epsilon). \end{cases} \quad (4.13)$$

В результате приведенной условной тернарной операции решаются две задачи: во-первых, значения мер эффективности меньше порога ϵ обнуляются, убирая неэффективные моноклассификаторы из системы принятия решений; во-вторых, результирующее значение вновь нормируется в интервале $[0; 1]$. При $\epsilon = 0$ реализуется возможность отказа от использовании деактивации.

5. Активация метрики посредством осуществления дополнительного нелинейного нормализованного монотонного преобразования θ метрики $\tilde{\mathcal{R}}_{ik}$

$$\Lambda_{ik} = \theta(\tilde{\mathcal{R}}_{ik}). \quad (4.14)$$

Операция активации метрики обеспечивает минимизацию или ускорение роста величины метрики у ее граничных значений. В качестве активационной функции θ может быть взята логистическая кривая. При тождественном отображении $\text{id}_{\tilde{\mathcal{R}}_{ik}}$ реализуется возможность отказа от использовании активации.

Результизирующее значение метрики Λ_{ik} может быть использовано для определения меры эффективности моноклассификатора M_i для осуществления детекции геосистем класса k .

Расчет меры голоса моноклассификатора. Функция ψ представляет собой преобразование вида $\psi: p_{jik} \rightarrow \mathbb{Q}_{jik}$, при котором байесовская вероятность p_{jik} , определяющая степень уверенности моноклассификатора M_i в истинности факта принадлежности территории X_j классу геосистем s_k , трансформируется в меру голоса $\mathbb{Q}_{jik}$.

Мера голоса может быть определена по принципу «победитель забирает все», при котором моноклассификатор M_i выставляет 1 наиболее вероятному решению и 0 всем остальным:

$$\mathbb{Q}_{jik} = \begin{cases} 1, & \text{если } Y_{Ej} = k; \\ 0, & \text{если } Y_{Ej} \neq k. \end{cases} \quad (4.15)$$

При тождественном отображении id_ψ при голосовании будут учитываться байесовские вероятности принадлежности территории X_j классу геосистем k . Наконец, может быть осуществлена активация метрики $\mathbb{Q}_{jik}$ посредством осуществления дополнительного нелинейного нормализованного монотонного преобразования $\theta(\mathbb{Q}_{jik})$, обеспечивающего изменение меры голоса у граничных значений.

Апробация методики формирования ансамблей неглубоких нейронных сетей проходила на системе тестовых полигонов [146]. При решении задачи классификации геосистем тестового полигона «Инерка» использованы пространственные данные трех различных источников, предоставляющие информацию о динамических и инвариантных свойствах исследуемой территории. Источником сведений об изменяющихся во времени спектральных характеристиках территории были выбраны данные дистанционного космического мониторинга, получаемые со спутника Sentinel-2. Анализируемое изображение было получено 30 августа 2021 года (по системе MGRS, рассчитываемой на основе универсальной поперечной проекции Меркатора, квадрат съемки определяется положением 38UNF). Пространственное

разрешение съемки в видимых зонах спектра и ближнем инфракрасном диапазоне составляет 10 м. на 1 атомарный участок. Данные о морфометрических свойствах территории, характеризующие ее инвариантное (медленное, но безвозвратно изменяемое) состояние, получены на основе материалов SRTM, скорректированных и распространяемых компанией Mapzen на основе облачных прикладных программных интерфейсов Amazon. Средняя квадратическая ошибка относительно фиксируемой высоты для исследуемого тестового полигона измеряется в пределах 1,4 м., а пространственное разрешение составляет 30 м.. Третьим источником информации об анализируемой территории выступили данные региональной ГИС «Мордовия», использованные для построения цифровой ландшафтной карты и содержащие информацию о региональных системах землепользования. Не характеризуясь высоким пространственным разрешением, они обладают значительной информационной емкостью, храня синтетические показатели анализируемой территории: классы геосистем и типы систем землепользования.

Предварительная подготовка изображения Sentinel-2 уровня 2A выполнена на основе процессора Sen2Cor и включила в себя нормализацию значений спектральной яркости, коррекцию данных на основе атмосферных параметров с поправкой на отражательную способность рельефа и перистых облаков. Для повышения точности анализа был рассчитан набор территориальных дескрипторов, характеризующих свойства вмещающей для атомарного участка окрестности. В число синтезированных признаков вошли локальная энтропия вмещающей геосистемы (окрестности), разброс спектральных яркостей относительно среднего значения, гистограммы оттенков, статистические данные карт высот, экспозиции и крутизны склонов. Расчет территориальных дескрипторов позволяет достичь снижения размерности анализируемых данных (в сравнении с анализом фрагмента космической съемки) при неизбежной утрате определенного количества информации об анализируемой территории. При этом был достигнут баланс между максимально возможным облегчением допустимой емкости модели машинного обучения, повышением ее устойчивости к переобучению и недопущением значительного снижения точности классификации в рамках

решаемой задачи классификации геосистем тестового полигона. Рассчитанные дескрипторы обладают свойством наглядности: картограммы, построенные на их основе, информативны для специалистов в области анализа данных и наук о Земле. Перед машинным анализом метрики территории были нормализованы путем масштабирования вектора данных по значению его стандартного отклонения. Для каждого территориального класса подготовлено около сотни размеченных выборок.

На основе спектральных и морфометрических свойств территории, а также синтетических дескрипторов вмещающих геосистем сформирован вектор параметров, пригодный для обучения искусственными нейронными сетями невысокой глубины, основанными на использовании плотно связанных слоев. Такие модели, в отличие от широко используемых сверточных сетей, могут обучаться на более низком количестве размеченных данных, характеризуются устойчивостью к проблеме переобучения, менее требовательны к аппаратному обеспечению. В качестве функции активации слоев нейронной сети использована операция линейной ректификации (ReLU). Для повышения устойчивости модели к переобучению введен блок субдискретизации на основе взятия максимальной величины. Для решения проблемы снижения точности классификации и переобучения в структуру нейронной сети введены слои нормализации. Принятие решения о принадлежности территории к определенному классу осуществляется на основе принципа «победитель забирает все» путем отбора гипотезы, для которой оценочная вероятность максимальна. Общее число полносвязных слоев ограничено двумя.

В ходе эксперимента спроектированы три искусственные нейронные сети (ИНС), которые также были объединены в ансамбль согласно описанной методике [111]. Первая нейросетевая модель основана на одном плотно связанном слое в 10 нейронов, вторая и третья – на двух мощностью 10 – 10, и 10 – 20 нейронов соответственно. Результаты расчета F_1 -метрики на основе матрицы ошибок представлены на рисунке 4.5.

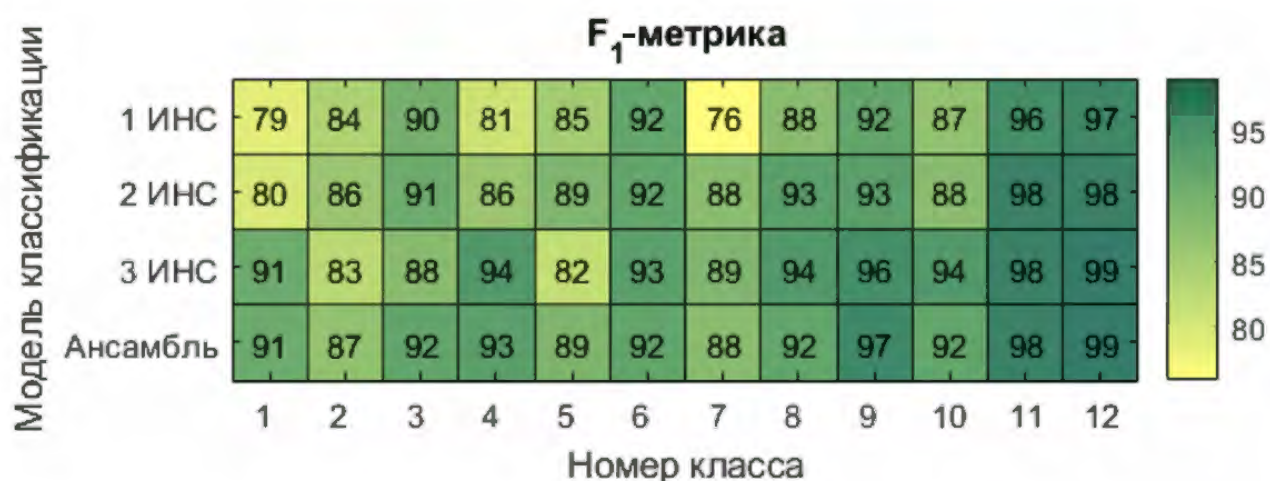


Рисунок 4.5 – Значение F₁-метрики для классификаторов при классификации геосистем

Видно, что увеличение емкости моделей не приводит к однозначному улучшению результата, так как более мощные модели могут быть менее устойчивы к переобучению, а также требуют большего объема размеченных данных для обучения. При объединении в ансамбль результирующая гипотеза стала применяться на основе взвешенного голосования на основе меры эффективности, что позволило избежать грубых ошибок в классификации, свойственных каждому классификатору в отдельности. При этом ансамбль лишь незначительно проигрывает в точности отдельным классификаторам системы, сохраняя общую устойчивость к ошибкам первого и второго рода, характерных для отдельного классификатора при определении объектов конкретного класса территории.

Результаты классификации пространственных данных с последующей экспертной постобработкой позволили выделить на территории полигона «Инерка» следующие роды и виды геосистем (рисунок 4.6).

Особенности структуры геосистем исследуемой территории определяются правосторонней асимметрией долины р. Суры [23]. К классу 1 отнесен ее коренной борт с абсолютными отметками до 265 м, сложенный мергелями, опоками, писчим мелом с выходами коренных горных пород на крутых склонах на дневную поверхность.

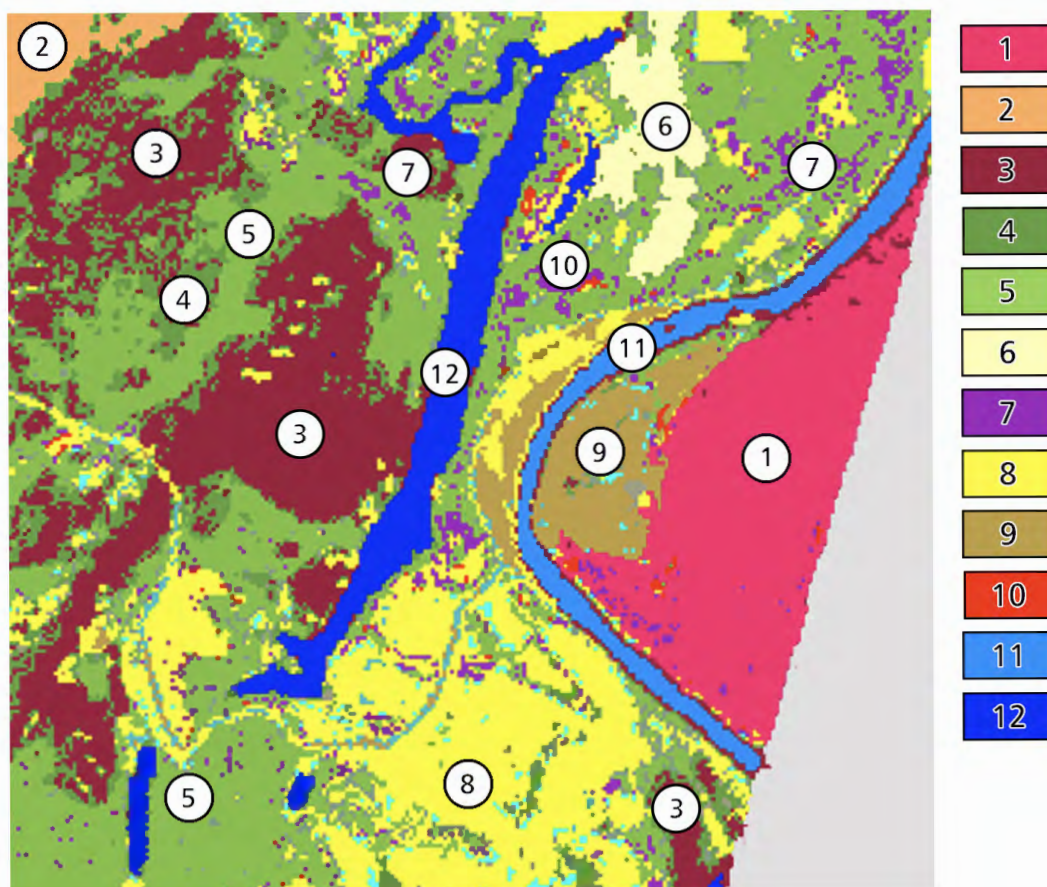


Рисунок 4.6 – Карта геосистем полигона «Инерка»

Выделены надпойменные террасы (классы: 2 – выровненные поверхности, сложенные песками и супесями, с дерново-слабоподзолистыми почвами под сосняками дубово-снытево-осоковыми и липово-широкотравными; 3 – дюнообразные останцы внутрипойменных террасовых комплексов с котловинами выдувания, со слабо развитыми подзолистыми и дерново-слабоподзолистыми почвами под сосняками лишайниковыми, зеленомошными, сухотравно-злаковыми; 4 – нижние части надпойменных террас с невысокими песчаными гривами, осложненными неглубокими ложбинами, западинами и котловинами, в структуре почвенного покрова характерна мозаика дерново-подзолистых, дерново-подзолистых глееватых и дерново-подзолистых глеевых почв под сосняками дубово-снытево-осоковыми, липово-широкотравными, сырыми березняками и осинниками), поймы (классы: 5 – слабоволнистые поверхности, сложенные суглинками с прослоями песков, осложненные староречьями и руслами небольших водотоков с серыми лесными оподзоленными, пойменными дерновыми зернистыми и иловато-

перегнойными почвами с избыточным увлажнением; 6 – комплексы крупных и мелких грив с дерновыми слабо развитыми песчаными и дерново-луговыми маломощными легкосуглинистыми почвами, с мятликово-лугово-овсяничниковыми лугами; 7 – межгривные понижения и староречья с лугово-болотными тяжелосуглинистыми почвами под осоково-манниково-канареечниковыми лугами и ивняковыми зарослями; дерново-глеевыми и перегнойно-глеевыми почвами под осоковой, влажнотравно-крупнотравной растительностью, зарослями ивы и ольхи), прирусловые песчаные сырые поймы со злаково-крупнотравными лугами и ивняками (класс 8); прирусловые песчаные отмели и пляжи (класс 9); топи ольховые с торфянисто-глеевыми и торфяными иловато-суглинистыми почвами (класс 10); природные аквальные комплексы (классы: 11 – природно-аквальные комплексы Суры; 12 – природно-аквальные комплексы старичных озер).

Картографирование геосистем тестового полигона «Инерка» показывает их слабую устойчивость к рекреационному освоению. Основными лимитирующими факторами являются состав четвертичных отложений, характер рельефа, механический состав и влажность почв, мощность гумусового горизонта, генезис и состав растительности.

Анализ эффективности методики построения ансамблей классификаторов при решении задачи исследования структуры геосистем тестовых полигонов позволяет сделать следующие выводы:

- использование ансамблей, выстраиваемых по предложенной методике, дает возможность проводить оперативный автоматизированный анализ пространственных данных для решения задачи тематического картографирования геосистем и природных процессов;

- объединение моделей в ансамбль на основе предложенной архитектуры метаклассификатора позволяет повысить устойчивость анализирующей системы: точность решений, принимаемых ансамблем, имеет тенденцию стремиться к точности наиболее эффективного моноклассификатора системы;

- ошибочность системы имеет тенденцию не превышать ошибочность наиболее эффективного классификатора, избегая при этом грубых систематических ошибок, допускаемых отдельными моноклассификаторами;

- использование ансамблей позволяет подойти к решению проблемы подготовки данных для обучения моделей за счет интеграции в единую систему моделей, обученных на различных комбинациях обучающих и валидационных выборок для снижения влияния ошибок, возникающих при формировании датасетов;

- интеграция отдельных классификаторов в ансамбли позволяет подойти к решению задачи поиска гиперпараметров классификаторов за счет комбинированного использования моделей одного типа с разными конфигурациями;

- формирование метаклассификатора по предложенному алгоритму дает возможность добавить элемент предсказуемости и контроля в использование нейросетевых моделей, традиционно представляющих собой «черный ящик».

Построение эффективных ансамблей может быть основано на моделях относительно небольшой ширины и глубины, что позволяет проектировать высокоточные классификаторы, обучение которых менее требовательно к вычислительным мощностям в сравнении с классическими глубокими моделями.

Результаты исследований в области построения ансамблей классификаторов представлены в статье [243] (опубликована в научном журнале «Journal of Hydroinformatics», входящем во второй квартиль Scopus). В научной статье [210], опубликованной в журнале «Natural Resources Research» (входит в первый квартиль Scopus), проведенное исследование рассматривается как подтверждение того факта, что надежность, объективность и точность анализа данных повышаются при использовании ансамблевых систем. В работе [142], опубликованной в издании «Atmosphere» (входит во второй квартиль Scopus), полученные результаты стали одной из отправных точек для разработки ансамбля классификаторов, используемого для прогнозирования осадков.

Методика расчета синтетических параметров территории, которые могут быть использованы в качестве входных данных для моделей машинного обучения представлена в статье [183, 243] (опубликована в научном журнале «Data»),

входящего во второй квартиль Scopus). В журнале «Data» в рамках спецвыпуска по астрофизике и геофизике [229] отмечена значимая прикладная роль проведенного исследования как инструмента предоставления ученым необходимой вспомогательной информации, содействующей пониманию и практическому использованию новых алгоритмов анализа пространственных данных.

4.3 Выводы по четвертой главе

1. Использование глубоких нейросетевых моделей при решении задачи анализа состояния территориальных систем для принятия управленческих решений сопряжено с рядом серьезных ограничений: такие модели способны эффективно обучаться на чрезмерно больших наборах размеченных пространственных данных, подвержены проблеме переобучения, характеризуются слабой интерпретируемостью, а процессы их использования, обучения и тонкой настройки предъявляют высокие требования к аппаратному обеспечению. В случае невозможности преодоления обозначенных ограничений целесообразно перейти к использованию неглубоких и широких полносвязных моделей, обученных на наборе информационных территориальных дескрипторов.

2. Расчет и консолидация территориальных дескрипторов приводят к снижению размерности (положительный эффект) и неизбежной утрате некоторого количества информации об анализируемой территории (отрицательное влияние). Важно найти баланс между двумя обозначенными положениями, чтобы максимально облегчить допустимую емкость модели машинного обучения, повысить ее устойчивость к переобучению, не допустить значительного снижения точности классификации в рамках конкретной решаемой задачи.

3. Совокупный анализ дескрипторов территории, интегрируемых на основе данных из разных источников, дает существенный прирост точности классификации геосистем. В рамках эксперимента, представленного в диссертации, учет дескрипторов, рассчитанных на основе данных космической съемки территории, цифровой модели рельефа и электронной ландшафтной карты, позволил достичь

точности 89 %, что значительно больше этого параметра для сверточной нейросетевой модели. При этом анализ дескрипторов рельефа увеличивает точность на 3 %, а метрик, рассчитанных на основе ландшафтных карт, – на 11 %. Важно то, что картограммы представленных дескрипторов хорошо интерпретируются специалистами в области анализа данных и в науках о Земле. Важными преимуществами предложенного подхода являются его устойчивость в условиях дефицита размеченных данных, характерного для организационных систем значительного территориального охвата, а также возможность повторного использования в рамках исследования новых территориальных систем при условии дообучения и тонкой настройки.

4. Объединение моделей в ансамбль на основе предложенной архитектуры метаклассификатора позволяет повысить устойчивость анализирующей системы. Построение эффективных ансамблей может быть основано на моделях относительно небольшой ширины и глубины, что позволяет проектировать высокоточные классификаторы, обучение которых менее требовательно к вычислительным мощностям. Точность решений, принимаемых ансамблем, имеет тенденцию стремиться к точности наиболее эффективного моноклассификатора системы, а ошибочность системы имеет тенденцию не превышать ошибочность наиболее эффективного классификатора.

5. Интеграция классификаторов в ансамбли позволяет подойти к решению ряда проблем: поиск гиперпараметров классификаторов – за счет комбинированного использования моделей одного типа с разными конфигурациями; подготовка данных для обучения моделей – за счет интеграции в единую систему моделей, обученных на различных комбинациях обучающих и валидационных выборок. Формирование метаклассификатора по предложенному алгоритму позволяет добавить элемент предсказуемости и контроля в использование нейросетевых моделей, традиционно представляющих собой «черный ящик».

5 РЕПОЗИТОРИЙ ГЛУБОКИХ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

5.1 Разработка архитектуры репозитория глубоких нейронных сетей в системе цифровой инфраструктуры пространственных данных

Процесс информационной поддержки принятия управленческих решений в области управления народным хозяйством и реагирования на региональные и глобальные эколого-социально-экономические угрозы должен опираться на использование больших массивов данных, содержащих сведения о пространственно-временной структуре природного потенциала, населения и экономики. Эффективным платформенным решением для формирования информационного пространства, позволяющего оптимизировать разработку проектных решений, направленных на развитие экономики страны и повышение ее обороноспособности, в настоящее время являются цифровые инфраструктуры пространственных данных. Этот класс информационных систем объединяет компоненты хранения, анализа, визуализации и распространения пространственных данных и вступает во взаимодействие с внешними объектами, представленными ключевыми акторами, потребителями и провайдерами пространственных данных.

Решение задач классификации, кластеризации, распознавания образов, принятия решений и прогнозирования на основе больших массивов пространственных данных играет большую роль в народном хозяйстве. Существенное значение среди моделей и алгоритмов анализа данных занимают искусственные нейронные сети. При этом решение задач интеграции и практического использования нейронных сетей встречает множество нерешенных вызовов, важное место среди которых занимает проблема интеграции глубоких нейронных сетей в единую систему с целью формирования удобного инструментария для специалистов в области анализа данных. Этот раздел посвящен решению задачи формирования архитектуры репозитория глубоких нейросетевых моделей для анализа пространственных данных в

целях обеспечения поддержки процесса принятия управленческих решений в области условий устойчивого развития территорий.

Подсистема анализа и синтеза пространственных данных – это неотъемлемый компонент проектно-ориентированной ИПД, который может функционировать как на традиционных жестких, так и на мягких вычислениях, опирающихся на гибридное применение нечеткой логики, искусственных нейронных сетей (ИНС), эволюционное моделирование. В первом десятилетии XXI века сформировалось новое направление в области машинного обучения – глубокое обучение, а также класс методов и принципов машинного обучения, использующих множество уровней нелинейной обработки данных для извлечения и преобразования признаков, анализа и классификации шаблонов. Исследования в области развития методов и алгоритмов глубокого обучения оказали влияние на решение задач, связанных с автоматизированным анализом больших массивов пространственно-временных данных.

Использование глубоких нейросетевых моделей должно иметь проблемную ориентацию. Процессы проектирования архитектуры анализатора, подбора его гиперпараметров, формирования требований к форме выходных данных, консолидации массивов обучающих, проверочных и тестовых выборок должны быть определены особенностями задачи, требующей решения. Важным элементом также выступает качество документации по использованию и гибкой настройке отдельной модели.

Обозначенные положения определяют необходимость формирования репозитория глубоких нейронных сетей в системе цифровой ИПД, систематизированного хранилища, предоставляющего доступ к стандартизированному описанию моделей машинного обучения, а также инструментарию выбора максимально эффективного решения в конкретной проблемной области и определения алгоритма его использования.

Анализ сильных и слабых сторон существующих репозиториях ИНС (AWS Marketplace, Wolfram Neural Net Repository, ONNX) [79], а также критериев эффективности, предъявляемых к подсистеме анализа пространственных данных в

проектно-ориентированных ИПД, позволяет сформировать реестр ключевых вариантов использования репозитория глубоких нейронных сетей, реализация которых перспективна в создании эффективного решения [255].

1. *Навигация по каталогу моделей системы*, характеризующаяся разделением по виду решаемых задач, типу и размерности анализируемых данных, архитектуре, свойствам эффективности.

2. *Подбор и конфигурирование модели с использованием рекомендательной системы*, позволяющей быстро и наглядно осуществить поиск эффективного архитектурного решения и его настройку для решения проектных задач посредством графического веб-интерфейса.

3. *Получение информации о конкретной глубокой нейросетевой модели*, включающей метаописание, показатели эффективности, тип архитектуры, сведения о структурной организации, рекомендации по настройке гиперпараметров, примеры практического использования.

4. *Визуализация моделей глубокого обучения* в рамках веб-интерфейсов в виде граф-схемы с возможностью наглядного онлайн-редактирования архитектуры модели посредством тонкого веб-клиента.

5. *Доступ к предварительно обученным вариантам конкретной модели* с целью их непосредственного использования для решения прикладных задач или дальнейшей тонкой настройки.

6. *Хранение моделей в едином формате* языка описания глубоких нейронных сетей, позволяющем транслировать их в представления, используемые современными фреймворками машинного обучения.

7. *Взаимодействие с унифицированным прикладным программным интерфейсом*, позволяющим осуществлять автоматизированный обмен данными с репозиторием, включая импорт и экспорт глубоких моделей, получение сведений о состоянии базы данных.

8. *Идентификация и аутентификация пользователя для получения доступа* к репозиторию с целью ограничения прав доступа к использованию и редактированию моделей и получения информации о них.

Разработка репозитория глубоких нейронных сетей должна опираться на онтологию, дающую формализованное описание сущностей (топологий ИНС, процессов обучения и оценки точности), а также отношений между ними [63]. Актуальность данного положения определена гипотезой о том, что процесс использования глубокого обучения для решения проектных задач может поддерживаться только при условии того, что полученные знания, эвристики и правила собраны в систему, для которой организованы удобные средства взаимодействия. Для описания онтологии целесообразно использовать формальные языки (такие как *OntoUML*, *IDEF5*, *Web Ontology Language*, *Ontology Interchange Language*, *Resource Description Framework*).

Эффективное использование глубоких нейронных сетей для решения проектных задач требует декомпозиции онтологической модели репозитория на домены моделей машинного обучения, данных и задач (рисунок 5.1). Такая системная организация позволит дать комплексное формализованное определение исследуемой области знаний, сформировать основу для создания платформенного решения с целью консолидации, хранения, подбора и эффективного использования глубоких нейросетевых моделей для решения проблемно-ориентированных задач.

Процесс формирования репозитория глубоких нейронных сетей в системе цифровой ИПД должен быть основан на проектно-ориентированном подходе, исходя из которого каждая хранимая глубокая ИНС должна быть сопоставлена со спектром проектных задач, в рамках которых она может быть использована [204]. Систематизированные в репозитории глубоких нейронных сетей модели машинного обучения и решаемые проектные задачи опираются на консолидированные наборы данных, при этом ключевая роль отводится пространственным информационным массивам: матричным, векторным, атрибутивным.

Домен моделей машинного обучения включает понятия и отношения, описывающие глубокие нейросетевые модели различной топологии и конфигурации, а также методы их обучения [254]. Так как машинное обучение не ограничивается искусственными нейронными сетями и может включать машины опорных векторов, генетические алгоритмы, методы автоматической статистики, было решено

сфокусировать внимание на глубоких нейросетевых моделях, наиболее существенно повлиявших на становление машинного обучения и показавших перспективное значение для решения задачи анализа больших пространственных данных, требующей выявления сложных нелинейных зависимостей.

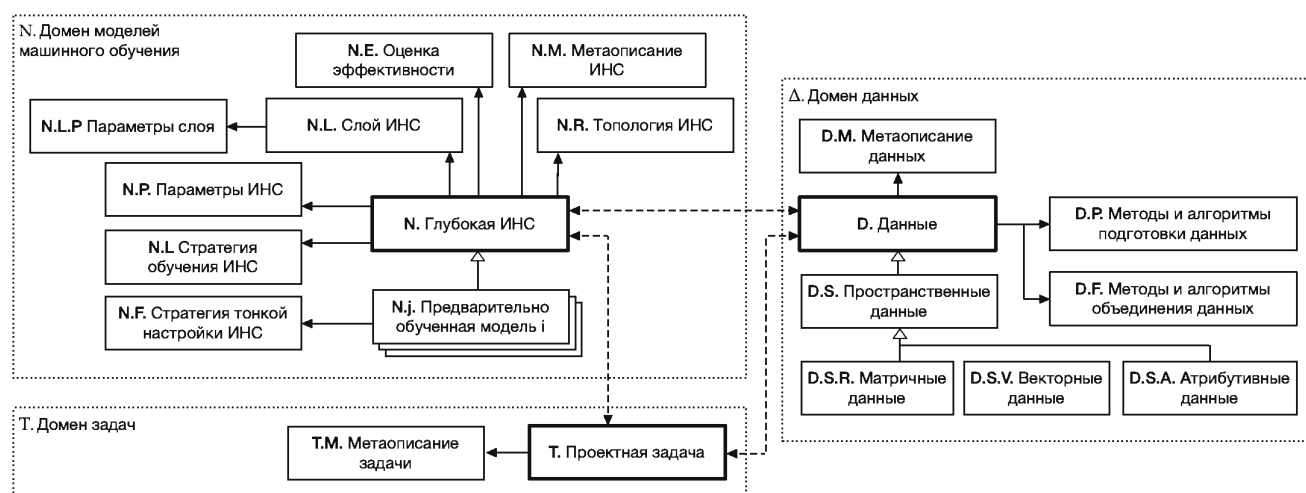


Рисунок 5.1 – Ключевые понятия онтологической модели репозитория глубоких нейронных сетей для пространственного анализа

Модель глубокой ИНС может быть дифференцирована ее топологией, определяющей наличие в ее структуре слоев определенного типа (полносвязные, рекуррентные, сверточные) и связей между ними (ветвящихся, цепочечных). Архитектура нейронной сети определяет формат представления входных данных и вид выходного сигнала модели. Важной характеристикой слоя нейронной сети являются активационные и регуляторные функции. Глубокая нейросетевая модель характеризуется также параметрами (функцией потерь, алгоритмом инициализации и оптимизации) и стратегией обучения (с подкреплением, с учителем, без учителя, с частичным привлечением учителя). Наконец, каждой ИНС целесообразно сопоставить метаописание, включающее руководство для прикладного использования модели, ее системную категорию, характеристику решаемых проектных задач и описание представления анализируемых данных. Интерес для формирования репозитория глубоких нейронных сетей в системе цифровой ИПД представляют не только

модели ИНС, но и их предварительно обученные экземпляры, готовые к решению проектных задач, для которых приведены стратегии тонкой настройки.

Интеграция моделей машинного обучения в репозиторий позволит не просто сформировать банк глубоких ИНС, готовых для решения прикладных задач в области анализа пространственных данных различного типа, но и решить проблему подбора эффективной модели посредством выстраивания системы рекомендаций и развертывания экспертного инструментария, оптимизирующего выбор алгоритмов. Каждая глубокая нейронная сеть должна быть апробирована на тестовых полигонах с целью выявления субъективных и численных оценок ее эффективности.

Архитектура репозитория основывается на онтологической модели хранилища, которая определяет принципы систематизации глубоких моделей анализа пространственных данных по классам решаемых задач, природе и размерности анализируемых данных, архитектуре и топологии. Важной функцией репозитория глубоких нейросетевых моделей является предоставление конечным пользователям, обладающим разными ролями в системе, адаптивных веб-интерфейсов для быстрого получения систематизированной информации об оптимальной в использовании глубокой нейросетевой модели, которая должна включать структурированное описание, показатели эффективности, архитектурную и топологическую организацию, а также рекомендации по гибкой настройке гиперпараметров модели, примеры прикладного использования при решении проектно-ориентированных задач.

5.2 Интеграция данных о глубоких нейросетевых моделях в репозитории

С точки зрения программной реализации каркас системы функционирует на базе паттерна MVC, предполагающего декомпозицию фреймворка проекта на контроллеры, модели и виды. Сделан акцент на разработку адаптивных веб-интерфейсов, позволяющих пользоваться репозиторием при помощи компьютера, подключенного к сети Интернета. Для организации хранилища данных репозитория

нейронных сетей целесообразно использовать несколько подходов к управлению данными.

Модуль визуального редактирования нейросетевых моделей представляет собой один из основных компонентов репозитория и позволяет визуализировать нейросетевые модели в виде граф-схемы с возможностью интерактивного онлайн-редактирования их топологии и архитектуры. Прикладной программный интерфейс на основе паттерна REST обеспечивает возможность унифицированного взаимодействия с целью обмена данными с репозиторием для импорта и экспорта моделей и получения информации о них. Спроектированная архитектура репозитория глубоких нейросетевых моделей и ее программная реализация позволяют подойти к решению задачи интеграции нейронных сетей, предварительно обученных моделей с возможностью их последующего использования для решения проектных задач цифровой экономики. Модуль проектирования нейронных сетей посредством методов визуального программирования представляет собой компонент репозитория глубоких нейросетевых моделей, создаваемого для решения задачи накопления и систематизации моделей и алгоритмов машинного обучения посредством разработки для анализа и прогнозирования развития пространственных процессов с целью поддержки процесса принятия управленческих решений [141].

Следует заметить, что указанная последовательность этапов характерна в общем для работы с искусственными нейронными сетями. Однако для ряда архитектур могут иметься свойственные только им отличия. Данный порядок позволяет увидеть четкий подход к проектированию, концепцию которого можно реализовать при помощи средств блочного подхода в программировании. В области нейронных сетей существует значительное количество библиотек, модулей и паттернов, которые можно внедрять, комбинировать и использовать под широкий набор решаемых задач. Для наглядного отображения разрабатываемых блоков с целью их эффективного применения целесообразно обратиться к парадигме визуального проектирования.

При разработке визуальных языков программирования в качестве основного подхода используются графовые формы, позволяющие реализовать сложные

взаимосвязи объектов. Информативность графового представления алгоритма достигается за счет варьирования цветов, размеров и форм вершин графа, преобразования толщины и внешнего вида дуг, изменения взаимного расположения объектов без изменения топологии графа.

Создание визуального стиля разработки программного обеспечения является основным мотивом разработки технологии графосимволического программирования. Кроме того, эта технология преследует цель автоматизации процессов проектирования, кодирования и тестирования программного обеспечения. Технологии графосимволического программирования повышают наглядность разрабатываемых программных кодов, значительно уменьшают количество ошибок, допускаемых на этапах проектирования и кодирования, и за счет этого ускоряют процесс разработки и повышают надежность разрабатываемых программных кодов. В совокупности с применением блочного подхода методы визуального программирования не только позволяют ускорить разработку за счет простой графической взаимозаменяемости логических блоков, но и обеспечат простую переносимость подобного рода программ.

Практическое использование глубоких нейронных сетей, интегрируемых в репозитории нейросетевых моделей, требует декомпозиции онтологической модели хранилища на системообразующие домены: моделей машинного обучения, данных и задач [121]. Благодаря этому становится возможным создание платформенного решения для консолидации, подбора и эффективного использования новых методов и алгоритмов для решения проблемно-ориентированных задач, связанных с анализом больших пространственных и пространственно-временных данных [122].

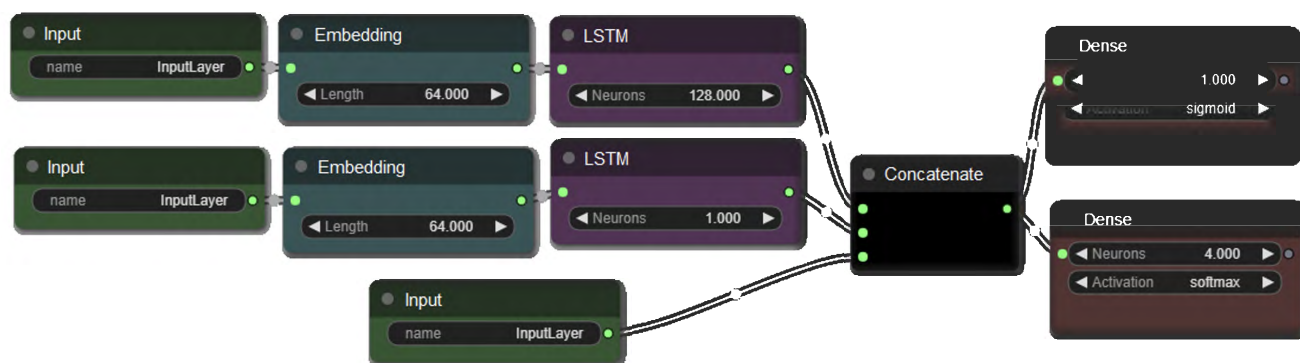
Консолидируемые в репозитории модели машинного обучения и решаемые с их использованием проектные задачи всегда опираются на наборы данных различного типа. Домен моделей машинного обучения при этом описывается понятиями, определяющими глубокие нейросетевые модели различной топологии, и методами, методиками и алгоритмами их обучения. При том что машинное обучение не ограничивается искусственными нейронными сетями, в данном исследовании на них

сделан акцент вследствие того, что алгоритмы данного класса имеют важное значение для эффективного анализа больших пространственных данных, нацеленного на выявление сложных нелинейных зависимостей в них. Практический интерес представляют как модели искусственных нейронных сетей, так и их обученные экземпляры, готовые к решению проектных задач. Каждой модели репозитория при этом целесообразно сопоставить системную категорию, метаописание, руководство для использования, характеристику решаемых проектных задач, описание анализируемых данных и форм их представления.

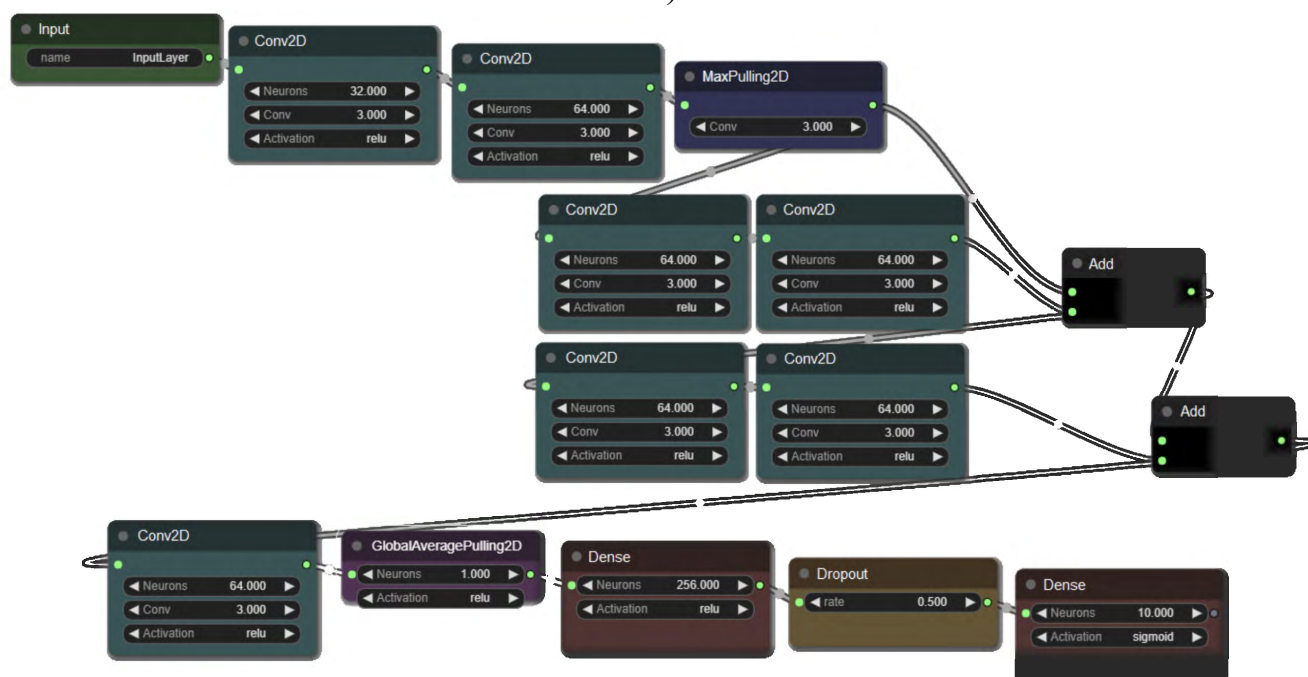
Для эффективного проектирования глубоких нейросетевых моделей был разработан программный комплекс, позволяющий решать обозначенную проблему посредством методов визуального программирования. Этот модуль представляет собой компонент репозитория глубоких нейросетевых моделей, создаваемого для решения задачи накопления и систематизации моделей и алгоритмов машинного обучения. Для того чтобы оценить удобство визуального программирования нейронных сетей, обратимся к моделям с несколькими входами и выходами.

Например, если необходимо разработать систему для ранжирования входных транзакций, поступающих от агентов Интернета вещей по приоритету и для дальнейшей обработки, то разрабатываемая модель может иметь три входа: идентификатор сообщения, ее категория, теги (категориальный ввод). В результате модель должна иметь два выхода: оценка приоритета от 0 до 1 (скалярный сигмовидный выход); алгоритм, обрабатывающий заявку (вывод softmax по набору отделов). Результат проектирования нейронной сети ранжирования транзакций представлен на рисунке 5.2а.

В дополнение к моделям с несколькими входами и выходами рассмотрим манипулирование топологиями нелинейной связи, в которых слои нейронной сети не связаны последовательно. Примером такой архитектуры является ResNet, использующая глубокую «остаточную» структуру обучения. Модель ResNet для CIFAR10 представлена на рисунке 5.2б. Для реализации графического интерфейса модуля проектирования нейросетевых моделей посредством методов визуального программирования использован язык программирования JavaScript [118].



a)



б)

Рисунок 5.2 – Описание глубоких нейросетевых моделей посредством визуального программирования: а – модель с тремя входами и двумя выходами; б – архитектура ResNet

Модуль апробирован при решении задачи формирования базовых моделей нейросетевых архитектур, представленных в открытой нейросетевой библиотеке Keras, в частности Layers API. Модуль визуального редактирования модели позволяет визуализировать нейросетевые модели в виде граф-схемы с возможностью интерактивного онлайн-редактирования топологии и архитектуры модели.

Важным компонентом репозитория глубоких нейросетевых моделей, обладающего функциями навигации, поиска релевантной модели машинного обучения для решения практико-ориентированных задач анализа пространственных данных, является подсистема динамической визуализации моделей на основе адаптивных веб-интерфейсов в виде динамически выстраиваемых графов с возможностью интерактивного редактирования архитектуры и топологии нейросетевой модели посредством веб-клиента.

Графические интерфейсы репозитория нейронных сетей спроектированы исходя из необходимости эффективного решения задачи предоставления информации о конкретной нейросетевой модели (в том числе систематизированное описание, класс архитектуры, формат анализируемых и выходных данных, сведения о топологии, субъективные и объективные показатели эффективности, рекомендации по тонкой настройке модели, примеры практико-ориентированного использования). Применение методов визуального программирования для описания сложных архитектур нейронных сетей позволяет значительно ускорить процесс их разработки и уменьшает количество ошибок за счет повышения наглядности.

С целью оптимизации процессов интеграции и практического использования глубоких нейросетевых моделей была разработана формализованная схема хранения моделей в форме метаязыка, которая делает возможной их конвертацию в представления, используемые современными фреймворками машинного обучения. Представим описание спроектированного метаязыка с позиции теоретико-множественного подхода и примем в качестве универсального множества набор моделей репозитория *MODELS*, мощность которого определяется числом моделей репозитория:

$$MODELS = \{MODEL_i | 1 \leq i \leq N \wedge i \in \mathbb{Z}\}. \quad (5.1)$$

Топология конкретной глубокой нейросетевой модели $MODEL_i$ может быть представлена в виде граф-схемы $GRAPH_i$ и структурированного метаописания $META_i$. В свою очередь метаописание модели формируется на основе массива дескрипторов $DESCRIPTORS_i$ (включающего название модели, аннотированное описание, метрики эффективности и т. д.) и параметров сборки $COMPILATION_i$. Граф-

схема модели $GRAPH_i$ представляет собой ориентированный граф, множество вершин $LAYERS_i$ которого определяет набор слоев глубокой нейросетевой модели, а множество дуг $LINKS_i$ – структуру нейронной сети, устанавливая направленные связи между слоями.

$$MODEL_i = \langle META_i, GRAPH_i \rangle == \langle \langle DESCRIPTORS_i, COMPILATION_i \rangle, \langle LAYERS_i, LINKS_i \rangle \rangle. \quad (5.2)$$

Кортеж параметров сборки модели $COMPILATION_i$ включает объект $optimizer_i$, описывающий методы и алгоритмы оптимизации нейросетевой модели (в том числе стохастический градиентный спуск (SGD), адаптивную оценку модели (Adam) и другие), а также параметры их функционирования. Функция потерь $loss_i$ определяет параметры, которые модель должна стремиться минимизировать в процессе обучения для решения задач регрессии и классификации. Наконец, объект $metrics_i$ определяет функцию, используемую для оценки эффективности модели, при этом рассчитываемые значения метрик не применяются в процессе обучения модели. Различные метрики могут быть привлечены при формировании моделей для решения задач мультиклассовой и бинарной классификации, регрессии, сегментации. Описание кортежа параметров сборки модели с позиции теоретико-множественного подхода выглядит следующим образом:

$$COMPILATION = \langle optimizer_i, loss_i, metrics_i \rangle. \quad (5.3)$$

Важным компонентом графовой модели глубокой нейросетевой модели i выступает слой $LAYER_{ij}$, который с точки зрения формализованного описания модели может быть представлен в виде набора объектов, определяющих тип и архитектуру слоя $TYPE_{layer_{ij}}$, набора интерфейсов слоя $INTERFACES_{ij}$, аргументов $PROPERTIES_{ij}$, определяющих особенности функционирования слоя, дескрипторов визуализации $VISUAL_{ij}$, определяющих особенности визуализации модели в рамках адаптивных веб-интерфейсов:

$$LAYER_{ij} = \langle TYPE_{layer_{ij}}, INTERFACES_{ij}, PROPERTIES_{ij}, VISUAL_{ij} \rangle. \quad (5.4)$$

Объект $TYPE_{layer}$ определяет архитектуру слоя и в решающей степени задает особенности обработки данных и настройки гиперпараметров при обучении

модели. Базовые слои модели (группа BASE) представлены следующими архитектурами: входной слой (Input), полносвязный слой (Dense), а также пользовательский программируемый слой (Custom Layer), архитектурная организация которого может быть задана пользователем. Слои для построения сверточных моделей (группа *CONVOLUTION*) включает сверточные слои, обрабатывающие данные различной размерности (Convolution), слои разделимой свертки (Depthwise Separable Convolution), а также слои субдескрипции (Pooling). Рекуррентные слои представлены архитектурами полносвязного рекуррентного слоя (RNN), слоя долгой кратковременной памяти (LSTM), управляемых рекуррентных блоков (GRU), сверточного слоя долгой кратковременной памяти (Convolutional LSTM). Наконец, метаязык описания глубоких нейросетевых моделей поддерживает слои изменения размерности (Reshape), объединения и слияния (Fusion), поэлементного слияния на основе математических операций (Add, Average, Maximum, Minimum, Multiply, Subtract). Отдельную группу составляют слои регулирования и прореживания (Regularization).

Параметры интерфейса $INTERFACES_{ij}$ слоя $LAYER_{ij}$ (входов $INPUTS_{ij}$ и выходов $OUTPUTS_{ij}$) определяются кортежем параметров $\langle name, type \rangle$, где объект $name$ задает имя интерфейса, $type$ – тип и размерность данных.

$$INTERFACES_{ij} = \langle INPUTS_{ij}, OUTPUTS_{ij} \rangle = \langle \{INPUTS_{ij\lambda} | 1 \leq \lambda \leq \Lambda \wedge \lambda \in \mathbb{Z}\}, \{OUTPUTS_{ij\mu} | 1 \leq \mu \leq M \wedge \mu \in \mathbb{Z}\} \rangle. \quad (5.5)$$

Набор аргументов $PROPERTIES_{ij}$ задает гиперпараметры, определяющие модель функционирования слоя $LAYER_{ij}$. Данный набор именованных аргументов может отличаться для слоев разной архитектуры и включать, например, указание методов и алгоритмов инициализации весов слоя и регулирования функций активации.

Наконец, с целью обеспечения наглядной визуализации глубоких нейросетевых моделей в рамках адаптивных веб-интерфейсов метаязык предполагает хранение параметров группы $VISUAL_{ij}$, не отвечающих за функциональные особенности нейронной сети, но определяющих аспекты ее наглядного графического

отображения. Объект группы $META_{ij}$ характеризуется заголовком $title_{ij}$ и схемой визуализации $scheme_{ij}$, определяющей цветовое оформление слоя в рамках веб-интерфейсов и другие стили. Элементы кортежа $POSITION_{ij}$ определяют координаты top_{ij} и $left_{ij}$ расположения слоя на полотне визуализации, а кортежа $SIZE_{ij}$ – его размеры $width_{ij}$ и $height_{ij}$.

$$\begin{aligned} VISUAL_{ij} &= \langle META_{ij}, POSITION_{ij}, SIZE_{ij} \rangle = \\ &= \langle \langle title_{ij}, scheme_{ij} \rangle, \langle top_{ij}, left_{ij} \rangle, \langle width_{ij}, height_{ij} \rangle \rangle. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Для объединения слоев $LAYERS_i$ модели i в единую модель вводится множество связей $LINKS_i$, в котором каждый объект характеризуется набором параметров, определяющих слой-источник ($LAYER_{origin}$) и его выходной интерфейс ($OUTPUT_{origin}$), а также слой-приемник ($LAYER_{target}$) и его входной интерфейс ($INPUT_{target}$).

$$LINK_{ij} = \langle \langle LAYER_{origin}, OUTPUT_{origin} \rangle, \langle LAYER_{target}, INPUT_{target} \rangle \rangle. \quad (5.7)$$

Описанная формализованная схема хранения нейросетевых моделей в форме метаязыка может быть экспортирована в формате XML или JSON с целью обеспечения дальнейшего использования модели или ее редактирования.

Практическую ценность репозиторий приобретает при достижении возможности трансляции графического представления моделей в программный код. Разработка формализованной схемы хранения моделей глубокого машинного анализа пространственных данных в форме метаязыка позволяет осуществить их конвертацию в представления, используемые современными фреймворками машинного обучения.

Для решения задачи трансляции графического представления нейросетевой модели в программный код ее структура должна быть описана ориентированным ациклическим графом, орграфом без направленных циклов, но с возможным наличием параллельных путей из одного узла в другой [124]. Вершины графа при этом представляют собой слои или блоки, а ребра – связи и ограничения, согласно которым определяется топологическая структура модели. Ключевым алгоритмом преобразования графического представления модели в инструкции на языке

программирования общего назначения может стать топологическая сортировка, представляющая собой линейное упорядочение вершин ориентированного ациклического графа согласно частичному порядку, заданному ребрами этого графа на множестве его вершин, такое, что для каждого направленного ребра вершины-источника к конечной вершине вершина источника становится предшествующей.

Классические алгоритмы топологической сортировки имеют линейную асимптотическую сложность, оцениваемую как сумма количества узлов графа и его ребер: $O(|V| + |E|)$. Так, алгоритм, описанный А. Каном в [189], осуществляет выбор вершин в порядке, удовлетворяющем требованию топологической сортировки (рисунок 5.3).

Для выполнения алгоритма необходимо сформировать графовую структуру G на основе граф-схемы модели *GRAPH*. Для этого в нее необходимо перенести множество вершин-слоев *LAYERS* и связей *LINKS*.

После этого в графе нейросетевой модели G необходимо найти список стартовых узлов, не имеющих входящих связей, и добавить их в множество S . Затем необходимо осуществить итерационное перемещение вершин-слоев из множества S в множество L . После этого для перемещенной вершины n осуществляется выбор всех вершин-слоев m , для которых узел n является предшествующим на основе связи e . По выполнении этой операции связь e удаляется из графа G . Если при этом вершина-слой m не имеет входящих связей, ее необходимо добавить в множество S . Обозначенную последовательность шагов необходимо выполнять до тех пор, пока множество S не станет пустым. Если при этом в графе G не осталось связей, то алгоритм можно считать выполненным успешно, при этом структура данных L будет содержать топологически упорядоченное множество вершин. В противном случае можно говорить о том, что исходный граф содержит циклы, что приводит к невозможности трансляции графической модели.

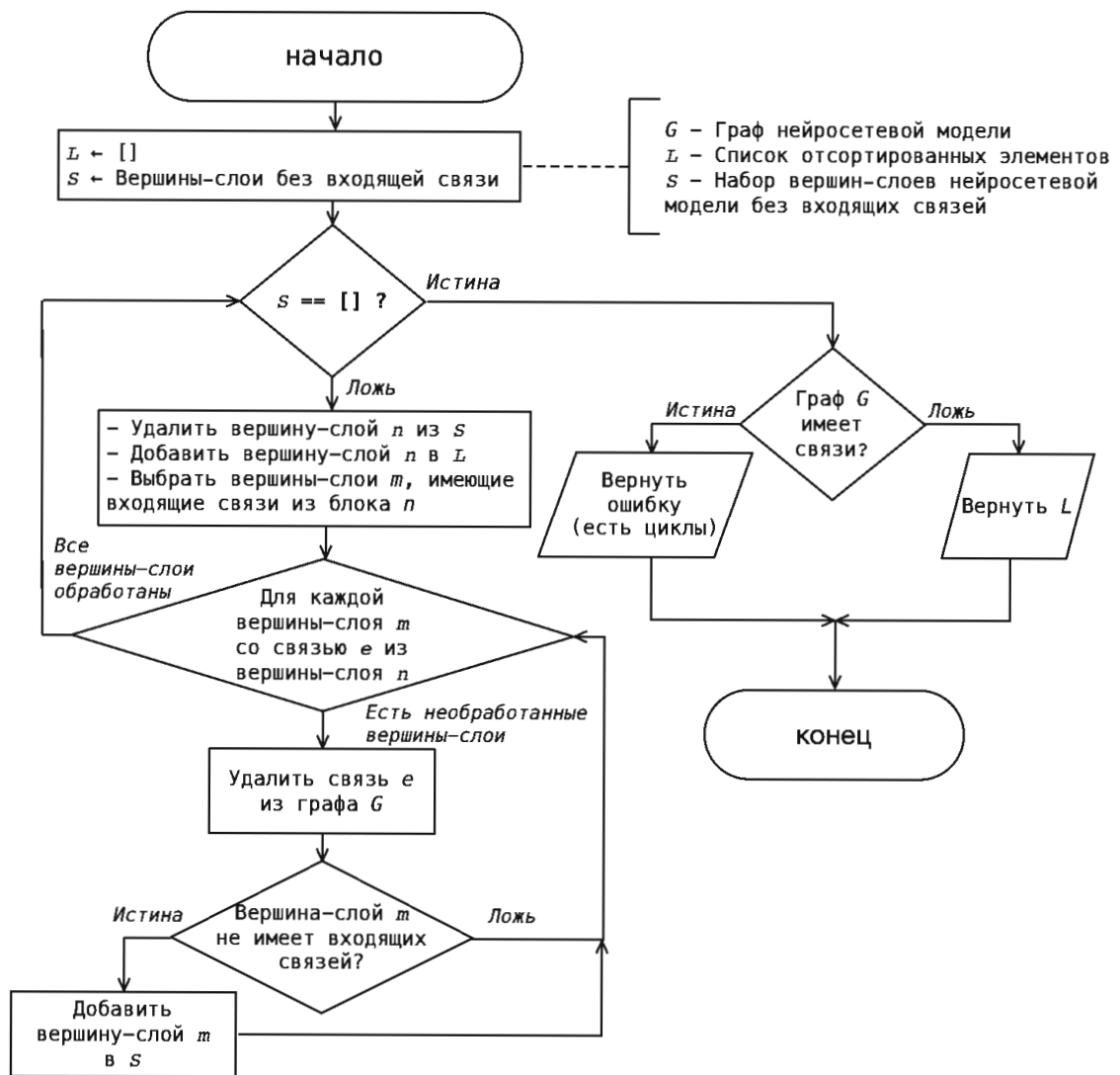


Рисунок 5.3 – Алгоритм топологической сортировки блоков нейросетевой модели на основе алгоритма Кана

Достичь асимптотической сложности $O(|V|)$ можно за счет модификации алгоритма с использованием стратегии поиска в глубину с добавлением слоя-вершины в момент выхода из нее с применением рекурсии. Алгоритм перебирает слой-вершины графа G в произвольном порядке, иницируя поиск в глубину, завершающийся при достижении терминального слоя-вершины или вершины, которая уже была посещена алгоритмом ранее при выполнении топологической сортировки. На верхнем уровне декомпозиции (рисунок 5.4) алгоритм топологической сортировки блоков нейросетевой модели на основе стратегии поиска в глубину обрабатывает вершины-слои графа G , которым по умолчанию не сопоставлен ни один тип меток (временных или постоянных).

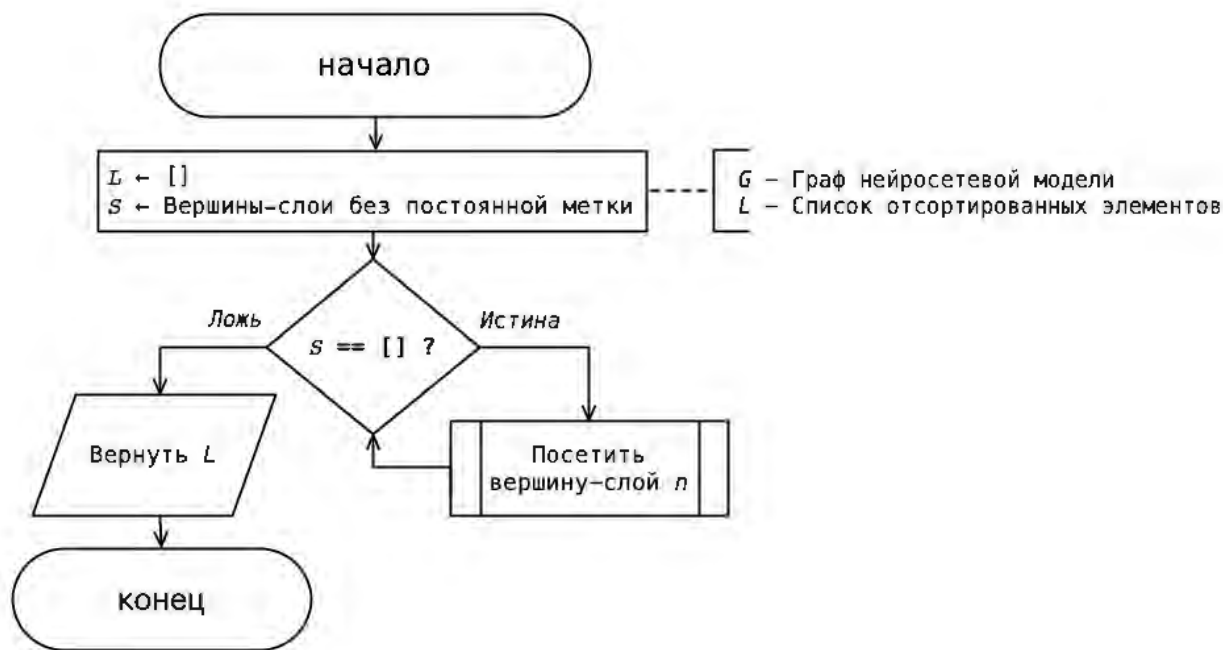


Рисунок 5.4 – Инициализирующий компонент рекурсивного алгоритма топологической сортировки слоев-вершин нейросетевой модели

Алгоритм посещения вершины-слоя (рисунок 5.5) включает несколько этапов. Сначала осуществляется проверка наличия у слоя-вершины меток: в случае наличия постоянной метки посещение вершины завершается, а в случае наличия временной метки – завершается выполнение всего алгоритма с выводом о наличии циклов в анализируемом графе нейросетевой модели. Затем посещаемой вершине сопоставляется временная метка и выбираются все последующие за счет связей вершины-слои. Для каждой из них в свою очередь рекурсивно запускается алгоритм посещения вершины. Наконец, после обхода всех последующих вершин посещаемая вершина-слой добавляется в начало топологически упорядоченного множества вершин L , для нее удаляется временная метка и добавляется постоянная.

Таким образом, обработка вершин-слоев графа без постоянных меток в итоге приведет к формированию топологически отсортированного списка слоев нейросетевой модели. На основе полученной структуры данных при использовании информации о связях в графе нейросетевой модели можно осуществить

последовательную генерацию программного кода на языке программирования общего назначения.

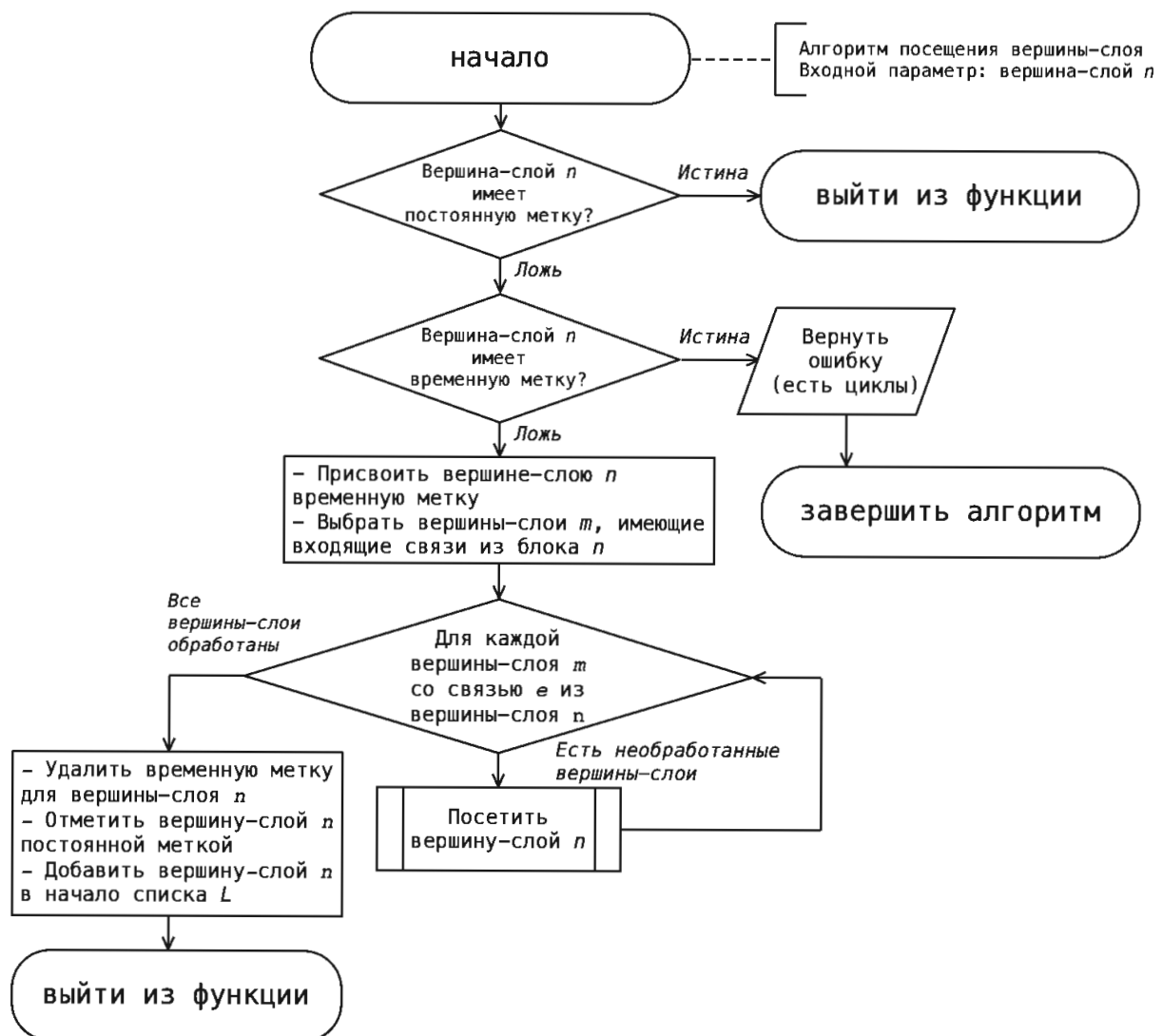


Рисунок 5.5 – Рекурсивный алгоритм топологической сортировки слоев-вершин нейросетевой модели на основе стратегии поиска в глубину

В рамках репозитория нейросетевых моделей для анализа пространственных данных реализована трансляция графического представления моделей в представление на языке Python, основанное на применении каркаса глубокого машинного обучения Keras [86], предоставляющего гибкие прикладные программные интерфейсы для построения нейросетевых моделей поверх платформы машинного обучения TensorFlow [234].

Интерес представляют функциональные программные интерфейсы Keras, позволяющие организовывать гибкие модели с ветвящейся нелинейной топологией, обобщенными блоками и множеством входов и выходов. Возможности функциональных программных интерфейсов в полной мере удовлетворяют требованию информативного отображения предложенной графовой структуры глубокой нейросетевой модели репозитория в программный код на языке программирования общего назначения.

Для описания синтаксической организации программного кода для нейросетевой модели целесообразно использовать синтаксические диаграммы [245] и форму Бэкуса–Наура (БНФ) [211], инструменты, основанные на методологическом аппарате контекстно-свободных грамматик, использующиеся несколько десятилетий и хорошо зарекомендовавшие себя.

Для трансляции графовой модели в программный код необходимо сформировать следующие программные блоки:

1. Подключение модулей каркаса исходя из слоев-вершин графовой модели нейронной сети; определение настроенных переменных и их значений с целью их дальнейшего использования в рамках глубокой нейросетевой модели.

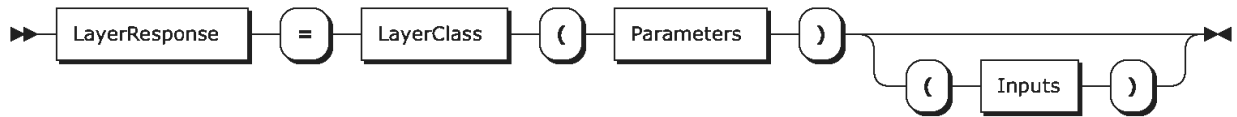
В случае использования пользовательских слоев и блоков на их основе, не определенных в Keras, обеспечивается возможность импорта необходимого программного кода посредством подключения нужного компонента.

2. Вывод топологически отсортированных инструкций, направленных на генерацию структуры нейронной сети на основе сформированной графовой модели; группировка слоев нейросетевой модели в объект с функциями обучения и вывода.

Синтаксическое определение слоя нейросетевой модели представлено на рисунке 5.6а. Объект `LayerResponse` определяется как имя переменной `NAME` языка Python [163], в которой хранятся данные о слое нейросетевой модели. `LayerClass` определяет класс слоя нейросетевой модели, который может быть частью Keras, либо определяться пользователем вне этой библиотеки машинного обучения. Блок `Parameters` представляет собой список параметров-свойств слоя, а `Input` определяет

входящий поток данных для слоя, который не указывается для входных слоев нейросетевой модели.

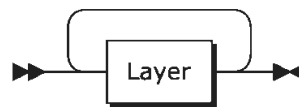
Layer:



Layer ::= LayerResponse '=' LayerClass '(' Parameters ')' ('(' Inputs ')')?

а

Topology:



Topology ::= Layer+

б

Рисунок 5.6 – Синтаксическая диаграмма и ее БНФ-конструкция для описания: а – слоя нейросетевой модели; б – топологии нейросетевой модели

Тип и параметры слоя, а также источник входных данных для него определяются исходя из атрибутивных параметров вершин-слоев графа модели, а также знаний о связях между ними.

Вследствие того что топологическая сортировка вершин-слоев графа модели нейронной сети предшествует этапу отображения графического представления в код на языке программирования общего назначения, описание топологии сети сведется к последовательному выводу топологически отсортированных слоев (рисунок 5.6б).

3. Компиляция модели с определением параметрически заданной функции оптимизации, оценкой потерь, оценочных метрик и других параметров обучения; описание инструкции по обучению модели в течение фиксированного количества эпох на основе определенных параметров валидации и других настроек.

Формирование перечня параметров компиляции (CompilationParameters) и обучения (TrainParameters) модели в нотации языка Python производится на основе

данных промежуточной формализованной схемы хранения нейросетевых моделей в формате XML или JSON (рисунок 5.7).

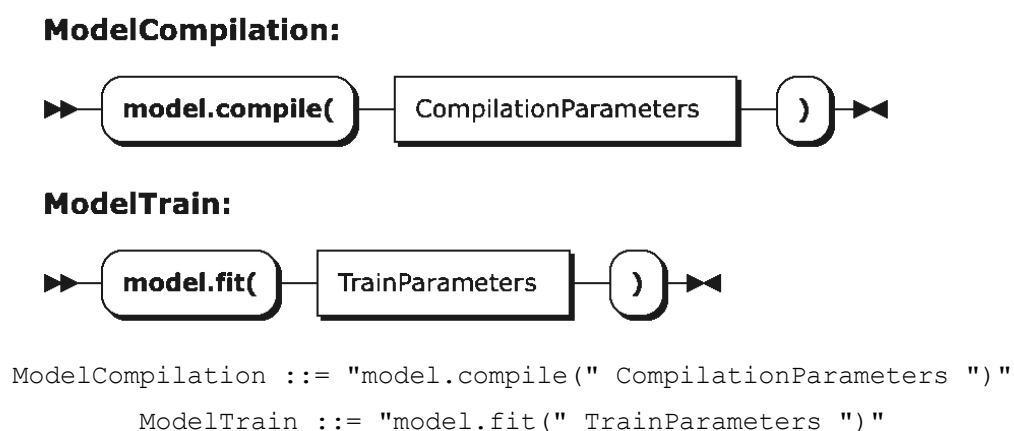


Рисунок 5.7 – Синтаксическая диаграмма и ее БНФ-конструкция для модулей компиляции и обучения модели

В рамках репозитория нейросетевых моделей реализована трансляция графического представления модели в код на языке MATLAB. Алгоритм работы транслятора имеет схожую структуру с тем исключением, что в нотации языка MATLAB и пакета прикладных модулей Deep Learning Toolbox знания об узлах и связях графа нейросетевой модели хранятся в отдельных массивах.

5.3 Программная реализация графических пользовательских и прикладных программных интерфейсов репозитория

Программная реализация репозитория осуществлялась на основе артефактов стадии объектно-ориентированного проектирования, включая определение вариантов использования системы, построение структурных и поведенческих UML-диаграмм. Для систематизации функциональных требований к репозиторию сформируем UML-диаграмму прецедентов (рисунок 5.8).

Стартовый вариант использования репозитория описан прецедентом «L. Авторизация в репозитории», целью которого является обеспечение разграничения прав на чтение, использование и редактирование нейросетевых моделей.

Обозначенный функционал реализуется путем предоставления неавторизованному пользователю формы для ввода аутентификационных данных.

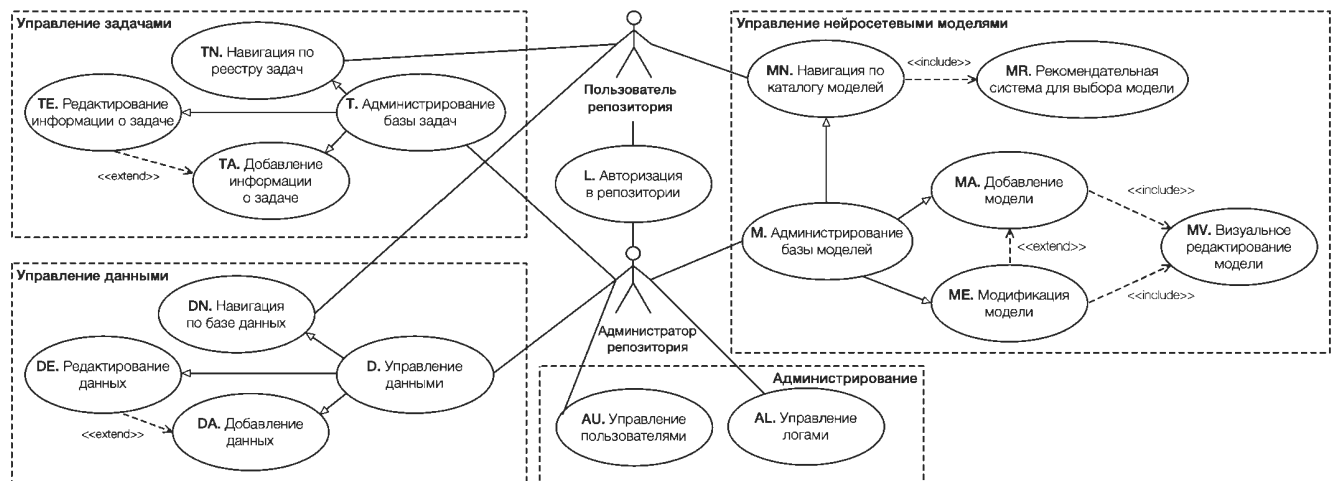


Рисунок 5.8 – Диаграмма прецедентов репозитория глубоких нейросетевых моделей

После авторизации в системе пользователь получает доступ к отдельным модулям репозитория исходя из имеющихся прав. С точки зрения программной реализации описываемая программная система функционирует на базе паттерна MVC, предполагающего декомпозицию фреймворка проекта на контроллеры (модули, предназначенные для описания программной бизнес-логики), модели (компоненты для манипулирования данными) и виды (наборы шаблонов для формирования адаптивных веб-интерфейсов). Такая организация системы позволяет повысить связанность отдельных модулей репозитория и ослабить сцепленность между ними. Группа вариантов использования «Администрирование» включает два прецедента: «AU. Управление пользователями» (осуществляющий управление распределением ролей, добавлением, редактированием, удалением метаданных о пользователях) и «AL. Управление логами» (формирующий возможность просмотра логов системы с возможностью поиска и фильтрации с целью модерации операционных процессов работы с репозиторием).

Группа прецедентов «Управление нейросетевыми моделями» включает варианты использования, формирующие ядро системы. Интегрирующий прецедент «М.

Администрирование базы моделей» декомпозируется на функциональный блок «MN. Навигация по каталогу моделей» (посредством системы фильтров), включающий модуль «MR. Рекомендательная система для выбора модели» (позволяющий обеспечивать релевантный поиск, подбор и конфигурирование глубоких нейронных сетей, тонкую настройку моделей для решения конкретных проектных задач в области анализа пространственных данных). CRUD-подсистема управления данными о моделях включает также вариант использования «MA. Добавление модели» и расширяющий его функционал «ME. Модификация модели», позволяющий создавать и редактировать глубокие нейронные сети.

Отдельно приведем описание функционального компонента «MV. Визуальное редактирование модели» как составного блока описываемой CRUD-подсистемы, позволяющего визуализировать нейросетевые модели глубокого обучения в виде граф-схемы с возможностью интерактивного онлайн-редактирования топологии и архитектуры модели посредством тонкого клиента (веб-браузера). Для реализации функционала визуального редактирования модели использован язык программирования JavaScript, компонент апробирован при формировании моделей нейросетевых архитектур, представленных в открытой нейросетевой библиотеке Keras. Разработка формализованной схемы хранения моделей глубокого машинного анализа пространственных данных в форме метаязыка позволила осуществить возможность их конвертации в представления, используемые современными фреймворками машинного обучения. Прикладной программный интерфейс, спроектированный на основе архитектурного паттерна REST, обеспечивает возможность унифицированного взаимодействия с целью обмена данными с репозиторием для импорта и экспорта нейросетевых моделей и получения информации о них.

Согласно разработанной ранее онтологической модели домен глубоких нейросетевых моделей должен быть ассоциирован с доменами проектных задач и анализируемых данных. Соответствующие обозначенным предметным областям прецеденты также реализованы в репозитории в виде CRUD-подсистем «Администрирование базы задач» (основана на вариантах использования «TN. Навигация по реестру задач», «TA. Добавление информации о задаче», «TE. Редактирование

информации о задаче») и «Управление данными» (сформирована прецедентами «DN. Навигация по базе данных», «DA. Добавление данных», «DE. Редактирование данных»).

Разработка графических интерфейсов репозитория проведена с использованием методологий проектирования UI/UX на основе программного стека веб-технологий, что позволит использовать репозиторий из любой точки мира, подключенной к сети Интернет.

Графические веб-интерфейсы решают задачу предоставления информации о конкретной модели нейронной сети (включая систематизированное описание, класс архитектуры, формат анализируемых и выходных данных, информацию о топологии, субъективные и объективные показатели эффективности, рекомендации по тонкой настройке модели, примеры практического использования). Для повышения удобства взаимодействия с репозиторием внедрена подсистема визуализации моделей обучения на основе адаптивных веб-интерфейсов в виде динамически выравняемых графов с возможностью интерактивного редактирования архитектуры и топологии нейросетевой модели через тонкий веб-клиент (браузер) (рисунок 5.9).

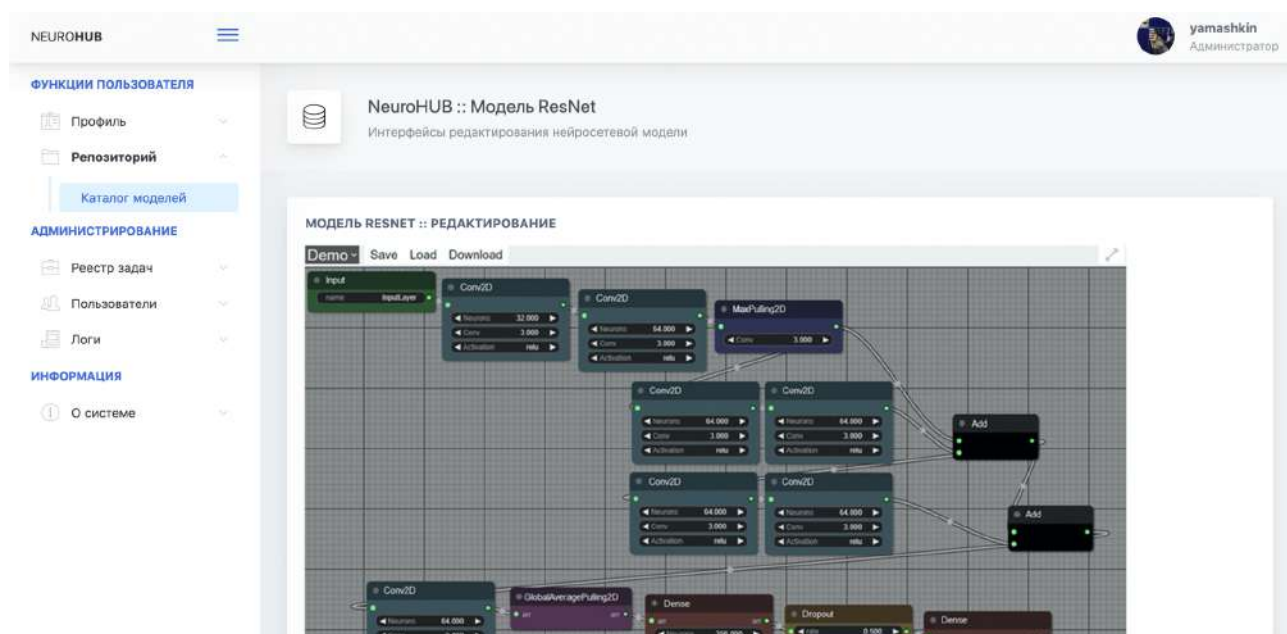


Рисунок 5.9 – Графические интерфейсы редактирования глубокой нейросетевой модели

Графические веб-интерфейсы репозитория моделей глубоких нейронных сетей оснащены функциями навигации, позволяющими выбирать актуальную модель машинного обучения для решения конкретных задач анализа пространственных данных с любого устройства, подключенного к сети Интернет (через веб-браузер). Подсистемы аутентификации пользователей в системе репозитория имеют задачу разграничения прав на выбор, использование и редактирование моделей.

В системе репозитория каждый модуль развернут на основе микросервисной архитектуры, а согласованность данных для всей системы обеспечивает кластерная архитектура мультимодельного хранилища данных. Перед началом выполнения операции все узлы кластера должны согласиться, что проведение операции возможно, а затем должна выполняться фиксация изменений на всех узлах. Характеристика долговечности данных определяет устойчивость хранимых в репозитории данных к потере. В базах данных, которые обладают долговечностью, данные сохраняются после завершения транзакции, даже если происходит отключение электроэнергии или сбой системы.

Прикладные программные интерфейсы репозитория нейросетевых моделей реализованы с использованием архитектурного стиля REST и позволяют обеспечить унифицированное взаимодействие внешних программных систем с репозиторием для программного обмена данными, включая операции экспорта глубоких моделей, их редактирование, извлечение структурированных данных и другие варианты использования [120]. REST API выстраивается на основе организации нескольких конечных точек доступа к извлечению данных. Наличие нескольких конечных точек увеличивает количество вызовов «клиент-сервер» для получения данных, что может являться более эффективным решением, чем использование одной конечной точки.

Прикладные программные интерфейсы репозитория нейросетевых моделей анализа пространственных данных (рисунок 5.10) представляют набор программируемых инструкций и характеристик, которые предоставляются для связи репозитория нейросетевых моделей с внешними системами: подсистемами анализа пространственных данных цифровых инфраструктур пространственных данных,

внешними облачными системами анализа данных, а также микросервисами в рамках проектно-ориентированных геопортальных систем.

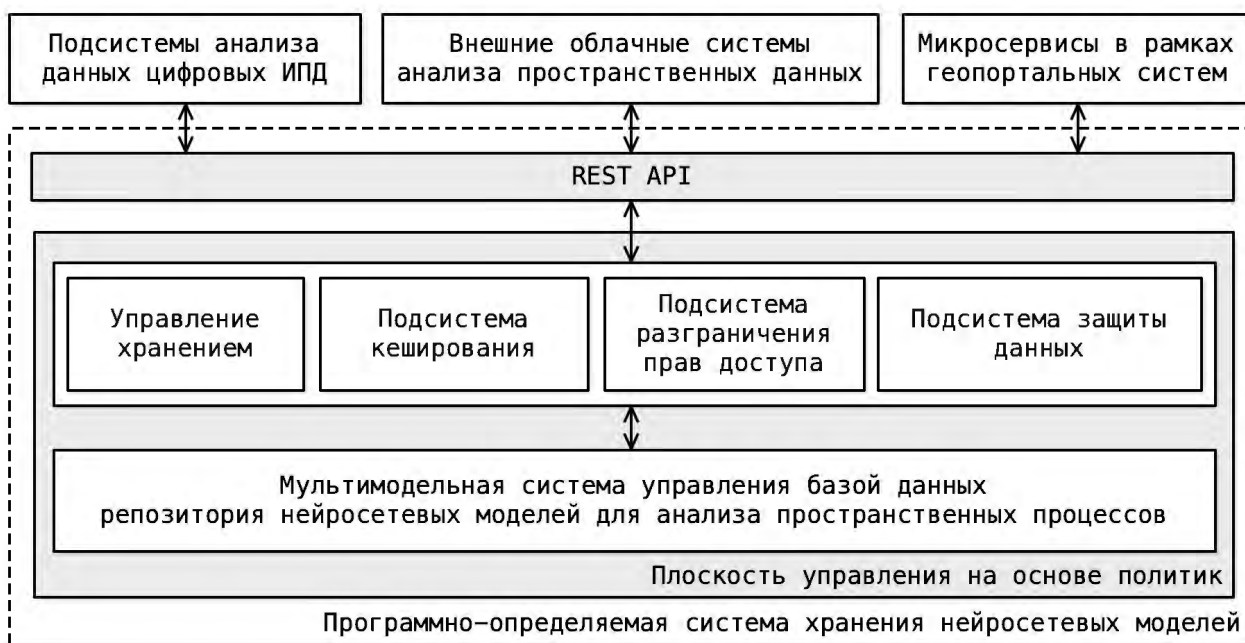


Рисунок 5.10 – Программные интерфейсы репозитория как компонент программно-определяемой системы хранения нейросетевых моделей

Программными интерфейсами при этом регламентируется набор процедур, которые могут быть вызваны из программно-аппаратного компонента для взаимодействия с репозиторием.

Прикладные программные интерфейсы репозитория позволяют интегрировать сервисы управления данными о доступных нейросетевых моделях в существующую программную инфраструктуру, обеспечивают выполнение требуемого функционала об уровне обслуживания. Они активируют процессы выделения ресурсов хранения, управления и сбора данных, позволяют расширять функциональность и выполнять интеграцию с внешними платформами и приложениями. посредством внедрения программных интерфейсов достигается решение задачи абстрагируемости внешних систем от сложных аспектов хранения нейросетевых моделей и предоставления унифицированного внешнего представления инфраструктуры хранения данных. От внешних систем при этом инкапсулируется сложная многослойная архитектура плоскости управления данными на основе политик,

включающая модули управления хранением, подсистемы защиты данных, кеширования и разграничения прав доступа.

Прикладные программные интерфейсы на основе архитектурного стиля REST позволяют обеспечить решение следующих задач.

- автоматизация процесса программного импорта моделей в проекты на языке программирования высокого уровня (например, Python и Matlab);
- экспорт разработанных моделей в систему репозитория на основе метаязыка, обеспечивающего однозначное отображение моделей как в структуру программного кода, так и в блоки данных для записи в базу данных;
- администрирование ключевых каталогов репозитория: реестра нейросетевых моделей, пространственных данных и проектных задач;
- программное управление ключевыми ролями и правами доступа пользователей системы.

Прикладные программные интерфейсы должны обеспечивать структурированный обмен данными о нейросетевых алгоритмах, способствующий передаче полной информации о хранимых моделях. На рисунке 5.11 представлены ключевые компоненты домена искусственных нейронных сетей в рамках репозитория, к наиболее важным из которых следуют отнести параметры искусственной нейронной сети, ключевые слои различной архитектуры, параметры функционирования этих слоев, блоки метаописания, знания о топологической организации. Важное место занимает вопрос хранения и передачи данных о предварительно обученных моделях пригодных для использования при анализе конкретных пространственных данных в рамках решения проектных задач, в том числе после тонкой настройки. Компоненты домена искусственных нейронных сетей в рамках репозитория определяют структуру запросов к проектируемым программным интерфейсам: методы API определяют данные, с которыми производится взаимодействие, а посредством передаваемых параметров конкретизируются наборы извлекаемой информации, вносимые в базу данных изменения и формат ответа.

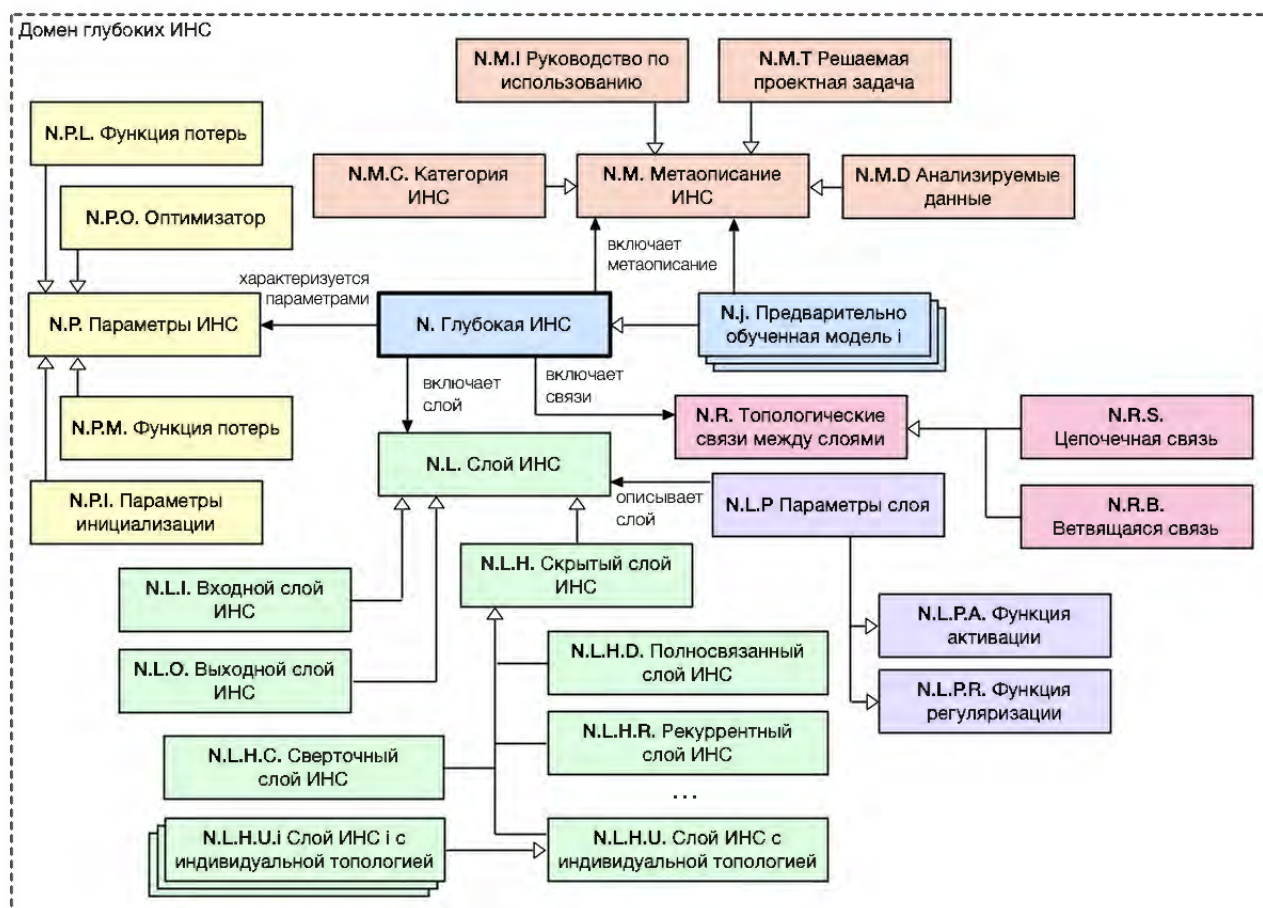


Рисунок 5.11 – Компоненты домена искусственных нейронных сетей
в рамках репозитория

Одновременно с этим, в отличие от случая использования графических пользовательских интерфейсов, программные интерфейсы не передают набор данных, связанных с рендерингом визуальных веб-форм, а обмениваются документно-определенным набором жестко структурированных данных в формате JSON.

5.4 Выводы по пятой главе

1. Внедрение репозитория глубоких нейросетевых моделей позволяет решить задачу интеграции моделей анализа данных с возможностью их последующего использования для решения проектных задач при обеспечении поддержки процесса принятия управленческих решений в организационных природных и социальных системах. Реестр вариантов использования репозитория включает прецеденты

навигации по каталогу моделей, получения информации о глубокой нейросетевой модели, визуализации моделей.

2. Процесс формирования репозитория глубоких нейронных сетей должен быть основан на проектно-ориентированном подходе, исходя из которого каждая хранимая глубокая ИНС должна быть сопоставлена со спектром проектных задач, в рамках которых она может быть использована. Практическое применение глубоких нейронных сетей, интегрируемых в репозитории, требует декомпозиции онтологической модели хранилища на системообразующие домены: моделей машинного обучения, данных и задач.

3. С точки зрения программной реализации каркас системы функционирует на основе архитектурного паттерна MVC, предполагающего декомпозицию фреймворка проекта на контроллеры, модели и виды. Сделан акцент на разработку адаптивных веб-интерфейсов, позволяющих пользоваться репозиторием при помощи компьютера, подключенного к сети Интернет. Модуль визуального проектирования нейросетевых моделей представляет собой один из основных компонентов репозитория и позволяет визуализировать нейросетевые модели в виде граф-схемы с возможностью интерактивного онлайн-редактирования их топологии и архитектуры.

4. Для оптимизации процессов интеграции и практического использования глубоких нейросетевых моделей разработана формализованная схема хранения моделей в форме метаязыка, которая делает возможной их конвертацию в представления, используемые современными фреймворками машинного обучения. Реализована трансляция графического представления моделей в представление на языке высокого уровня. Организация прикладного программного интерфейса реализована на основе концепции REST, позволяющей обеспечить унифицированное межмашинное программное взаимодействие с системой.

6 ГЕОПОРТАЛЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ТЕРРИТОРИАЛЬНО РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ

6.1 Принципы разработки и оптимизации геопортального каркаса

Пространственные данные играют значительную роль в экономике стран и регионов, служат основой для цифровой трансформации отраслей, представляя собой инструмент поддержки принятия решений в процессе управления организационными территориально распределенными системами. Это связано с тем, что цифровая информация о местоположении природных ресурсов, подвижных и инфраструктурных антропогенных объектов используется в большинстве технологических и информационных процессов в рамках решения задач государственного управления, организации коммерческой деятельности, формирования связности и рационализации поведения участников социальных и культурных общностей [70, 108].

Цифровизация экономики предполагает необходимость трансформации технологий сбора и интеграции, обработки и анализа, распространения и эффективного использования пространственных данных. В рамках решения задачи сбора данных актуальное значение имеет развитие технологий аэро- и космического мониторинга земель и Интернета вещей. Обработка и анализ пространственных данных сегодня в значительной мере должен опираться на технологии машинного обучения и искусственного интеллекта, внедрение облачных вычислений и распределенных вычислений. Практическую ценность консолидируемые массивы пространственных данных приобретают при условии предоставления возможности их гибкого использования представителями определенных ролей для решения задачи предоставления эффективного инструмента принятия взвешенных управленческих решений [41].

Геопорталы представляют собой технологическую основу, реализующую возможность и право граждан, специалистов, управленцев и ученых на получение

и распространение пространственной информации, становятся узловыми компонентами устойчивого эколого-социально-экономического развития регионов [21, 91]. Системы данного класса формируют достаточный уровень координации и коммуникации участников различных отраслей для осуществления интеграции, обработки и анализа пространственных данных, а также последовательного преодоления барьеров инновационного развития стран и регионов, предоставляя гибкий доступ к пространственным данным на основе веб-технологий [217, 169].

Важным звеном в формировании и развитии геопорталов становятся университеты, в структуре которых синтезируется многоуровневая система знаний о пространственно распределенных геосистемах [35, 235]. Для решения задачи анализа процессов функционирования организационных территориально распределенных систем с целью выработки взвешенных управленческих решений в области реализации концепции устойчивого развития целесообразно выделить следующие уровни интеграции пространственных данных [69, 185].

1. Уровень базовых пространственных данных, описывающий современную структуру географической оболочки и основанный на формировании базовой картографической основы.

2. Уровень пространственных моделей, предполагающий систематизацию данных по таким модулям, как природные (компоненты географической оболочки, система природных ландшафтов и ее динамические свойства), социальные (пространственно-временная структура общества и культурные ландшафты), экономические (территориальная организация хозяйственной деятельности регионов в рамках спектра отраслей), геоэкологические (иерархически организованная среда обитания человека, измененная в условиях техногенеза) системы.

3. Уровень принятия управленческих решений, обеспечивающий использование пространственных данных для решения задач анализа структуры и свойств земель и прогнозирования природных и природно-техногенных процессов.

Синтез цифровых пространственных моделей представляет собой многоэтапный процесс, при котором пространственные данные подвергаются обработке, анализу и структурированию.

В настоящее время важное стратегическое значение для народного хозяйства России имеет не столько в развертывание множества конкретных геопортальных экземпляров для различных регионов и отраслей, сколько разработка платформенного геопортального решения, программного каркаса, на основе которого могут быть быстро и эффективно организованы новые геопортальные решения. Геопортальный каркас должен реализовывать достаточный набор функций, которые востребованы при решении подавляющего числа задач в области управления территориально распределенными организационными системами [126]. С другой стороны, платформенное каркасное геопортальное решение должно быть открытым к расширению при минимизации необходимости изменения существующих системных компонентов системы.

Приведем реестр вариантов использования, актуальных для реализации в рамках геопортального каркаса, с целью решения задач управления территориально распределенными организационными системами.

1. Визуализация пространственных данных в рамках цифровой карты геопортала с целью обеспечения возможности их эффективного распространения и использования. В данном контексте актуальное значение имеет разработка и внедрение технологий комбинированного послойного отображения наборов цифровых пространственных данных, основанных на растровых и векторных форматах. Важную роль играет информативная визуализация пространственной информации в зависимости от атрибутивных данных, в том числе временных, а также применение алгоритмов сегментации и динамичного построения картограмм. Наконец, неотъемлемыми элементами навигации по пространственным данным, визуализируемым в рамках цифровой карты, являются компоненты фильтрации, через которые можно задать интервалы численных значений определенных атрибутов, выбрать один или несколько вариантов из предложенных конкретизирующих параметров, осуществить полнотекстовый поиск.

2. Мониторинг состояния природных и социальных систем на основе сбора пространственных данных, получаемых от внешних провайдеров, в том числе интеграция с компонентами Интернета вещей. В рамках данного положения

осуществляется решение задачи консолидации в геопортале информации о территориально распределенных объектах, их состоянии и свойствах, трансформирующихся в том числе с течением времени. Внедрение обозначенной технологии актуально для многих отраслей хозяйства, решения проблемы информационного обеспечения умных городов, точного земледелия, мониторинга подвижных объектов, анализа социальных процессов. При условии реализации стандартизированных программных интерфейсов для манипулирования геопортальными данными возможно обеспечение настраиваемой интеграции с оборудованием различных поставщиков.

3. Управление распределенными в пространстве объектами посредством отправки управляющих команд через интерфейсы диспетчера представляет собой функцию, обратную предыдущей. При условии, что взаимодействие с внешним агентом может осуществляться на основе стандартизированных протоколов, становится возможной отправка управляющих команд, которые могут активизироваться вручную пользователем геопортальной системы и запускаться автоматизированно в зависимости от наступления определенных условий.

4. Внедрение алгоритмов автоматизации актуально с точки зрения того, что в настоящее время значительное число пользователей заинтересованы в доступе не только к пространственным данным, но и к развитому функционалу их аналитической обработки, выработки прогнозов, принятия управленческих решений. Средства автоматизации актуальны при решении задачи построения синтетических цифровых карт, востребованных при анализе социальных и экономических процессов, организации проектных работ. Важное значение имеет прогнозирование развития природных и природно-техногенных процессов и явлений: паводков, оползней, загрязнения окружающей среды. Неоспоримым видится преимущество внедрения инструментов автоматического или автоматизированного принятия решений на основе консолидируемых статистических данных о пространственных процессах.

5. Проектно-ориентированное использование интеллектуальных алгоритмов, основанных на применении методов машинного обучения для анализа

разнородных пространственных данных, в том числе на основе глубоких нейросетевых моделей. Сфера применения алгоритмов и моделей весьма широка, при этом актуальным вопросом является хранение знаний, связывающих три предметные области: модели анализа данных, типы и наборы анализируемых данных, а также перечень решаемых при этом проектных задач. Новые интеллектуальные алгоритмы анализа пространственных данных позволяют анализировать материалы дистанционного зондирования разной природы и свойств совместно с формализованными результатами полевых исследований для того, чтобы решать проектные задачи в области анализа структуры и состояния земель и прогнозирования развития природных и природно-техногенных процессов и явлений.

6. Функционирование подсистемы администрирования, предоставляющей функционал по манипулированию пространственными данными геопортала при наличии необходимых прав доступа. Интерес представляют все классические операции управления информационными потоками, включающие функции поиска и фильтрации, чтения, записи, обновления, удаления данных. Через компонент администрирования должна реализовываться и возможность предоставления и разграничения ролей между пользователями геопортальной системы. Наконец, графические интерфейсы администратора системы могут вмещать в себя компоненты управления интеграцией с внешними провайдерами пространственных данных и объектами дистанционного управления, настройки правил предоставления и визуализации данных, параметризации алгоритмов автоматизации.

Одновременная реализация представленных вариантов использования, а также особенности разработанных алгоритмов управления пространственными данными отличает представленный геопортальный каркас от существующих программных решений, в том числе Scanex Web-GIS GeoMixer, облачной Веб ГИС NextGIS.

Геопортальные системы на основе программного каркаса могут быть развернуты и внедрены на основе различных концепций [93]. С одной стороны, возможно использование конкретного экземпляра системы в рамках определенной организации на базе собственной или арендуемой программной архитектуры. В этом случае

администраторы системы получают максимально возможный контроль над системой и данными. При этом осложняется задача поддержания необходимого уровня функционирования проектного решения, в том числе управления обновлениями. Альтернативная парадигма, позволяющая эффективно внедрять геопортальные решения, заложена в использовании модели «программное обеспечение как услуга», предполагающей предоставление готового проектно-ориентированного геопортального решения, полностью обслуживаемого его провайдером. В этом случае пространственные данные и алгоритмы работы геопортальной системы централизованно хранятся на сервере разработчика, а клиенты получают возможность быстрого развертывания собственных проектов на основе данной инфраструктуры, что снимает с потребителя необходимость затрат, связанных с развертыванием и сопровождением геопортала, и появляется возможность централизованного обновления системы.

Геопортальная система позволяет не только осуществлять мониторинг пространственно распределенных ресурсов, но и анализировать операционные процессы организаций [167]. Так, очевидный кейс применения системы – анализ цифровой фотография рабочего дня сотрудников на карте геопортала (автоматический мониторинг рабочего времени и перемещений, анализ бизнес-процессов компаний, деятельность которых завязана на использовании пространственно распределенных ресурсов, выявление и исправление неэффективных процессов и, как следствие, увеличение прибыли).

Сформулируем набор качественных требований, предъявляемых к процессам функционирования геопорталов, разворачиваемых на основе программного каркаса.

1. Универсальность. Каркас геопортальной системы должен позволять формировать информационные системы широкого класса, описывающие модели природных и природно-техногенных территориальных систем с достаточным уровнем абстракции и репрезентативности.

2. Интерпретируемость. Геопорталы, формируемые на основе каркаса, должны позволять производить прозрачную оценку особенностей

функционирования визуализируемых природных и природно-техногенных компонентов, а также выявлять причинно-следственные связи между изменением системных характеристик территориальных моделей и конкретными ее составными элементами.

3. Надежность. Территориальные модели, визуализируемые на основе предлагаемого каркаса должны обеспечивать достаточную минимизацию расхождений между фактическими характеристиками территориальной системы и параметрами ее абстрактного представления, рассчитываемыми на основе внедряемых в систему алгоритмов.

4. Конфигурируемость и расширяемость. Каркас построения геопортальных систем должен позволять формировать гибкие модели сложных территориальных систем, легко уточняемые и модифицируемые при появлении новых знаний и данных об анализируемых объектах и процессах.

5. Оптимизированность. Каркас построения геопортала должен позволять обрабатывать большие данные о территориальных системах на оптимальных вычислительных мощностях.

Алгоритм разработки геопортальной системы как инструмента визуализации пространственно-временных процессов, протекающих в сложных территориальных системах, должен включать определенную последовательность этапов:

1. Определение задачи и сценариев использования системы. В ходе данного проектного этапа определяется перечень проблем, на решение которых направлен разрабатываемый геопортал, а также реестр ключевых прецедентов, формирующий пространство функциональности проектируемого решения.

2. Проектирование и детализация системы. На данной стадии производятся декомпозиция и уточнение базового каркаса геопортальной системы для решения конкретных задач, осуществляются сбор пространственных данных и оценка статистических характеристик системы, выдвигаются гипотезы об определении уровня абстракции территориальной модели, обеспечивающей допустимую точность визуализации данных и достижение целевых эффектов.

3. Алгоритмическая конкретизация системы. В рамках этого этапа разрабатывается необходимый перечень алгоритмов, определяющих функционирование конкретной реализации геопортальной системы, направленной на решение частных задач анализа природных и природно-техногенных процессов.

4. Реализация графического интерфейса и подсистемы визуализации. На этой ступени разрабатывается интерфейсная составляющая системы, которая должна определить способы взаимодействия с моделями данных, методы и средства анализа ее функционирования, оптимизации и уточнения.

5. Итерационная апробация геопортальной системы, позволяющая не только моделировать конкретные пространственно-временные процессы, но и осуществлять калибровку территориальной модели, уточнять реестр используемых данных, оптимизировать качество получаемого результата.

Геопорталы как внешний компонент цифровых инфраструктур пространственных данных относятся к классу распределенных веб-систем и, таким образом, наследуют их характерные особенности. В частности, этот факт накладывает отпечаток на нефункциональные требования, предъявляемые к геопортальным системам. Так, с точки зрения безопасности, важно обеспечение свойств конфиденциальности (защиты от несанкционированного доступа), доступности (защиты при параллельном доступе к ресурсам) и целостности (сохранности данных) системы. Актуальной задачей при проектировании геопорталов является проблема обеспечения качества обслуживания, заключающаяся в необходимости выполнения определенного набора клиентских запросов [99].

Требование масштабируемости определяет способность геопортальной системы отвечать на вызовы роста функциональности и увеличения рабочей нагрузки. При этом целесообразно, чтобы время поиска по базам геопро пространственных данных не росло экспоненциально при увеличении объема накапливаемой информации о природных и социальных подсистемах организационных территориально распределенных систем, а величина использования ресурсов не увеличивалась бесконтрольно с ростом количества пользователей.

Данный раздел посвящен решению задачи анализа производительности и оптимизации геопортальных систем, которая неизбежно возникает в рамках процессов итерационной разработки, внедрения и технической поддержки геопортальных систем и связана с необходимостью получения интегральной оценки производительности.

Анализ опыта построения проектно-ориентированных цифровых ИПД показывает, что процесс формирования архитектуры систем данного класса должен быть основан на положении о том, что для оптимизации процессов хранения и эффективного использования пространственных данных ИПД должна содержать связанные за счет программных интерфейсов подсистемы их хранения, анализа и синтеза, визуализации и распространения (рисунок 6.1).

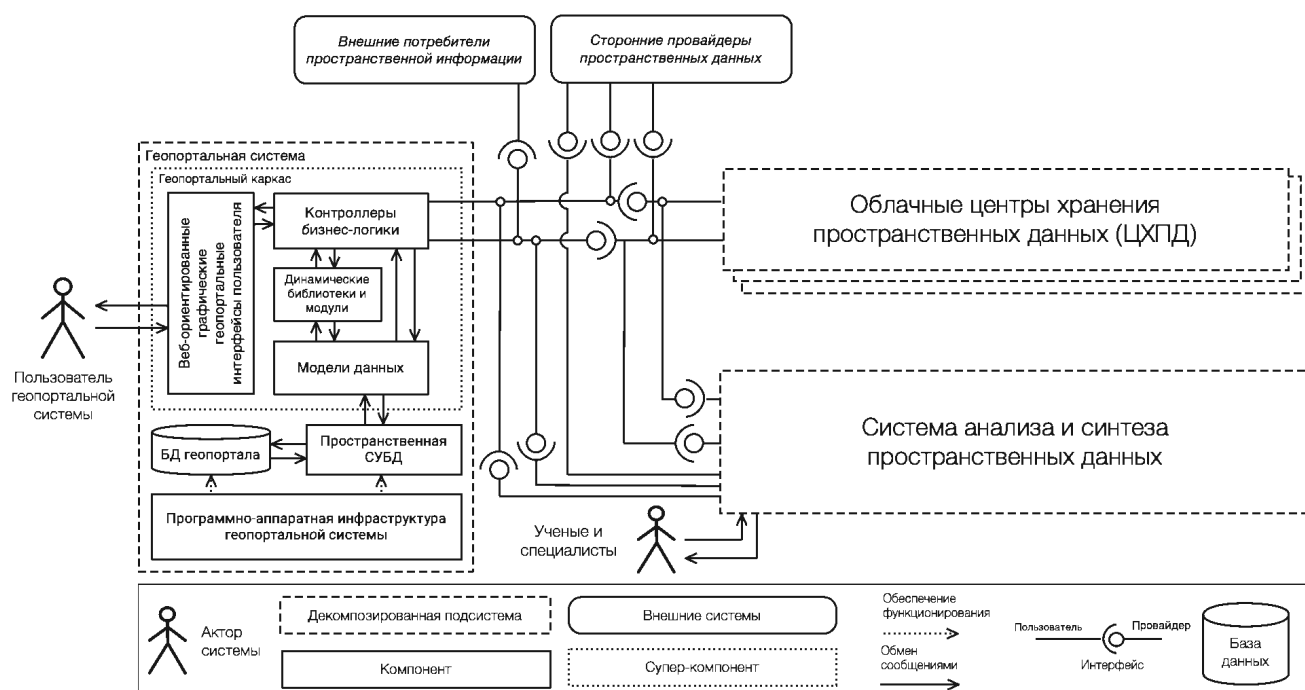


Рисунок 6.1 – Геопортальная система как узловой компонент цифровой инфраструктуры пространственных данных

Роль компонента, выполняющего последние две функции, традиционно возлагается на геопортальные системы [256, 252]. Внешними компонентами по отношению к ИПД при этом выступают ключевые акторы: пользователи геопортальных систем, ученые и специалисты, потребители и провайдеры геопространственных

данных. В геоинформационных системах, наследующих ключевые свойства программных информационных систем широкого спектра, традиционно предъявляется набор качественных и функциональных требований к интерфейсам, с помощью которых они взаимодействуют с окружающим миром [215]. В данной проблемной области следует отдельно рассматривать прикладные программные интерфейсы и графические интерфейсы пользователя (Graphical User Interface) [107]. Первый класс интерфейсов обеспечивает возможность автоматического или автоматизированного взаимодействия с ГИС, включающего удаленное управление системой и обмен данными. Для максимизации эффективности обозначенных процессов используются специализированные форматы и стандарты представления геоданных (GeoJSON, TopoJSON, KML), которые развертываются на базе таких архитектурных стилей взаимодействия компонентов, как REST, подсистемы функционирования Web API и веб-служб. Проблематика разработки надежных, легко модифицируемых прикладных программных интерфейсов занимает особое место в решении задачи ввода в эксплуатацию эффективных ГИС.

Последние исследования посвящены открытым вопросам анализа удобства использования геопортальных систем, поиска путей улучшения User Experience (UX) – восприятия и ответных действий пользователя при работе с графическим интерфейсом. Исследователи сходятся на том, что решением задачи создания эффективных графических геопортальных интерфейсов является изначальное формирование дизайна, ориентированного на человека, созданного для решения конкретных проблем на основе лучших практик и паттернов проектирования [117]. В этом разделе диссертации мы детально остановимся на проблеме создания современных геопорталов: проектировании и разработке устойчивых, адаптивных, интуитивно понятных геопортальных интерфейсов.

Базовый алгоритм функционирования геопортальной системы, построенной на основе архитектурного паттерна MVC (Модель-Вид-Контроллер), основан на реализации принципа инверсии зависимости (Dependency Inversion Principle) объектно-ориентированного проектирования, который заключается в том, что

системные модули верхнего уровня не зависят от модулей нижнего уровня, а оба типа модулей при этом слабо зацеплены за счет интерфейсов.

В рамках подсистемы администрирования геопортальной системы реализация принципа инверсии зависимости успешно достигнута следующими способами.

1. Введение интерфейсов для всех сервисов и компонентов: модели, представления и контроллеры, а также вспомогательные библиотеки имеют интерфейсы, определяющие способ взаимодействия с инкапсулированной логикой, при этом взаимодействие с каждым отдельным компонентом зависит от его интерфейсов, а не от конкретной реализации.

2. Использование принципа инверсии управления (Inversion of Control), при котором управление выполнением программы не ложится на конкретные используемые объекты, а, напротив, передается объектам, которые их вызывают. Это позволяет грамотно структурировать код системы, разделить логику по компонентам, сократить дублирование кода и повысить возможность его повторного использования, усилить тестируемость.

Подсистема администрирования геопорталов, реализованная на основе архитектурного паттерна MVC с применением принципа инверсии управления позволяет разделить логику приложения на несколько отдельных изолированных компонентов (модели, контроллеры и представления) и централизованно управлять ими.

Компонентная структура разрабатываемой геопортальной платформы формируется на основе архитектурного паттерна MVC, предполагающего разделение ключевых компонентов системы на сильно связанные внутри и слабозацепленные модули манипулирования данными, организации графических интерфейсов, и формирования программной логики системы. Диаграмма компонентов для подсистем геопортала представлена на рисунке 6.2.

Подсистемы геопортальной платформы включают в себя модуль точки входа, обрабатывающий поступающие запросы и на основе модуля маршрутизации принимающий решение о том, какому контроллеру бизнес-логики передать исходные данные запроса для дальнейшей обработки. Контроллер бизнес-логики геопортальной подсистемы представляет собой компонент, определяющий

последовательность этапов обработки запроса к системе посредством использования фильтров доступа и поведения, моделей данных и компонентов рендеринга интерфейсов для формирования ответного сообщения в форме инструкций по построению графических интерфейсов пользователя или структур данных в форматах, пригодных для межмашинного взаимодействия. К контроллеру также могут быть интегрированы библиотеки с открытым исходным кодом.

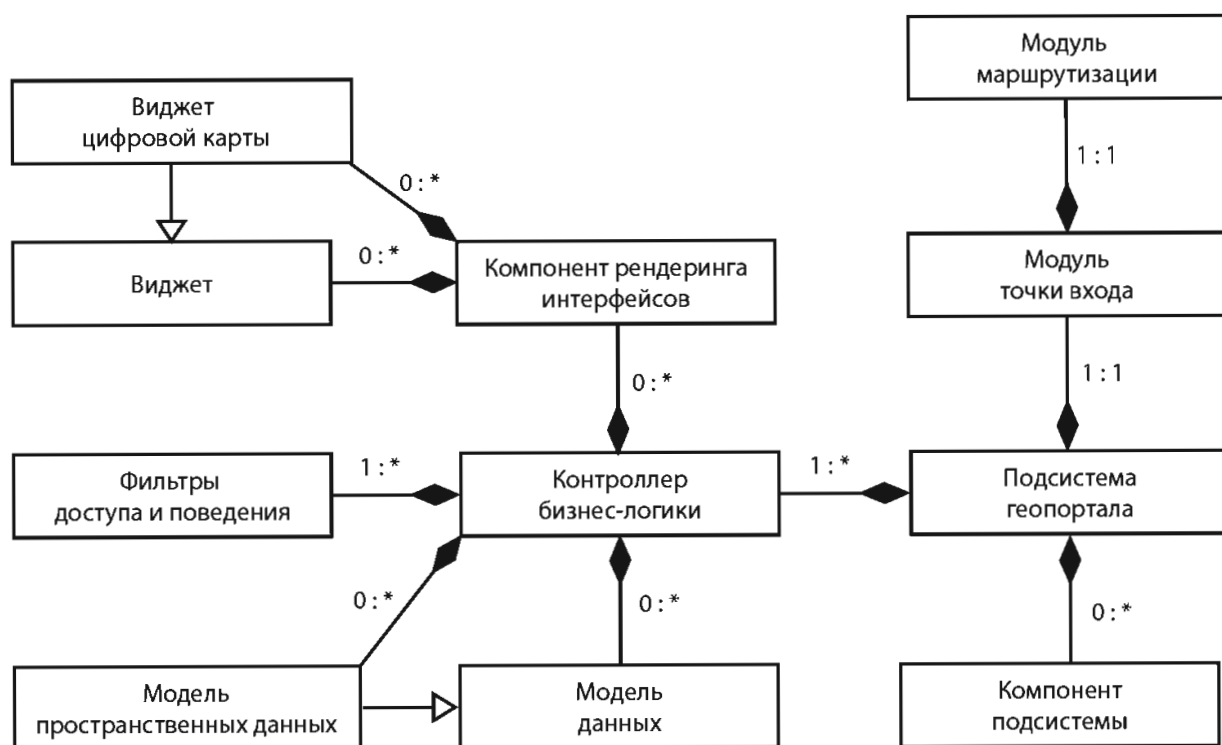


Рисунок 6.2 – Диаграмма компонентов для подсистем геоportальной системы

Модели данных представляют собой компоненты, ориентированные на решение задачи реализации ключевых методов манипулирования данными геоportальной системы (создание, чтение, обновление, удаление). Оптимизация процесса управления данными осуществлена на основе паттерна объектно-реляционного отображения ORM (Object-Relational Mapping) и позволяет работать с данными как с объектом в соответствии с принципами объектно-ориентированного программирования. В виде отдельных классов, наследующих поведение моделей данных, реализованы модели пространственных данных, позволяющие манипулировать типами данных с пространственной геометрией, а также осуществлять пространственные запросы к хранилищу геоданных.

Компоненты рендеринга графических интерфейсов пользователя позволяют подготавливать данные геопортальной системы для их последующей визуализации в рамках веб-интерфейсов системы. Данный класс модулей реализуется на основе принципов шаблонизации и позволяет выстраивать объектную модель документа геопортальной системы на основе языка гипертекстовой разметки HTML. Визуальное оформление графических веб-интерфейсов происходит посредством использования каскадных таблиц стилей CSS, а для обеспечения динамического поведения использован язык программирования JavaScript. Одним из способов реализации компонента рендеринга является компонент «виджет», формирующий графические интерфейсы для отдельного заверщенного модуля, который может быть встроен в интерфейсы геопортальной системы. Применение виджетов позволяет достичь многократного использования кода. Отдельным типом виджета является цифровая карта, позволяющая решать задачу рендеринга данных о пространственно распределенных объектах.

Геопортальная подсистема может быть интегрирована с другими компонентами, которые в том числе могут сами по себе быть организованными на основе архитектурного паттерна MVC. В рамках геопортальной подсистемы возможно использование библиотек с открытым исходным кодом. В реестре требований к геопортальному программному каркасу важное место занимает возможность модульной интеграции с компонентами Интернета вещей [127]. Данный прецедент расширяет возможный функционал геопорталов, делая их системами диспетчеризации, обеспечивающими процесс управления организационными территориально распределенными системами. Для эффективной интеграции устройств различного типа требуется реализация компонента на базе архитектурного паттерна «адаптер» для обработки данных, структурированных в соответствии с особенностями интегрируемого устройства и приведения их в унифицированную форму. Модульный инструментарий интеграции устройств Интернета вещей вокруг геопортальных технологий диспетчеризации обеспечивает поддержку принятия решений посредством организации функции мониторинга и дистанционного управления территориально распределенными организационными системами [59].

На рисунке 6.3 представлены блок-схемы обобщенного базового процесса функционирования устройств Интернета вещей, интегрируемых вокруг геопортального каркаса. Алгоритм начинается с подключения библиотек и инициализации переменных алгоритма, после этого запускается бесконечный цикл запуска процесса итерационной обработки, в ходе которого осуществляется получение значений с датчиков и проверка на получение управляющих команд.

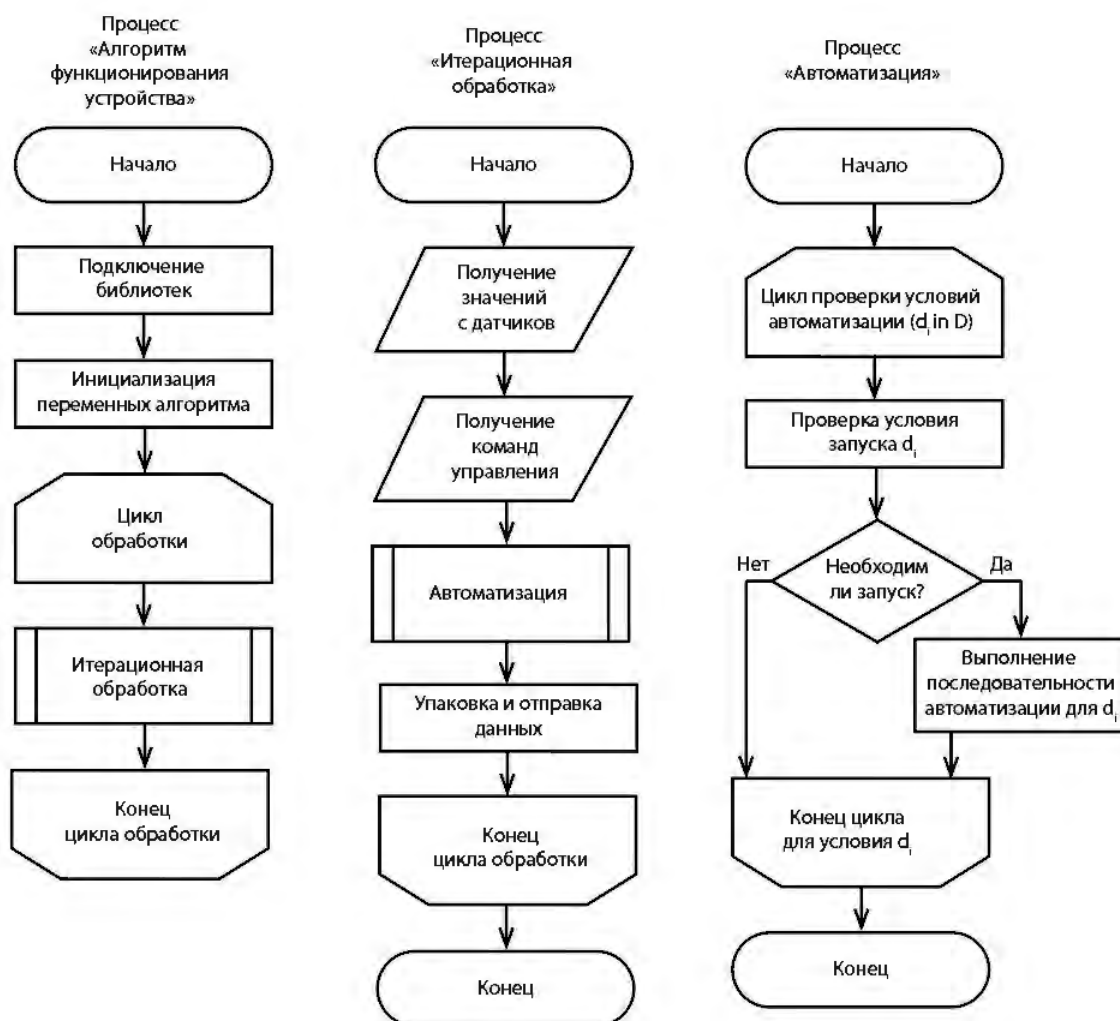


Рисунок 6.3 – Процессы функционирования устройств Интернета вещей, разворачиваемых вокруг геопортальной системы

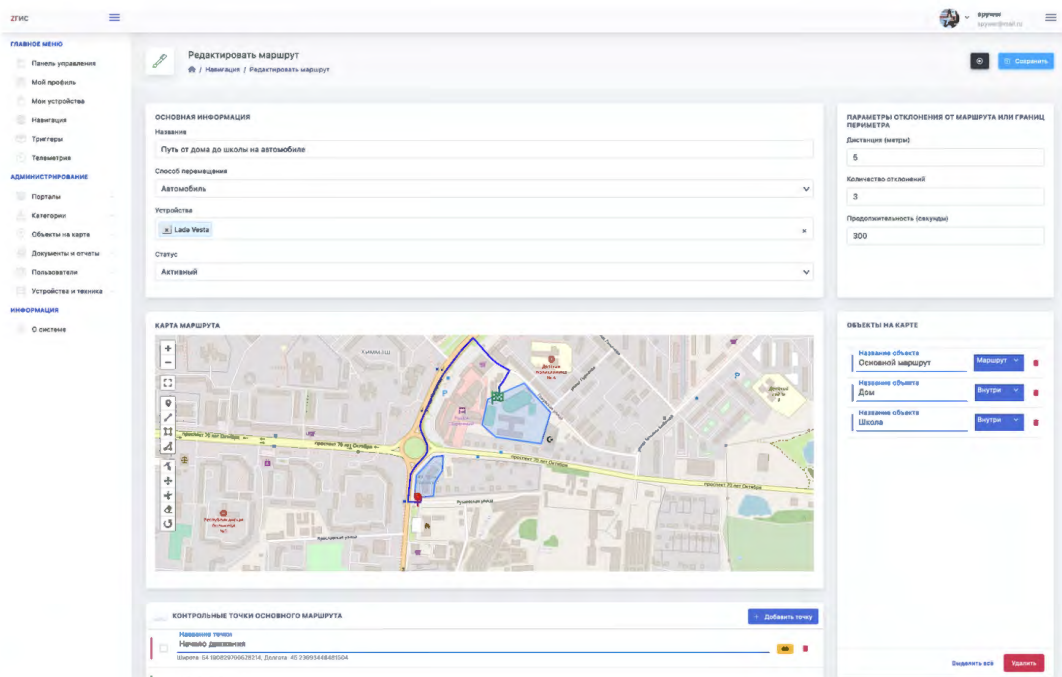
Далее запускается процесс «Автоматизация», в ходе которого производится выполнение последовательностей автоматизации. В завершение процесса «Итерационная обработка» происходит упаковка данных (показаний с датчиков и лога управляющих команд), затем этапы процесса запускаются с самого начала.

На рисунке 6.4 представлены графические интерфейсы подсистемы управления данными геопортального каркаса: интерактивный редактор навигационных маршрутов, инструментарий мониторинга состояния и дистанционного управления устройством. Посредством подсистемы администрирования реализуется парадигма дистанционного управления территориально распределенными системами на основе геопортальных технологий и концепции Интернета вещей.

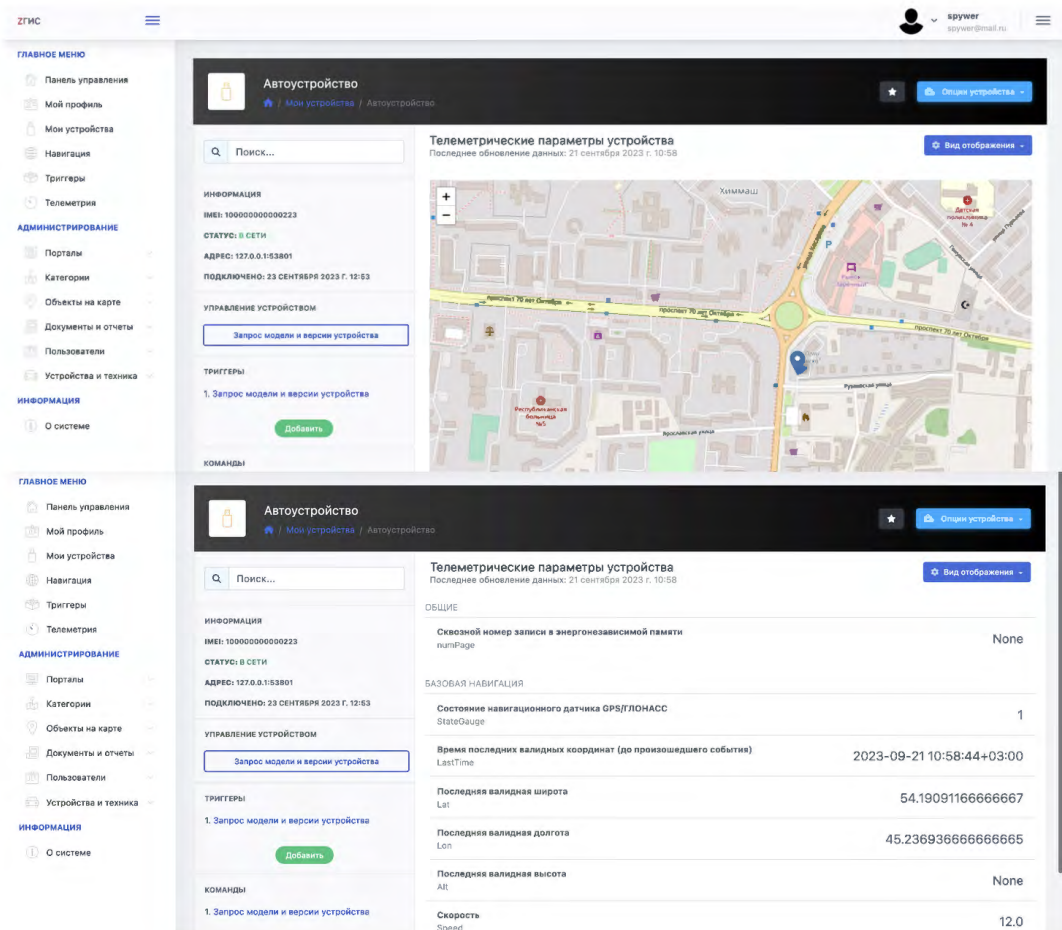
6.2 Проектно-ориентированные геопортальные системы в решении задач управления организационными территориально распределенными системами

Целесообразно выделить два направления развития каркаса геопортальной системы. С одной стороны, необходимо придерживаться дедуктивной стратегии, при которой геопортальный каркас изначально разрабатывается с целью достижения возможности покрытия решений максимального количества проектных задач. С другой – необходимо максимально эффективно реализовывать индуктивную стратегию, в рамках которой положительно зарекомендовавшие себя улучшения частных конкретных геопорталов становятся основой для развития каркаса системы. Совместное использование дедуктивной и индуктивной стратегий обеспечит эволюционное улучшение каркаса построения геопортальных систем, а также оптимизацию частных решений, разрабатываемых на его основе.

В данном разделе диссертации представлен опыт проектирования геопортальных систем, представляющих собой инструмент поддержки принятия решений в области мониторинга и управления организационными территориально распределенными системами. Конкретные геопортальные экземпляры были развернуты на определенной версии геопортального каркаса, а анализ опыта их функционирования использовался в обратном направлении – для цели модификации и итерационного улучшения геопортального каркаса.



а



б

Рисунок 6.4 – Подсистема управления данными геопортального каркаса:
а – интерактивный редактор навигационных маршрутов для контроля пространственных процессов; б – мониторинг состояния и дистанционное управления устройством

Геопортальные системы в решении задачи мониторинга чрезвычайных ситуаций. Важной задачей, имеющей серьезное экономическое и социальное значение, является предупреждение негативных последствий паводков в период весеннего половодья. Ключевые трудности при решении задач прогнозирования прохождения паводка связаны со сложностью сбора исходных данных и недостаточной изученностью механизмов, определяющих динамику изменения уровней воды на различных участках [119].

Одним из необходимых условий принятия эффективных решений при управлении сложными территориальными объектами является своевременная выработка опережающих управленческих решений на базе прогнозных оценок состояния исследуемого объекта. В современных условиях решение задачи прогнозирования паводков возможно на базе экспериментального исследования системных связей и закономерностей функционирования и развития организационных территориально распределенных систем с последующей разработкой новых высокоточных алгоритмов прогнозирования развития пространственно-временных процессов на основе анализа больших массивов ретроспективных, текущих и экспертных данных ИПД с комплексным применением глубоких нейронных сетей.

Разработанная система представляет собой геопортальное приложение, позволяющее визуализировать электронную карту прогнозируемой устойчивости территории к затоплению. Концепция проекта основана на гипотезе о том, что задача прогнозирования уровней воды в период весеннего половодья может быть эффективно решена при проработке трех опорных точек: 1) при условии составления информативной геосистемной модели территории (на базе данных ДЗЗ, климатических и метеоданных и др.); 2) при разработке глубокой нейросетевой модели для анализа данных о геосистемной модели территории; 3) при внедрении геопортальных систем для визуализации результатов машинного анализа с целью обеспечения информационной поддержки принятия взвешенных управленческих решений в области организации устойчивого развития территорий и прогнозирования стихийных процессов.

В системе решена проблема функциональной возможности редактирования метеоданных об анализируемой географической области, реализована функция актуализации погоды при помощи API сторонних сервисов (на примере OpenWeatherMap API). Обозначенные исторические данные используются модулем прогнозирования для предсказания уровня воды. В рамках геопортальной системы реализована панель администрирования, позволяющая осуществлять редактирование реестра стратегических объектов, визуализируемых на электронной карте. Еще одним компонентом системы является модуль краудсорсингового редактирования карты, позволяющий на свободной основе актуализировать данные об исследуемой территории, сообщать о чрезвычайной ситуации.

Перечень ключевых вариантов использования геопортального решения включает: 1) визуализацию территории на электронной карте с возможностью послойного отображения объектов разных категорий, в том числе территории, подверженной затоплению; 2) просмотр атрибутивной информации об объектах на электронной карте; 3) актуализацию реестра объектов электронной карты посредством подсистемы администрирования; 4) функционирование модуля актуализации исторических метеоданных и данных об уровне воды; 5) выполнение воркера прогнозирования уровня воды для анализируемого полигона, перманентно обучающийся на собранных данных и актуализирующий прогнозную информацию; 6) краудсорсинговое добавление объекта на карту с возможностью отправки оповещений.

Процесс добавления объектов на электронную карту начинается с интерфейсов редактирования перечня категорий объектов геопортала. Объекты любой категории можно добавлять посредством графических интерфейсов, позволяющих выбрать положение объекта на электронной карте и дать его текстовое описание. Для повышения быстродействия электронной карты и улучшения наглядности интерфейсов внедрен модуль кластеризации близлежащих маркеров. При клике на маркер появляется всплывающий блок с его текстовым описанием.

В системе реализована функция краудсорсингового добавления оповещений о чрезвычайной ситуации, позволяющая пользователям геопортала отправить

сигнал о чрезвычайном происшествии с выбором места ЧС на электронной карте. Данные становятся доступными другим пользователям геопортала в категории «Отметки о ЧС». Компонент автоматического построения оценочной карты потенциала территории к затоплению функционирует на основе данных SRTM о цифровой модели рельефа. Пример цифровой карты затоплений на основе анализа цифровой модели рельефа для полигона «Тулун» (Иркутская область) представлен на рисунке 6.5.

Данный алгоритм имеет ограничения и оценивает потенциал устойчивости территории к затоплению. Также он подходит для равнинных территорий и наследует от данных погрешность по высоте в 1 м. Алгоритм дает возможность учитывать дополнительно данные ДЗЗ. Геопортальная система, реализованная для решения задачи прогнозирования уровней подъема воды в период половодья, позволяет визуализировать электронную карту прогнозируемой устойчивости территории к затоплению и собирать данные о метеоусловиях анализируемой территории с целью выявления закономерностей, влияющих на колебания уровня воды.

В качестве объекта исследования выбран тестовый полигон, ограниченный координатами 66.596935 с.ш. и 67.628850 с.ш. с юга и севера и 51.046486 в.д. и 53.278371 в.д. с запада и востока. Ключевой рассматриваемый объект – Печора, река в Республике Коми и Ненецком автономном округе России, которая берет начало на Северном Урале, в юго-восточной части Республики Коми, и течет сначала преимущественно на юго-запад.

На рисунке 6.6 представлена геопортальная система, разработанная в рамках конкурса Агентства стратегических инициатив по продвижению новых проектов и предназначенная для решения задачи визуализации территории затопления.

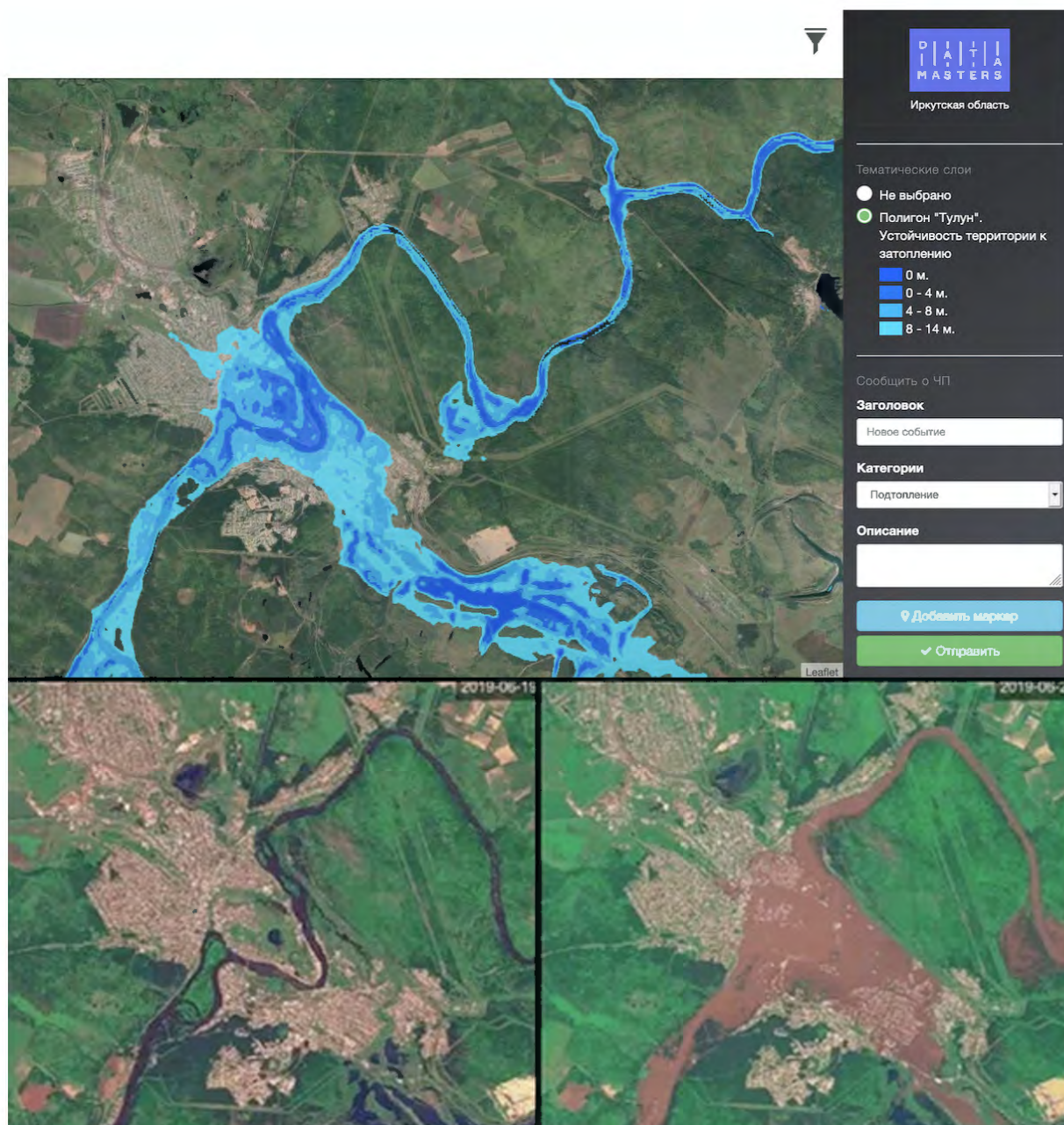


Рисунок 6.5 – Цифровая карта затоплений на основе анализа цифровой модели рельефа в рамках геопортала

Проектирование системы изначально осуществлялось исходя из необходимости решения задачи планирования, идентификации, анализа, мониторинга и управления рисками, связанными опасностью паводков. Информационная система позволяет визуализировать на цифровой карте потенциальную территорию затопления при условии различной степени подъема уровня воды.

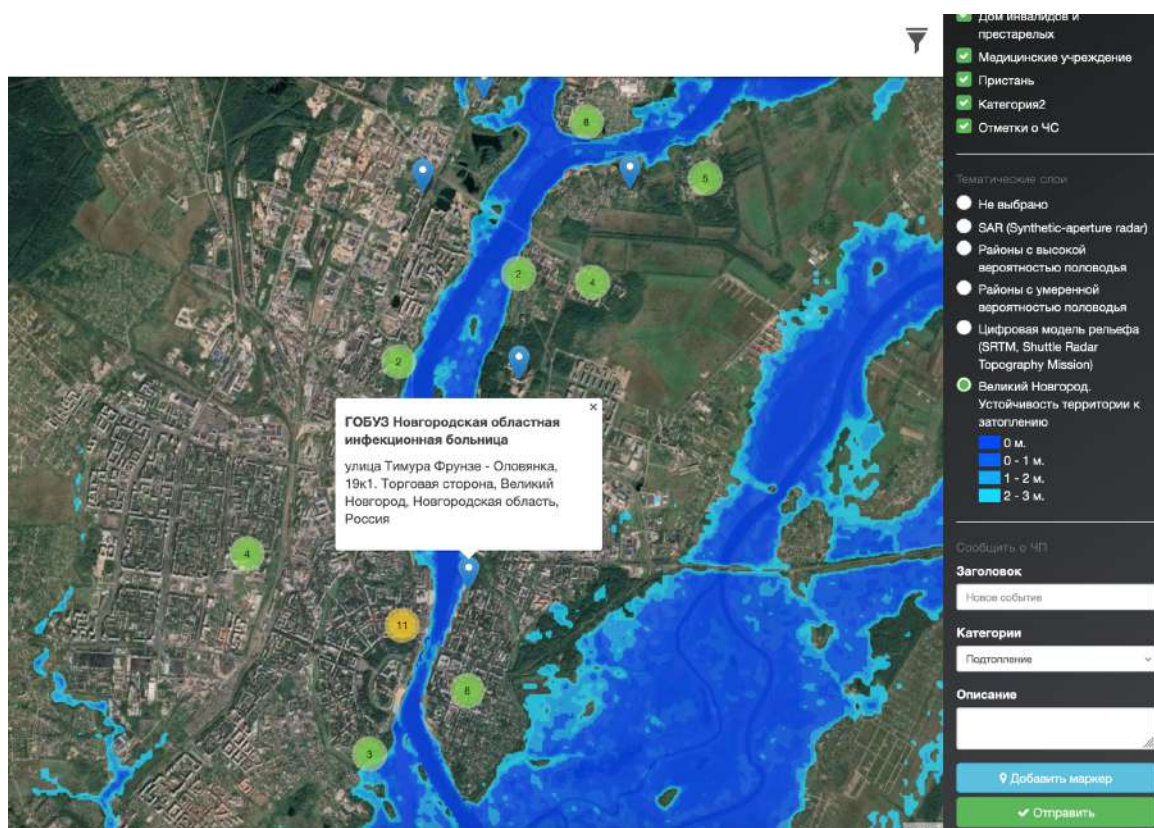


Рисунок 6.6 – Геопортальная система визуализации территории затопления

Также в рамках системы внедрена возможность визуализации ключевых объектов социальной и хозяйственной инфраструктуры, что дает возможность оценить степень угрозы их затопления. В рамках геопортальных интерфейсов функционирует виджет, визуализирующий данные с гидропостов. Наконец, модуль обратной связи позволяет сообщить пользователям системы о чрезвычайной ситуации и отметить место маркером на цифровой карте. Инструменты администрирования позволяют редактировать реестр объектов в системе и осуществлять модерацию сообщения о чрезвычайной ситуации с геопространственной привязкой.

Представленное проектное решение «Прогнозирование уровней подъема воды в период половодья» признано победителем второго этапа Международного конкурса World AI&Data Challenge.

Геопортальные системы в решении задачи управления системами природного и культурного наследия. Консолидация данных в цифровых ИПД имеет особое значение для решения задачи информационного обеспечения просветительской деятельности в области междисциплинарных исследований, основанных на

использовании пространственных данных. При этом конечные артефакты анализа данных ИПД становятся ключевым элементом, обеспечивающим управление системами распространения знаний о ключевых компонентах устойчивого развития регионов. Их использование позволяет повысить эффективность информационных процессов, обеспечивающих развитие образовательных и социально-экономических систем.

В диссертации представлены результаты трех грантовых проектов, направленных на проектно-ориентированное использование пространственных данных, синтезированных на основе предложенных методов и алгоритмов, для организации просветительской деятельности в рамках междисциплинарных исследований в области анализа пространственных данных посредством разработки геопортальных решений, картографических артефактов, а также организации проведения соревнований на основе новых информационных технологий.

Геопортальная система «Природное и культурное наследие Республики Мордовия», разработанная по гранту РФФИ № 20-37-70055 («Интеграция знаний в цифровых инфраструктурах пространственных данных для принятия управленческих решений в области устойчивого развития»), выполняет функцию организации управления системами культурного и исторического наследия. Портал «Природное и культурное наследие Мордовии», размещенный по адресу <https://tourismportal.net/>, создан для целей визуализации и распространения информации о многослойной структуре и наследии культурного ландшафта Мордовии. Узловой задачей проектирования геопортала является обеспечение доступа к информации о природном, социокультурном и инфраструктурном потенциале региона. Графические интерфейсы геопортала характеризуются свойствами интуитивной понятности, адаптивности, модифицируемости, надежности и безопасности. Функционирование геопортала основано на пространственно-временной систематизации и сравнительном анализе больших объемов информации с целью формирования представления о гармоничном взаимодействии природы и общества в виде модели национального культурного ландшафта, обеспечивающей координацию поиска и рационального использования данных об этногеографическом

пространстве. Структура проектируемого информационного ресурса раскрывает туристско-рекреационный потенциал культурного ландшафта Мордовии через визуализацию природного и культурного наследия. Многослойная структура культурного ландшафта представлена электронной картой и энциклопедическим блоком. Интерактивная электронная карта (рисунок 6.7) обеспечивает пространственную координатную привязку объектов природного и культурного наследия, инфраструктуры.

В качестве одного из ключевых элементов на данной итерации развития проекта позиционируется слой населенных пунктов, раскрывающий в контексте синтеза геоэкологического и культурологического подходов информацию о топонимике, основателях поселений, этапах развития и динамике населения, планировочной структуре, экологических особенностях ландшафтов.

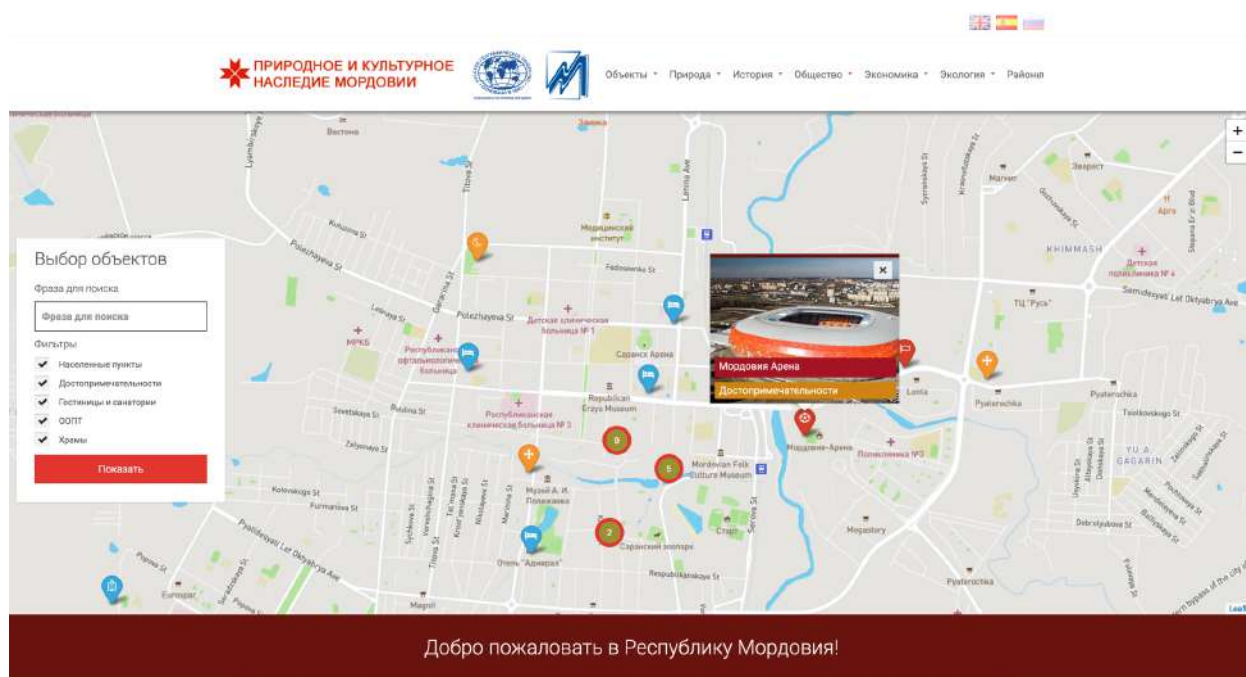


Рисунок 6.7 – Веб-интерфейсы интерактивной электронной карты

Энциклопедический блок сформирован на основе географического атласа Республики Мордовия и включает несколько тематических разделов («Природа», «История», «Общество», «Экономика», «Экология», «Районы Мордовии»), предоставляющих комплексную пространственно-временную характеристику национального ландшафта Республики Мордовия (рисунок 6.8). В качестве

вспомогательных функциональных элементов на геопортале «Природное и культурное наследие Мордовии» приводятся исторические и современные фотоматериалы.

В качестве элементов природного наследия в рамках портала приводятся особо охраняемые природные территории федерального и регионального значения, редкие виды растений и животного мира [154]. Иллюстрирование культурно-исторического потенциала в структуре геопортала основывается на информации о регионе как части финно-угорского пространства, обладающей значительным материальным и духовным наследием. Культурно-исторический потенциал реализуется в характеристике древних культур, памятников археологии, древнейших городов Мордовии, существующих городских и сельских населенных пунктов, этнического состава населения, объектов духовного наследия, мест жизни выдающихся людей, памятников истории и культуры федерального и регионального значения. Социально-экономический блок туристско-рекреационного потенциала структурирован через анализ хозяйства региона: промышленность, сельское хозяйство, лесное хозяйство, строительство, транспорт и связь, опорные пункты развития.

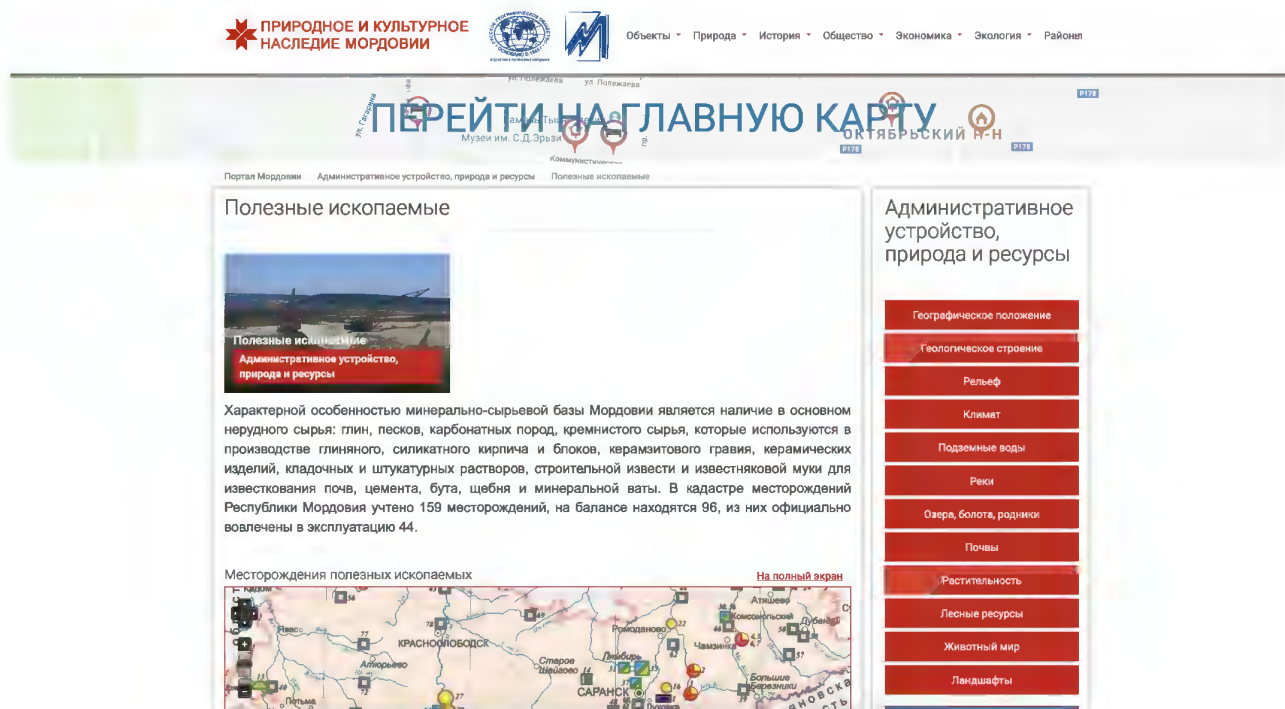


Рисунок 6.8 – Веб-интерфейсы электронного атласа

Каркас проекта изначально проектировался и разрабатывался с чистого листа на основе компонентно-ориентированного подхода для эффективного решения задачи распространения информации о природном и культурном наследии региона. Графические интерфейсы информационной системы созданы с использованием технологий адаптивной верстки для достижения необходимых UX-показателей и удобства использования со смартфонов и десктопных устройств. База данных геопортала спроектирована исходя из решаемых в проекте задач на основе реляционного подхода.

Информация в геопортале представлена на 3 языках: русском, английском и испанском. Данные в рамках проекта структурированы в 69 информационных блоках из 6 тематических разделов: «Административное устройство, природа и ресурсы», «История», «Народонаселение и социальная инфраструктура», «Экономика», «Экология», «Наследие муниципальных районов» и снабжены иллюстративным материалом: более 800 фотографий объектов природного, исторического и культурного наследия (приложение 1).

Основу контентного наполнения формируют более 1 240 информационных блоков о населенных пунктах с информацией о топонимике, географии, истории, размещенных на геопортале с привязкой к электронной карте; 830 объектов культурно-исторического наследия и 95 особо охраняемых природных территории описаны с пространственной привязкой к цифровой карте региона. На основе материалов региональной ИПД, синтезированных в том числе с применением представленных в диссертации новых методов и алгоритмов машинного анализа пространственных данных, в рамках проекта разработано 139 тематических масштабируемых карт различной тематической направленности. Карты растительности, ландшафтов и эрозионных процессов разработаны и актуализируются на основе новых методов и алгоритмов, предложенных в диссертации.

Региональные геопорталы должны строиться на основе проектно-ориентированного подхода, выступая в роли эффективного инструмента управления территориально распределенными системами [12]. Система тематических пространственных данных геопортала должна обеспечивать оптимальную характеристику

метагеосистем региона – иерархически упорядоченных природных, социальных и производственных подсистем различных уровней [125]. Структуризация пространственных данных об объектах в геопорталах может быть осуществлена по различным направлениям, учитывая множество признаков. Однако существуют признаки, определяющие основные особенности объекта. Их можно назвать стратегическими, так как их использование при анализе структуры объекта определяет стратегию всех последующих исследований.

В основу новой базы данных тематических слоев «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» заложены массивы геопространственной информации, характеризующие инвариантные элементы метагеосистем: цифровая модель рельефа, геологическое строение, поверхностные и подземные воды, структура почвенного покрова. Интерактивная карта «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом» отражает процессы многовекового хозяйственного освоения ландшафтов.

Каждый тематический слой характеризует конкретный параметр геосистемы f_i . Выделение информативных параметров геосистем возможно посредством итерационного алгоритма оценки их важности, функционирующего на основе последовательного расчета весовых коэффициентов, определяющих вероятность того, насколько анализируемый параметр геосистемы отличается для ближайших объектов разного класса (δ) или близок для соседних объектов одного класса (σ).

$$\omega_i = P((f_i^\delta \neq f_i)|\delta) - P((f_i^\sigma \neq f_i)|\sigma). \quad (6.1)$$

Выбор ближайших (соседних) геосистем происходит через определение евклидова (или иного) расстояния $\Delta(\Gamma_p, \Gamma_q)$, рассчитываемого на основе их параметров:

$$\Delta(\Gamma_p, \Gamma_q) = \sqrt{\sum_{f=1}^N (x_p^f - x_q^f)^2}. \quad (6.2)$$

Каждую итерацию работы алгоритма определения важности i -го признака происходит обновление весового коэффициента ω_i на величину Δ_i ,

рассчитываемую исходя из значения i -го признака для геосистемы (x^i), ее ближайшего соседа другого ($\delta^i(x)$) и того же ($\sigma^i(x)$) классов:

$$\Delta_i = \Delta_i^\delta - \Delta_i^\sigma = |x^i - \delta^i(x)| - |x^i - \sigma^i(x)|. \quad (6.3)$$

Алгоритм оценки важности параметров метагеосистем позволяет оценить влияние пространственных данных различных слоев на целевой анализируемый показатель, что дает возможность определить оптимальный набор тематических слоев цифровой карты геоportала для решения конкретной проектной задачи управления территориально распределенными системами.

Геоportал «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» (доступен по адресу: <http://meta.rgo.life/>) и интерактивная карта «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом» (<https://map.rgo.life/>) призваны решать задачу визуализации цифровых карт для тестового полигона «Мордовия» (расположен между $53^\circ 38'$ и $55^\circ 11'$ с. ш., $42^\circ 11'$ и $46^\circ 45'$ в. д.), раскрывающих особенности взаимодействия лесостепных и лесных геосистем Приволжской возвышенности и Окско-Донской низменности. В рамках обозначенного полигона выделены 6 дочерних полигонов, развернутых для решения задач картографирования геосистем на топологическом уровне.

Геоportал «Метагеосистемы Мордовии» (рисунок 6.9), разработанный при поддержке РНФ, раскрывает особенности взаимодействия лесостепных и лесных геосистем Приволжской возвышенности и Окско-Донской низменности в серии тематических карт слоев, формирующих знания о метагеосистемах и ландшафтах, геологии, подземных водах, рельефе, почвах, растительности и системах землепользования. В рамках геоportала пространственные данные систематизированы по следующим тематическим слоям: цифровые модели рельефа, экзогеодинамические процессы, коренные породы, четвертичные отложения, литологический состав поверхностных отложений, полезные ископаемые и ресурсы, почвы, эколого-геохимическая устойчивость почв к поступлению тяжелых металлов, глубина залегания грунтовых вод, реки и ручьи, ландшафты, полезные ископаемые и ресурсы, потенциально пригодные земли, охотничьи угодья, многоквартирные дома, дорожная сеть.

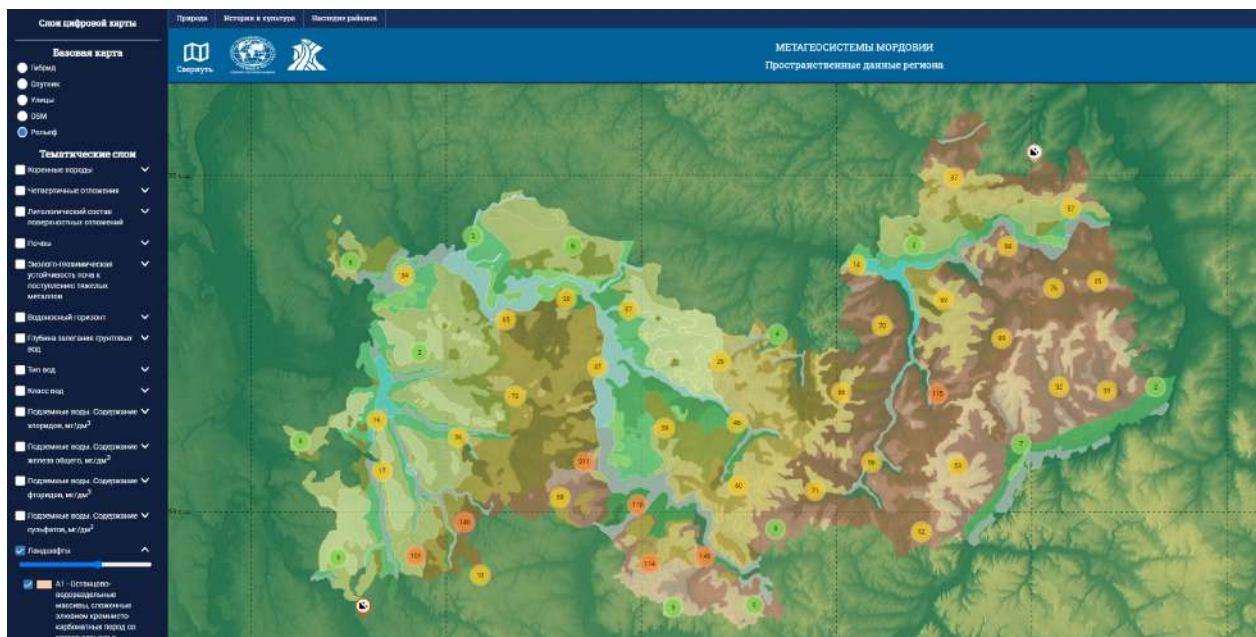


Рисунок 6.9 – Геопортал «Метагеосистемы Мордовии.

Пространственные данные региона»

Геопорталы «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» и интерактивная карта «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом» обеспечивают оптимизированную визуализацию системы тематических карт природных и природно-техногенных территориальных комплексов. Графический интерфейс цифровых карт дает возможность комбинированной визуализации тематических слоев и управления видимостью и прозрачностью отображаемых данных. Разработанные системы позволяют решать задачи анализа состояния метагеосистем различного иерархического уровня на основе совместной обработки информации нескольких тематических слоев для обеспечения процесса поддержки принятия решений.

Другим примером информационной системы, реализованной с использованием парадигмы проектирования на основе процессов управления рисками является геоportal «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом», представленный на рисунке 6.10 и реализованный по гранту РГО [92]. Пространственная база данных для построения интерактивной карты содержит информацию для построения системы карт, раскрывающих туристский потенциал региона.

В рамках названного проекта конечной целью работ по созданию портала была обозначена необходимость максимизации эффекта использования позитивных рисков (благоприятных возможностей), связанных с управлением системами природного, исторического и культурного наследия [103]. Достижение этого результата становится возможным посредством эффективного распространения комплексной (ландшафтной, исторической, культурологической, социологической, экономической, экологической) информации о регионе посредством созданного геопортала, решающего сформулированную проблему за счет способствования достижению следующих целевых эффектов: 1) организация информационного обеспечения процесса проведения инвестиционных кампаний для привлечения средств на сохранение объектов наследия; 2) информирование о процессах развития туристской инфраструктуры; 3) привлечение внимания к проблемам сохранения и развития народных традиций и ремесел; 4) реализация комплекса мер по повышению имиджа элементов природного и исторического наследия.

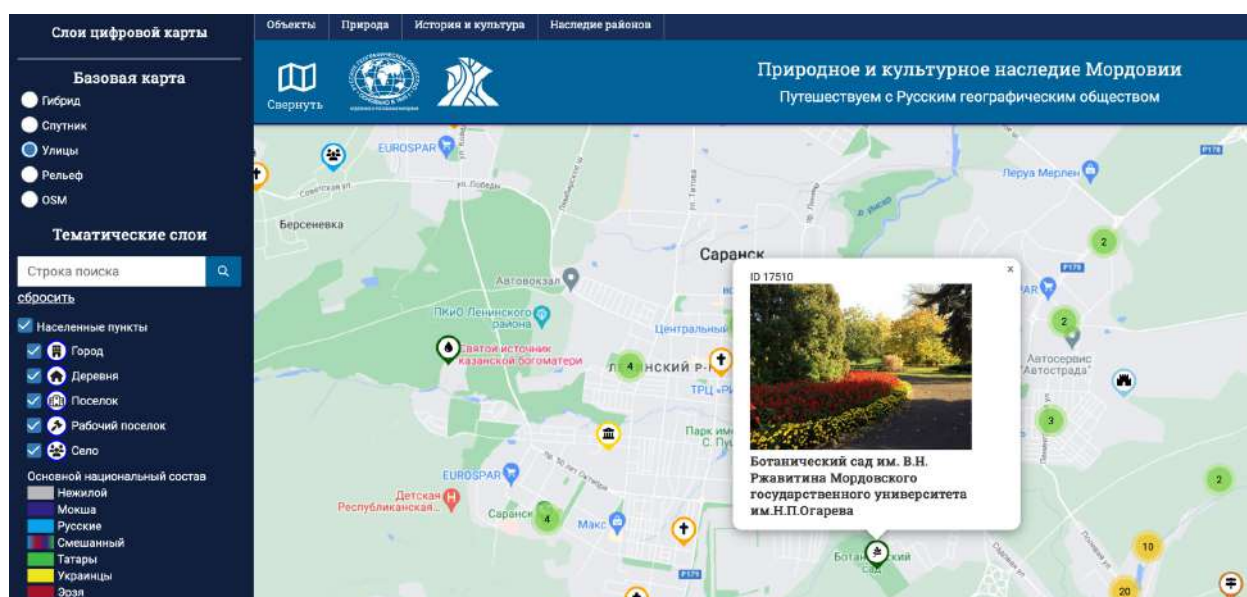


Рисунок 6.10 – Геопортал «Природное и культурное наследие Республики Мордовия. Путешествуем с Русским географическим обществом»

Использование геопортальной программной платформы для создания геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» позволило региональному отделению Русского географического общества сократить время разработки на 61%, и снизить стоимость внедрения на 71% в сравнении с

конкурентными программными решениями. Проект функционирует для решения задачи управления системами природного и культурного наследия региона. По данным подсистемы аналитики, проект посетило 388,5 тысяч уникальных посетителей. Значительную долю трафика сформировали посетители из всех регионов России, а также Китая, Казахстана, Белоруссии, США, Германии, Финляндии и других стран. Проект интересен людям 25-44 лет (46 %), значительную долю посетителей составляют школьники и студенты (24 %). Ключевые интересы посетителей – строительство, развлечения и досуг, финансы и бизнес, образование, рекреация и туризм. Популярные разделы геопортала – цифровая карты и информация о геообъектах, данные о природе, обществе и наследии муниципальных районов Республики Мордовия.

Функционирование геопортальных систем управления системами культурного и исторического наследия основано на функционировании проектно-ориентированной инфраструктуры пространственных данных, опыт построения которой изложен в научной статье [257]. Представленные результаты вызвали интерес научного сообщества: так, в научной статье [180], опубликованной в «Survey Review» (входит во второй квартиль Scopus), отмечена возможность применения результатов в области построения ИПД для повышения доступности геопро пространственных данных и услуг при поддержке всех этапов жизненного цикла управления рисками возникновения природных бедствий в малых островных развивающихся государствах. Предложенная концепция развертывания геопортальных систем как точек доступа к соответствующим пространственным данным, необходимым в различных социальных сферах, проанализирована в статье [138], опубликованной в научном журнале «Indonesian Journal of Geography», индексируемом в Scopus, и направленной на оптимизацию инфраструктуры пространственных данных для поддержки продвижения туристических деревень в Бали (Индонезия).

Ключевые аспекты проектирования геопортальных интерфейсов изложены в научной статье [215], опубликованной в «GeoJournal of Tourism and Geosites» (входит во второй квартиль Scopus). В научной статье [184], опубликованной в том же научном журнале, представленные исследования рассматриваются как инструмент

решения актуальных проблем в области развития туризма. В публикации [241], представленной в журнале «ISPRS International Journal of Geo-Information» (первый квартиль Scopus), отмечен опыт проведенных исследований как еще один шаг к формированию инструментов легкого доступа к пространственным данным посредством веб-систем, использующих цифровые карты в качестве визуального интерфейса для географической информации. В этом же научном журнале в статье [133] при разработке веб-ориентированной геоинформационной системы для управления наследием и решения задачи визуализации пространственных данных в кантоне Набон (Эквадор) использованы результаты в области инжиниринга качественных и функциональных требований, в том числе относящихся к поиску инструментов навигации для поиска геопространственных данных и обеспечения быстрого доступа к атрибутам пространственных объектов. В статье [238] отмечено, что полученный опыт и сформулированные рекомендации использованы при разработке туристического геопортала сельского региона Эстремадура (Испания).

В научной статье [149], также опубликованной в журнале «GeoJournal of Tourism and Geosites», дана детальная характеристика проекта, направленного на пространственно-временную систематизацию информации о культурных ландшафтах посредством геопортальных систем в целях туристско-рекреационного развития региона. В статье [134], опубликованной в том же научном издании и посвященной восстановлению культурных ландшафтов для планирования культурного туризма на Бали, отмечен опыт использования геопортальных систем для решения задачи развития туризма, опирающегося на природную среду и культуру, и, как следствие, сопряженного со значительными рисками. В научной работе [136] использован полученный опыт в области проектирования геоинформационных систем для решения задачи оценки влияния пространственных различий на качество городской среды (сравнительное аналитическое исследование трех городов в Алжире). В частности, берутся в расчет результаты, направленные на реализацию возможности быстрого сравнительного анализа географической информации в пространстве и времени. Наконец, в научном журнале «Discrete Dynamics in Nature and Society» опубликовано исследование [232], опирающееся на опыт использования

нейросетевых алгоритмов в решении задачи пространственного анализа в рамках прогнозирования процессов восстановления сельских районов и устойчивого развития экотуризма на основе больших данных.

Научная публикация [166] посвящена решению задачи геоинформационного обеспечения туристско-рекреационного освоения культурно-ландшафтного комплекса Республики Мордовия. Использование полученного опыта практико-ориентированного применения геоинформационных методик при изучении систем землепользования отмечено в статье [188] при решении задачи пространственной оценки расширения застройки и рекреационных территорий с использованием геоинформационных методов на острове Ко Чанг в Таиланде.

6.3 Выводы по шестой главе

1. Геопорталы представляют собой технологическую основу, реализующую возможность и право граждан, специалистов, управленцев и ученых на получение и распространение пространственной информации, становятся узловыми компонентами обеспечения поддержки принятия управленческих решений в территориально распределенных организационных системах.

2. Следует выделить два направления развития каркаса геопортальной системы. С одной стороны, необходимо придерживаться дедуктивной стратегии, при которой геопортал изначально разрабатывается с целью достижения возможности покрытия решений максимального количества проектных задач. С другой – необходимо эффективно реализовывать индуктивную стратегию, в рамках которой положительно зарекомендовавшие себя улучшения отдельных геопорталов становятся основой для развития каркаса системы. Совместное использование дедуктивной и индуктивной стратегий обеспечит эволюционное улучшение каркаса геопортальных систем и оптимизацию частных решений, разрабатываемых на его основе.

3. Геопорталы как внешний компонент цифровых инфраструктур пространственных данных относятся к классу распределенных веб-систем и, таким образом,

наследуют их характерные особенности. К платформе построения геопортальных систем предъявляются требования универсальности, интерпретируемости, надежности, конфигурируемости, расширяемости. Геопортальные системы могут быть развернуты как на программно-аппаратной архитектуре организации, так и по модели «программное обеспечение как услуга». При первичном развертывании геопортала необходимо иметь гарантии устойчивости системы к нагрузкам определенного уровня с обеспечением необходимой производительности.

4. Разработан геопортальный каркас для быстрого развертывания конкретных геопортальных экземпляров, реализующий обоснованный реестр требований: возможность комбинированного стилизованного отображения векторных и растровых тематических слоев и картографической основы, реализация инструментов навигации по пространственной базе данных и доступа к атрибутивным характеристикам пространственных объектов, возможность получения иной пространственно-ассоциированной текстовой и мультимедийной информации, функционирование системы администрирования базы пространственных данных, возможность модульной интеграции с компонентами Интернета вещей.

5. На основе разработанного геопортального программного каркаса функционируют геопорталы, созданные при поддержке различных фондов и организаций: «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» (грант РФФИ), «Метагеосистемы Мордовии» (грант РНФ) и «Цифровая карта "Путешествуем с Русским географическим обществом"» (грант РГО). Проекты выполняют функцию организации управления региональными системами природного, культурного и исторического наследия. Использование предложенной геопортальной программной платформы для создания геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» позволило региональному отделению Русского географического общества сократить время разработки на 61%, и снизить стоимость внедрения на 71% в сравнении с конкурентными программными решениями. По данным подсистемы аналитики, проект посетило 388,5 тысяч уникальных посетителей. Значительную долю трафика сформировали посетители из всех регионов России, а также Китая, Казахстана, Белоруссии, США, Германии, Финляндии и других стран.

Проект интересен людям 25-44 лет (46 %), значительную долю посетителей составляют школьники и студенты (24 %). Ключевые интересы посетителей – строительство, развлечения и досуг, финансы и бизнес, образование, рекреация и туризм. Для обеспечения поддержки принятия управленческих решений в период весеннего половодья предложено проблемно-ориентированное геопортальное решение «Прогнозирование уровней подъема воды в период половодья», которое признано победителем второго этапа Международного конкурса World AI&Data Challenge Агентства стратегических инициатив по продвижению новых проектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена **научная проблема** разработки интегрального подхода к поддержке принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах, основанного на комплексном последовательном обеспечении этапов систематизации, анализа и распространения пространственных данных. Представлены новые научно обоснованные технические решения в области практико-ориентированного применения пространственных данных для обеспечения поддержки принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. В рамках выполнения диссертационной работы получены следующие результаты.

1. Предложен риск-ориентированный подход, при котором процесс управления рисками в территориально распределенных организационных системах должен быть интегрирован в процесс итерационного внедрения и использования ИПД в качестве входного этапа для стадии анализа требований, при этом новые версии инфраструктуры становятся инструментом мониторинга и управления рисками. Достижимость целевых эффектов внедрения ИПД целесообразно при этом определить через возможность уменьшения влияния негативных рисков и повышения эффективности использования позитивных возможностей организационных территориально распределенных систем. Важной особенностью риск-ориентированного подхода к управлению организационными территориально распределенными системами является необходимость ориентации на гибкую организацию процесса разработки ИПД, итерационное усиление инфраструктуры посредством соблюдения принципов объектно-ориентированного программирования и проектирования.

2. Разработана мультимодельная система хранения пространственных данных об организационных территориально распределенных системах, отличающаяся комбинированным использованием систем управления базами данных различного класса на основе микросервисного подхода для манипулирования знаниями о геосистемах, позволяющая решить задачу консолидации разнородных

пространственных данных в территориально распределенных организационных системах. Предложена модель систематизации данных в мультимодельных хранилищах данных ИПД на основе геосистемного подхода, в рамках которой в качестве важнейшего объекта исследования в ИПД используются геосистемы, описывающие многообразие природных, социальных, экономических процессов и их взаимодействие на локальном, региональном и глобальном уровнях организации географической оболочки. Дана характеристика проекта «Серия настенных карт Русского географического общества "Природное и культурное наследие Республики Мордовия"», который представляет практический пример того, как пространственные данные, консолидируемые в ИПД, становятся ключевым источником информации для разработки картографической продукции.

3. Предложен метод поддержки принятия управленческих решений на основе интерпретации разномасштабных данных ДЗЗ с использованием глубокого машинного обучения, отличающийся способом анализа разномасштабных изображений территории посредством новой архитектурной организации глубокой нейросетевой модели, основанный на применении геосистемного подхода к подготовке и расширению массивов пространственных данных, позволяющий повысить точность решения задач классификации и интерпретации данных о природных и социальных подсистемах организационных территориально распределенных систем. Ключевая идея подхода к анализу геопространственных данных заключается в использовании геосистемного подхода для эффективного расширения обучающего набора данных и разработки глубокой модели GeoSystemNet, способной эффективно эти данные анализировать. Представленный подход приобретает основные преимущества в условиях дефицита геопространственных данных при принятии управленческих решений в организационных системах. Применение модели для классификации наборов пространственных данных, алгоритмически расширенных на основе геосистемного подхода, позволило повысить точность классификации в условиях дефицита обучающих данных на 9 %, а также показать высокую точность классификации при большем объеме обучающих данных (уступающую на 3 % по сравнению с другими глубокими моделями).

4. Разработано алгоритмическое обеспечение проблемно-ориентированных систем управления пространственными данными, основанное на решении задачи классификации пространственной информации с использованием ансамблей неглубоких нейросетевых моделей, отличающееся наличием алгоритма предварительной подготовки и снижения размерности пространственных данных посредством расчета территориальных метрик, а также новым способом объединения моделей машинного обучения в ансамбли посредством расчета весовых коэффициентов классификаторов на основе матриц ошибок, позволяющее повысить устойчивость систем классификации к проблеме переобучения и снизить требования к объему размеченных наборов данных и мощности используемого аппаратного обеспечения. Учет дескрипторов, рассчитанных на основе данных космической съемки территории, цифровой модели рельефа и электронной ландшафтной карты, позволил достичь точности 89 %, что значительно больше этого параметра для сверточной нейросетевой модели. При этом анализ дескрипторов рельефа увеличивает точность на 3 %, а метрик, рассчитанных на основе ландшафтных карт – на 11 %. Важно то, что картограммы представленных дескрипторов хорошо интерпретируются специалистами в области анализа данных и науках о Земле. Важным преимуществом предложенного подхода является его устойчивость в условиях дефицита размеченных данных, характерного для организационных систем значительного территориального охвата, а также возможность повторного использования в рамках исследования новых территориальных систем при условии дообучения и тонкой настройки.

5. Разработан и реализован в виде комплекса программ репозиторий глубоких нейросетевых моделей анализа пространственных данных, отличающийся применением модели хранения данных, в рамках которой реестр глубоких нейронных сетей ассоциирован с информацией о проектных задачах и анализируемых пространственных данных, новым графическим языком проектирования моделей с возможностью их трансляции в программный код, информационной системой подбора модели, позволяющий решить задачу накопления моделей машинного обучения в проблемно-ориентированных системах управления организационными

территориально распределенными системами для эффективного решения проектных задач в области обеспечения условий устойчивого развития регионов. Разработана формализованная схема хранения моделей в форме метаязыка, которая делает возможной их конвертацию в представления, используемые современными фреймворками машинного обучения. С точки зрения программной реализации каркас системы функционирует на основе архитектурного паттерна MVC, модуль визуального проектирования нейросетевых моделей представляет собой один из основных компонентов репозитория и позволяет визуализировать нейросетевые модели в виде граф-схемы с возможностью интерактивного онлайн-редактирования их топологии и архитектуры.

6. Разработана и реализована в виде программного каркаса практико-ориентированная геопортальная технология управления пространственно распределенными организационными системами, отличающаяся новой модульной организацией компонентов на основе микросервисной архитектуры и комплексным подходом к решению задач мониторинга, удаленного управления и аналитики, позволяющая обеспечить эффективное развертывание веб-ориентированных геоинформационных систем для визуализации и распространения пространственных данных об организационных территориально распределенных системах. Геопортальный каркас реализует обоснованный реестр требований: возможность комбинированного стилизованного отображения векторных и растровых тематических слоев и картографической основы, реализация инструментов навигации по пространственной базе данных и доступа к атрибутивным характеристикам пространственных объектов, возможность получения иной пространственно-ассоциированной текстовой и мультимедийной информации, функционирование системы администрирования базы пространственных данных, возможность модульной интеграции с компонентами Интернета вещей.

7. На основе разработанного геопортального программного каркаса функционируют геопорталы, созданные при поддержке различных фондов и организаций: «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» (грант РФФИ), «Метагеосистемы Мордовии» (грант РНФ) и «Цифровая карта "Путешествуем с Русским

географическим обществом"» (грант РГО). Проекты выполняют функцию организации управления региональными системами природного, культурного и исторического наследия. Для обеспечения информационной поддержки в области принятия управленческих решений при прогнозировании уровней воды в период весеннего половодья предложено проблемно-ориентированное геопортальное решение «Прогнозирование уровней подъема воды в период половодья», которое признано победителем второго этапа Международного конкурса World AI&Data Challenge Агентства стратегических инициатив по продвижению новых проектов. Разработан модульный инструментарий для обеспечения интеграции устройств Интернета вещей вокруг геопортальных технологий диспетчеризации для решения задачи дистанционного управления территориально распределенными организационными системами. Использование разработанной геопортальной программной платформы для создания геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» позволило региональному отделению Русского географического общества сократить время разработки на 61%, и снизить стоимость внедрения на 71% в сравнении с конкурентными программными решениями. По данным подсистемы аналитики, проект посетило 388,5 тысяч уникальных посетителей. Значительную долю трафика сформировали посетители из всех регионов России, а также Китая, Казахстана, Белоруссии, США, Германии, Финляндии и других стран. Проект интересен людям 25-44 лет (46 %), значительную долю посетителей составляют школьники и студенты (24 %). Ключевые интересы посетителей – строительство, развлечения и досуг, финансы и бизнес, образование, рекреация и туризм.

Список сокращений

АСУ – автоматизированная система управления
БНФ – Бэкуса-Наура форма
ГИС – геоинформационная система
ДЗЗ – дистанционное зондирования Земли
ИНС – искусственная нейронная сеть
ИПД – инфраструктура пространственных данных
ИТЦ – инженерно-технический центр
КИТ – Комплексная инфраструктура территории
КИХ – конечная импульсная характеристика
ЛПР – лицо, принимающее решение
НИР – научно-исследовательская работа
НТР – научно-технологическое развитие
ПСМ – полносвязная модель
РГО – Русское географическое общество
РНФ – Российский научный фонд
РФФИ – Российский фонд фундаментальных исследований
СУБД – система управления базами данных
ЦМР – цифровая модель рельефа
ЦП – центральный процессор
ЦХОД – центр хранения и обработки данных
ЦХПД – центр хранения пространственных данных
ЭГП – экзогеодинамический процесс
ACID – Atomicity, Consistency, Isolation, Durability
API – Application Programming Interface
CNN – Convolutional Neural Network
CPU – Central Processing Unit
CRUD – Create Read Update Delete
GPS – Global Positioning System

GPU – Graphics Processing Unit
GUI – Graphical User Interface
HTML – HyperText Markup Language
HTTP – HyperText Transfer Protocol
IaaS – Infrastructure as a Service
IoT – Internet of Things
JSON – JavaScript Object Notation
M2M – Machine-to-Machine
MVC – Model View Controller
NDWI – Normalized Difference Water Index
RELU – Rectified Linear Unit
REST – Representational State Transfer
ROC – Receiver Operating Characteristic
SaaS – Software as a Service
SVM – Support Vector Machines
SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
UI – User Interface
URL – Uniform Resource Locator
UX – User Experience

Список использованных источников

1. Анализ опыта в области проектирования, разработки, внедрения и эффективного использования цифровых инфраструктур пространственных данных в области устойчивого развития территорий / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, В. В. Занозин, А. Н. Бармин // Астрах. вестн. экол. образования. – 2020. – № 1(55). – С. 107–128.
2. Анализ принципов и методов формирования хранилища временных рядов и организации программных интерфейсов в репозитории нейросетевых моделей / С. А. Ямашкин, М. А. Скворцов, М. В. Большакова [и др.] // Соврем. наукоем. технологии. – 2021. – № 8. – С. 143–147.
3. Анализ, обработка и управление информацией в инфраструктурах пространственных данных / С.А. Ямашкин, А.А. Ямашкин, С.А. Федосин, С.С. Моисеев // XI Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» : сб. науч. трудов. – Нижний Архыз, 2022. – С. 124–131. – DOI 10.18522/syssyn-2022-24.
4. Артамонов Ю. С. Разработка распределенных приложений сбора и анализа данных на базе микросервисной архитектуры / Ю. С. Артамонов, С. В. Востокин // Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук. – 2016. – Т. 18, № 4. – С. 688–693.
5. Баринов В. Н. Эффективные технологии в управлении земельными ресурсами / В. Н. Баринов, Н. И. Трухина, Н. Б. Хахулина // ФЭС: Финансы. Экономика. Стратегия. – 2020. – Т. 17, № 1. – С. 49–54.
6. Бершадский А. М. Геоинформационный подход к мониторингу региональных образовательных систем / А. М. Бершадский, А. С. Бождай // Системы управления и информационные технологии : Междунар. сб. тр. – 1998. – № 12. – С. 39.
7. Бершадский А. М. Концепция мониторинга комплексной инфраструктуры территории : монография / А. М. Бершадский, А. С. Бождай // Федер. агентство по образованию, Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования

«Пензенский государственный университет» (ПГУ). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2010. – 241 с.

8. Бершадский А. М. Управление природно-социально-производственными системами на основе пространственных данных / А. М. Бершадский, С. А. Ямашкин // Современ. наукоем. технологии. – 2023. – № 10. – С. 10–17. – DOI 10.17513/snt.39785.

9. Бождай А. С. Комплексная инфраструктура территории: методы и модели информационного мониторинга / А. С. Бождай // Информ. технологии. – 2009. – № 9. – С. 57–63.

10. Бождай А. С. Концепция и методы мониторинга комплексной инфраструктуры территории : дис. д-ра техн. наук / А. С. Бождай. – Пенза, 2010. – 352 с.

11. Бождай А. С. Концепция комплексной инфраструктуры территории для решения проблемы интеграции межотраслевой статистики / А. С. Бождай // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7, № 1. – С. 214–220.

12. Бождай А. С. Концепция мониторинга городской системы общего образования в составе комплексной инфраструктуры территории / А. С. Бождай // Дистанц. и виртуал. обучение. – 2011. – № 3. – С. 94–110. – EDN NQVYCN.

13. Бождай А. С. Проблема межотраслевой интеграции данных и методы ее решения на основе концепции комплексной инфраструктуры территории / А. С. Бождай // Открытое образование. – 2011. – № 1. – С. 57–67.

14. Борзов С. М. Исследование эффективности спектрально-пространственной классификации данных гиперспектральных наблюдений / С. М. Борзов, О. И. Потатуркин // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 32–42.

15. Борзов С. М. Спектрально-пространственные методы классификации гиперспектральных изображений. Обзор / С. М. Борзов, О. И. Потатуркин // Автометрия. – 2018. – Т. 54, № 6. – С. 64–86.

16. Буравцев А. В. Облачные вычисления для больших геопространственных данных / А. В. Буравцев, В. Я. Цветков // Информация и космос. – 2019. – № 3. – С. 110–115.

17. Викторов С. В. Геоботанические индикационные карты и методы их составления / С. В. Викторов // Принципы и методы геоботанического картографирования. – М. : Наука, 1962. – С. 72–77.
18. Возможности различных многоспектральных спутниковых данных для оценки состояния неиспользуемых пожароопасных и обводняемых торфопеработок / М. А. Медведева, А. Е. Возбранная, А. А. Сиринов, А. А. Маслов // Исслед. Земли из космоса. – 2017. – № 3. – С. 76–84.
19. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории / А. И. Галушкин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2012. – 496 с.
20. Географический атлас Республики Мордовия / А. А. Ямашкин, С. М. Вдовин, В. А. Юрченков [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2012. – 204 с.
21. Географический портал как модель национального ландшафта / С. М. Вдовин, С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин // Вестн. Рязан. гос. ун-та им. С.А. Есенина. – 2016. – № 3 (52). – С. 146–154.
22. География и мониторинг биоразнообразия / Н. В. Лебедева, Д. А. Кривоуцкий, Ю. Г. Пузаченко [и др.]. – М. : Изд-во НУМЦ, 2002. – 432 с.
23. Геоинформационная модель долины среднего течения реки Суры для формирования системы особо охраняемых природных территорий / А. А. Ямашкин, Т. Б. Силаева, С. А. Ямашкин, О. А. Зарубин // Вестн. Рязан. гос. ун-та им. С. А. Есенина. – 2019. – № 1 (62). – С. 92–104.
24. Геоконцептная система как фактор устойчивого развития региона / С. М. Вдовин, А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин, С. А. Ямашкин // Изв. высш. учеб. заведений. Поволж. регион. Естеств. науки. – 2017. – № 2 (18). – С. 65–77.
25. Геопорталы в составе инфраструктур пространственных данных: российские академические ресурсы и геосервисы / А. В. Кошкарев, А. Н. Антипов, А. Р. Батуев [и др.] // География и природ. ресурсы. – 2008. – № 1. – С. 21–32.
26. Геопорталы российских особо охраняемых природных территорий / Н. А. Алексеенко, А. В. Кошкарев, Б. М. Курамагомедов [и др.] // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80, № 5. – С. 34–46.

27. Геосистемный подход в развитии методов и алгоритмов анализа пространственных данных / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин, А. В. Кирюшин // Инженер. вестн. Дона. – 2022. – № 11 (95). – С. 283–293.
28. Геоэкологический анализ и прогноз хозяйственного освоения подземных вод / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, Г. В. Зибров [и др.] // Успехи соврем. естествознания. – 2020. – № 8. – С. 83–91.
29. ГОСТ Р 58570–2019. Инфраструктура пространственных данных. Общие требования. – Введ. 2020-06-01. – М. : Стандартинформ, 2019. – 27 с.
30. ГОСТ Р ИСО 31000–2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – Введ. 2020-03-01. – М. : Стандартинформ, 2020. – 14 с.
31. Денисова А. Ю. Обнаружение аномалий на гиперспектральных изображениях / А. Ю. Денисова, В. В. Мясников // Компьютер. оптика. – 2014. – Т. 38, № 2. – С. 287–296.
32. Дистанционное зондирование Земли и геоинформационные системы / В. Н. Копенков, В. В. Сергеев, В. А. Сойфер, А. В. Чернов // Вестн. Рос. фонда фундам. исслед. – 2017. – № 3 (95). – С. 78–96.
33. Захарова Л. Н. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Буря по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. / Л. Н. Захарова, А. И. Захаров // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 273–277.
34. Интеграция знаний в цифровых инфраструктурах пространственных данных / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина, В. В. Занозин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та им. Н.П. Огарёва, 2021. – 216 с.
35. Информационные ресурсы регионального геопортала как основа управления метагеосистемами региона / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, Д. С. Куманькин, М. А. Скворцов // Нелиней. мир. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 47–60. – DOI 10.18127/j20700970-202302-04.
36. Инфраструктура пространственных данных для научных исследований / О. М. Атаева, А. В. Кошкарёв, А. А. Медведев [и др.] // Труды XIV Всероссийской

объединенной конференции «Интернет и современное общество». – СПб., 2011. – С. 7–10.

37. Использование ансамбль-систем для картографирования ландшафтов / С. А. Ямашкин, М. М. Радованович, А. А. Ямашкин [и др.] // Геодезия и картография. – 2016. – № 7. – С. 42–49.

38. Использование технологий машинного обучения при решении геоинформационных задач / А. А. Колесников, П. М. Кикин, Е. В. Комиссарова, Е. Л. Касьянова // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 371–384.

39. Космачёв К. П. Проблемы экономико-географической экспертизы информационной базы территориальной организации производства / К. П. Космачёв // Докл. Ин-та географии Сибири и Дал. Востока. – 1974. – № 45. – С. 3–11.

40. Кошкарев А. В. Инфраструктура распределенной среды хранения, поиска и преобразования пространственных данных / А. В. Кошкарев, В. М. Ряховский, В. А. Серебряков // Открытое образование. – 2010. – № 5. – С. 61–73.

41. Кошкарев А. В. Картографические Web-сервисы геопорталов: технологические решения и опыт реализации / А. В. Кошкарев, В. С. Тикунов, С. А. Тимошин // Пространств. данные. – 2009. – № 3. – С. 6–12.

42. Кравец А. Г. Согласованное управление ресурсами рынка труда и процессом подготовки специалистов : автореф. дис. д-ра техн. наук / А. Г. Кравец. – Астрахань, 2007. – 31 с.

43. Кравец А. Г. Теория согласованного управления региональными ресурсами рынка труда и качеством подготовки специалистов: основные положения / А. Г. Кравец // Изв. Волгогр. гос. техн. ун-та. – 2007. – № 1 (27). – С. 86–89.

44. Кривогуз Д. О. Методы оценки оползневой чувствительности региона. Краткий обзор / Д. О. Кривогуз // Безопасность в техносфере. – 2017. – Т. 6, № 3. – С. 57–60.

45. Кузнецов А. В. Сравнение алгоритмов управляемой поэлементной классификации гиперспектральных изображений / А. В. Кузнецов, В. В. Мясников // Компьютер. оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 494–502.

46. Куманькин Д. С. Архитектурные принципы построения конвейеров машинного обучения для решения задачи управления процессом анализа данных дистанционного зондирования Земли / Д. С. Куманькин, С. А. Ямашкин // Нелиней. мир. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 27–37. – DOI 10.18127/j20700970-202303-03.
47. Лексин В. Н. К методологии исследования и регулирования процессов территориального развития / В. Н. Лексин // Регион: Экономика и Социология. – 2009. – № 3. – С. 19–40.
48. Львович И. Я. Использование информационных систем в управлении производством / И. Я. Львович, А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров // Науч. взгляд в будущее. – 2018. – Т. 3, № 9. – С. 94–98. – DOI 10.30888/2415-7538.2018-09-3-048.
49. Львович Я. Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения / Я. Е. Львович. – Воронеж : Кварта, 2006. – 415 с.
50. Методы и алгоритмы оценки ландшафтного разнообразия в морфологическом аспекте на примере Центральной части дельты реки Волги / В. В. Занозин, А. Н. Бармин, С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 114–130.
51. Многофакторный анализ межкомпонентных связей в геосистемах на основе имитационного моделирования и численных методов / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин, А. В. Кирюшин // Инженер. вестн. Дона. – 2022. – № 11 (95). – С. 411–424.
52. Морозов М. А. Новая парадигма развития туризма и индустрии гостеприимства в условиях цифровой экономики / М. А. Морозов, Н. С. Морозова // Вестн. Рос. нового ун-та. Сер. Человек и общество. – 2018. – № 1. – С. 135–141.
53. Мясников В. В. Построение эффективных линейных локальных признаков в задачах обработки и анализа изображений / В. В. Мясников // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 3. – С. 162–177.
54. Николаев В. А. Классификация и мелкомасштабное картографирование ландшафтов / В. А. Николаев. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 62 с.

55. Новиков Д. А. Институциональное управление организационными системами / Д. А. Новиков. – М.: ИПУ РАН, 2004. – 68 с.
56. Новиков Д. А. Прикладные модели информационного управления / Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили. – М.: ИПУ РАН. – 2004. – 129 с.
57. Новиков Д. А. Стимулирование в организационных системах / Д. А. Новиков. – М.: Синтег, 2003. – 312 с.
58. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами / Д. А. Новиков. – М. : Моск. психол.-соц. ун-т, 2005. – 584 с.
59. Правосудов А. Р. Интернет вещей: организация автоматизированного полива / А. Р. Правосудов, С. А. Ямашкин // Соврем. наукоем. технологии. – 2023. – № 2. – С. 83–87.
60. Применение ГИС в анализе морфологической структуры ландшафтов / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, А. А. Кликунов [и др.] // Вест. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2013. – № 3. – С. 115–122.
61. Применение нейросетевых подходов для сегментации геопространственных изображений при решении задач управления территориальными системами / А. А. Камаева, А. С. Ротанов, Ю. Е. Тепаева, С. А. Ямашкин // Инженер. вестн. Дона. – 2023. – № 2 (98). – С. 224–234.
62. Природа Земли из космоса : Изуч. природ. ресурсов Земли с помощью данных, передаваемых со спутников по радиоканалам / В. В. Козодеров, Л. Б. Карвовская, А. Д. Клещенко [и др.]; сост. А. П. Тищенко, С. В. Викторov; под ред. Н. П. Козлова. – Л. : Гидрометеиздат, 1984. - 151 с.
63. Проектирование репозитория глубоких нейронных сетей: анализ функциональных требований и разработка метаязыка для описания моделей / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина [и др.] // Соврем. наукоем. технологии. – 2021. – № 9. – С. 138–142.
64. Пространственная модель ландшафтов западных склонов Приволжской возвышенности / А. А. Ямашкин, Л. А. Новикова, С. А. Ямашкин [и др.] // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2015. – Т. 25, № 3. – С. 124–132.

65. Разработка алгоритма классификации данных дистанционного зондирования Земли с применением методов глубокого машинного обучения для анализа геосистемной модели территории / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, В. В. Занозин [и др.] // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82, № 4. – С. 54–64.
66. Разработка нейросетевой модели для анализа пространственных данных / Е. О. Ямашкина, С. А. Ямашкин, О. В. Платонова, С. М. Коваленко // Russian Technological Journal. – 2022. – Т. 10, № 5. – С. 28–37. – DOI 10.32362/2500-316X-2022-10-5-28-37.
67. Савиных В. П. Геоданные как системный информационный ресурс / В. П. Савиных, В. Я. Цветков // Вестн. Рос. акад. наук. – 2014. – Т. 84, № 9. – С. 826. – DOI 10.7868/S0869587314090278.
68. Сергеев В. В. Параметрическая модель автокорреляционной функции космических гиперспектральных изображений / В. В. Сергеев, Р. Р. Юзькив // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40, № 3. – С. 416–421.
69. Систематизация данных в цифровых инфраструктурах пространственных данных / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина [и др.] // Моск. экон. журн. – 2021. – № 10. – DOI 10.24411/2413-046X-2021-10590.
70. Системные аспекты анализа геопространственной информации в цифровых инфраструктурах пространственных данных для оценки потенциала минерально-сырьевой ресурсной базы / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина [и др.] // Успехи соврем. естествознания. – 2022. – № 1. – С. 56–63.
71. Солнцев Н. А. Природная география, ландшафтоведение и естествознание / Н. А. Солнцев // Вестн. Моск. ун-та. Сер. География. – 1977. – № 1. – С. 10–15.
72. Сочава Б. В. Введение в учение о геосистемах / Б. В. Сочава. – Новосибирск : Наука, Сиб. отд-ние, 1978. – 319 с.
73. Сравнительный анализ подходов к управлению базами данных для организации хранилища репозитория нейросетевых моделей / С. А. Ямашкин, М. А. Скворцов, М. В. Большакова [и др.] // Соврем. наукоем. технологии. – 2021. – № 6–1. – С. 108–113.

74. Сумзина Л. В. Геоинформационный сервис как профиль образовательной программы / Л. В. Сумзина, С. В. Шайтура // Славян. форум. – 2017. – № 3(17). – С. 14–23.
75. Таганов А. И. Применение нечетких множеств для формализации процессов анализа и идентификации важности рисков программного проекта / А. И. Таганов // Системы упр. и информ. технологии. – 2007. – № 4 (30). – С. 46–51.
76. Тарарин А. М. Понятие и реализация базовых наборов пространственных данных в национальной системе пространственных данных Российской Федерации / А. М. Тарарин // Вестн. СГУГиТ (Сиб. гос. ун-та геосистем и технологий). – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 44–58.
77. Тестовые полигоны для диагностики состояния геосистем и развития методов интерпретации данных дистанционного зондирования Земли / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, М. Р. Байчурин [и др.] // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. – 2022. – № 4. – С. 4–18. – DOI 10.17308/geo/1609-0683/2022/4/4-18.
78. Федосин С. А. Технологический процесс решения задачи моделирования структуры землепользования на базе данных ДЗЗ / С. А. Федосин, С. А. Ямашкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 356–358.
79. Федюшкин Н. А. Исследование репозитория моделей нейронных сетей / Н. А. Федюшкин, С. А. Ямашкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2021. – № 3. – С. 28–30.
80. Хорошев А. В. Полимасштабная организация географического ландшафта / А. В. Хорошев. – М. : Товарищество науч. изд. КМК, 2016. – 416 с.
81. Чхартишвили А. Г. Информационное равновесие / А. Г. Чхартишвили // Управление большими системами: сб. тр. молодых ученых – общ. ред. Д. А. Новикова. – М. : ИПУ РАН, 2003. – Вып. 3. – С. 100–119.
82. Чхартишвили А. Г. Согласованное информационное управление / А. Г. Чхартишвили // Проблемы упр. – 2011. – № 3. – С. 43–48.

83. Шайтура С. В. Использование геопорталов в электронной коммерции / С. В. Шайтура // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Экономика. – 2015. – № 2. – С. 120–127.
84. Шайтура С. В. Мониторинг земель районов Дальнего Востока / С. В. Шайтура, М. Ю. Васкина // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2020. – № 1 (180). – С. 28–33.
85. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.
86. Шолле Ф. Глубокое обучение на Python / Ф. Шолле. – СПб.: Питер, 2018. – 400 с.
87. Якушев В. П. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства / В. П. Якушев, Н. Н. Дубенок, Е. А. Лупян // Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 3. – С. 11–23.
88. Ямашкин А. А. Анализ метагеосистем полигона «Инерка» посредством ансамблей моделей машинного обучения / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 613–628. – DOI 10.35595/2414-9179-2022-1-28-613-628.
89. Ямашкин А. А. Базовые геоинформационные ресурсы для оптимизации регионального землепользования / А. А. Ямашкин, А. Н. Фролов, С. А. Ямашкин // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2016. – № 12 (143). – С. 72–76.
90. Ямашкин А. А. Внедрение цифровых технологий в образовательный процесс: познаем мир и путешествуем с помощью геоинформационных систем / А. А. Ямашкин, В. З. Макаров, С. А. Ямашкин // Моск. экон. журн. – 2023. – Т. 8, № 2. – DOI 10.55186/2413046X_2023_8_2_89.
91. Ямашкин А. А. Геопортал как форпост в исследовании культурного ландшафта / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, О. А. Зарубин // Центр и периферия. – 2018. – № 3. – С. 70–76.

92. Ямашкин А. А. Геопортал природного и культурного наследия как инструмент управления системами туристско-рекреационного освоения / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Инженер. вестн. Дона. – 2023. – № 5 (101). – С. 701–714.
93. Ямашкин А. А. Геопорталы как инструмент доступа к облачным хранилищам данных о метагеосистемах / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Изв. Саратов. ун-та. Новая сер. Сер. Науки о Земле. – 2022. – Т. 22, № 4. – С. 251–261. – DOI 10.18500/1819-7663-2022-22-4-251-261.
94. Ямашкин А. А. ГИС-моделирование ландшафтного разнообразия / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, А. Г. Акашкина // Геодезия и картография. – 2013. – № 11. – С. 40–45.
95. Ямашкин А. А. Использование нейронных сетей прямого распространения для ландшафтного картографирования на базе космических снимков / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Геодезия и картография. – 2014. – № 11. – С. 52–58.
96. Ямашкин А. А. Методика функционального геоэкологического зонирования метагеосистем для целей устойчивого эколого-социально-экономического развития региона (на примере Республики Мордовия) / А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин, С. А. Ямашкин // International Agricultural Journal. – 2022. – Т. 65, № 3. – DOI 10.55186/25876740_2022_6_3_9.
97. Ямашкин А. А. Применение алгоритма выделения краев к решению задачи моделирования границ ландшафтов / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. – 2013. – № 2. – С. 28–34.
98. Ямашкин А. А. Пространственно-временное прогнозирование оползневых процессов на основе геосистемного подхода / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, О. А. Зарубин // Успехи соврем. естествознания. – 2020. – № 6. – С. 129–137.
99. Ямашкин А. А. Разработка проектно-ориентированной инфраструктуры пространственных данных с применением облачных технологий / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин, С. А. Федосин // Радиопромышленность. – 2019. – № 3. – С. 79–90.

100. Ямашкин А. А. Синтез и распространение пространственных данных о метагеосистемах для информационной поддержки управленческих решений / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Региональные геосистемы. – 2022. – Т. 46, № 2. – С. 241–253. – DOI 10.52575/2712-7443-2022-46-2-241-253.
101. Ямашкин А. А. Структура региональной ГИС для целей ландшафтного планирования / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Изв. Смол. гос; ун-та. – 2014. – № 4 (28). – С. 305–314.
102. Ямашкин А. А. Управление метагеосистемами региона на основе идентификации, анализа и мониторинга рисков / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // ИнтерКарто. ИнтерГИС. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 123–142. – DOI 10.35595/2414-9179-2023-1-29-123-142.
103. Ямашкин А. А. Управление территориальными системами культурного ландшафта / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин // Инженер. вестн. Дона. – 2023. – № 3(99). – С. 171–181.
104. Ямашкин А. А. Цифровые инфраструктуры пространственных данных и модели метагеосистем территорий для устойчивого развития регионов / А. А. Ямашкин, С. А. Ямашкин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2023. – 208 с.
105. Ямашкин А. А. Цифровые технологии анализа геопространственных данных для целей устойчивого развития региона: опыт Мордовского университета / А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин, С. А. Ямашкин // Моск. экон. журн. – 2022. – Т. 7, № 5. – DOI 10.55186/2413046X_2022_7_5_271.
106. Ямашкин С. А. Анализ межкомпонентных связей в метагеосистемах на основе имитационного моделирования / С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина, В. В. Никулин // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та. Сер. Упр., вычислит. техника и информатика. – 2022. – № 4. – С. 78–87. – DOI 10.24143/2073-5529-2022-4-78-87.
107. Ямашкин С. А. Анализ производительности и оптимизация высоконагруженных геопортальных систем / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина // Соврем. наукоем. технологии. – 2021. – № 10. – С. 108–112.

108. Ямашкин С. А. Выделение фактов о геопозиции из текстов на естественном языке / С. А. Ямашкин, С. А. Федосин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2018. – № 11. – С. 265–268.
109. Ямашкин С. А. Гибридная система анализа данных дистанционного зондирования земли / С. А. Ямашкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2015. – № 4. – С. 173–175.
110. Ямашкин С. А. Интеграция, хранение и обработка больших массивов пространственно-временной информации в цифровых инфраструктурах пространственных данных / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин // Соврем. наукоем. технологии. – 2021. – № 5. – С. 108–113.
111. Ямашкин С. А. Классификация метагеосистем с применением моделей машинного обучения / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин // Геодезия и картография. – 2022. – Т. 83, № 7. – С. 25–38. – DOI 10.22389/0016-7126-2022-985-7-25-38.
112. Ямашкин С. А. Критерии эффективности решения задач хранения, анализа и распространения данных в проектно-ориентированных инфраструктурах пространственных данных / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2020. – № 1. – С. 29–31.
113. Ямашкин С. А. Моделирование географически распределённой телекоммуникационной сети / С. А. Ямашкин, Е. О. Ладанова // Автоматизация. Соврем. технологии. – 2019. – Т. 73, № 7. – С. 307–313.
114. Ямашкин С. А. Повышение эффективности алгоритмов глубокого машинного обучения для раннего обнаружения и прогнозирования развития лесных пожаров / С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина // Перспективы науки. – 2020. – № 9. – С. 58–60.
115. Ямашкин С. А. Повышение эффективности процесса интерпретации данных дистанционного зондирования Земли за счет анализа дескрипторов окрестности / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин // Вестн. Морд. ун-та. – 2018. – Т. 28, № 3. – С. 352–365.
116. Ямашкин С. А. Принципы построения сверточно-рекуррентной нейросетевой модели для прогнозирования пространственно-временных процессов

/ С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина, С. М. Коваленко // Наука и бизнес: пути развития. – 2020. – № 9. – С. 154–156.

117. Ямашкин С. А. Проблемы проектирования геопортальных интерфейсов / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, О. А. Зарубин // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80, № 2. – С. 46–56.

118. Ямашкин С. А. Проектирование нейросетевых моделей посредством методов визуального программирования / С. А. Ямашкин, А. А. Камаева // Изв. высш. учеб. заведений. Поволж. регион. Техн. науки. – 2021. – № 3(59). – С. 14–24.

119. Ямашкин С. А. Проектно-ориентированные геопортальные системы в решении задачи прогнозирования уровней воды в период весеннего половодья / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина // Соврем. наукоем. технологии. – 2021. – № 11-1. – С. 75–81.

120. Ямашкин С. А. Разработка прикладного программного интерфейса для обеспечения обмена данными с репозиторием нейросетевых моделей / С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина, А. А. Ямашкин // Соврем. наукоем. технологии. – 2022. – № 5-2. – С. 226–231. – DOI 10.17513/snt.39175.

121. Ямашкин С. А. Разработка рекомендательной системы для подбора и конфигурирования глубоких нейросетевых моделей / С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина // Инженер. вестн. Дона. – 2022. – № 12 (96). – С. 147–154.

122. Ямашкин С. А. Репозиторий нейросетевых моделей для анализа пространственных данных / С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина, А. А. Ямашкин // Инженер. вестн. Дона. – 2022. – № 12 (96). – С. 245–256.

123. Ямашкин С. А. Структура регионального геопортала как инструмента публикации и распространения геопространственных данных / С. А. Ямашкин // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2015. – № 6. – С. 223–225.

124. Ямашкин С. А. Трансляция нейросетевых моделей в программный код на языке программирования высокого уровня / С. А. Ямашкин, Е. О. Ямашкина // Инженер. вестн. Дона. – 2022. – № 6 (90). – С. 226–232.

125. Ямашкин С. А. Управление в организационных системах на основе пространственных данных: геопортальный подход / С. А. Ямашкин // Современ. наукоем. технологии. – 2023. – № 3. – С. 57–61. – DOI 10.17513/snt.39556.
126. Ямашкин С. А. Управление природно-социально-производственными системами посредством геопорталов / С. А. Ямашкин // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 7. – С. 122–128. – DOI 10.17513/snt.39705.
127. Ямашкин С. А. Управление природно-социально-производственными системами на основе концепции интернета вещей: геопортальный подход / С. А. Ямашкин, А. А. Ямашкин // Геодезия и картография. – 2023. – Т. 84, № 9. – С. 34–43. – DOI 10.22389/0016-7126-2023-999-9-34-43.
128. Ямашкина Е. О. Тестирование и выбор графического процессора для обучения нейронных сетей с применением технологии NVIDIA CUDA для анализа пространственных данных / Е. О. Ямашкина, С. А. Ямашкин, С. М. Коваленко // Науч.-техн. вестн. Поволжья. – 2020. – № 1. – С. 97–99.
129. A Deep Learning Approach for Detecting Traffic Accidents from Social Media Data / Z. Zhang, Q. He, J. Gao [et al.] // Transportation research part C: emerging technologies. – 2018. – Vol. 86. – P. 580–596.
130. A Neural Attention Model for Urban Air Quality Inference: Learning the Weights of Monitoring Stations / W. Cheng, Y. Shen, Y. Zhu [et al.] // Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence. – New Orleans, 2018. – P. 16607.
131. A Review on Early Forest Fire Detection Systems Using Optical Remote Sensing / P. Barmoutis, P. Papaioannou, K. Dimitropoulos [et al.] // Sensors. – 2020. – Vol. 20, №. 22. – С. 6442.
132. A Spatiotemporal Object-Oriented Data Model for Landslides (LOOM) / M. Valiante, D. Guida, M. Della Seta, F. Bozzano // Landslides. – 2021. – Vol. 18, № 4. – P. 1231–1244.
133. A Web-Based Geoinformation System for Heritage Management and Geovisualisation in Cantón Nabón (Ecuador) / A. Collado, G. Mora-Navarro, V. Heras [et al.] // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – Vol. 11, №. 1. – P. 4.

134. Adhika I. M. Reinvigorating Cultural Landscapes for Planning Cultural Tourism in Bali / I. M. Adhika, I. Putra // *GeoJournal of Tourism and Geosites*. – 2020. – Vol. 33. – P. 1462–1469.
135. Al-Saqqa S. Agile Software Development: Methodologies and Trends / S. Al-Saqqa, S. Sawalha, H. AbdelNabi // *International Journal of Interactive Mobile Technologies*. – 2020. – Vol. 14, № 11. – P. 246–270.
136. Allal A. The Effect of Spatial Differences on the Quality of Urban Life a Comparative Analytical Study of Three Cities in the High Plateaux Region of Algeria / A. Allal, K. Boudjemaa, S. Dehimi // *GeoJournal of Tourism and Geosites*. – 2022. – Vol. 40, №. 1. – P. 181–190.
137. An Open Data Infrastructure for the Study of Anthropogenic Hazards Linked to Georesource Exploitation / B. Orlecka-Sikora, S. Lasocki, J. Kocot [et al.] // *Scientific data*. – 2020. – Vol. 7, № 1. – P. 89.
138. Analysis of Spatial Data Infrastructure (SDI) to Support Tourism Village Promotion in Badung Regency, Bali, Indonesia / I. K. Sardiana, N. L. R. Purnawan, R. Suyarto [et al.] // *Indonesian Journal of Geography*. – 2021. – Vol. 53, №. 2. – P. 179–184.
139. Aniche M. Current Challenges in Practical Object-oriented Software Design / M. Aniche, J. Yoder, F. Kon // 2019 IEEE ACM 41st International Conference on Software Engineering: New Ideas and Emerging Results (ICSE-NIER). – Montreal, 2019. – P. 113–116.
140. Application of Deep Convolutional Neural Networks for Detecting Extreme Weather in Climate Datasets / Y. Liu, E. Racah, J. Correa [et al.] // *arXiv preprint*. – 2016. – arXiv:1605.01156.
141. Application of Visual Programming Methods to the Design of Neural Networks / E.O. Yamashkina, S.A. Yamashkin, O.V. Platonova, S.M. Kovalenko // *Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2021. – Vol. 231. – P. 680–689.

142. Artificial Intelligence Based Ensemble Modeling for Multi-station Prediction of Precipitation / V. Nourani, S. Uzelaltinbulat, F. Sadikoglu [et al.] // Atmosphere. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 80.
143. Bidirectional-convolutional LSTM Based Spectral-spatial Feature Learning for Hyperspectral Image Classification / Q. Liu, F. Zhou, R. Hang [et al.] // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 12. – P. 1330.
144. Candela L. Managing Big Data through Hybrid Data Infrastructures / L. Candela, D. Castelli, P. Pagan // ERCIM News. – 2018. – № 89. – P. 37–38.
145. Chen Y. Spectral-spatial Classification of Hyperspectral Data Based on Deep Belief Network / Y. Chen, X. Zhao, X. Jia // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 8, № 6. – P. 2381–2392.
146. Classification of Metageosystems by Ensembles of Machine Learning Models / S. Yamashkin, A. Yamashkin, M. Radovanović [et al.] // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2022. – Vol. 70, № 9. – P. 258–268.
147. Conceptualizing Community in Disaster Risk Management / A. Räsänen, H. Lein, D. Bird, G. Setten // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2020. – Vol. 45. – P. 101485.
148. Configuring and Optimizing of Convolutional Neural Networks for Analyzing the Structure of Metageosystems / S.A. Yamashkin, A.A. Yamashkin, A.A. Kamaeva [et al.] // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 597. – P. 346–356.
149. Cultural Landscapes Space-Temporal Systematization of Information in Geoportals for the Purposes of Region Tourist and Recreational Development / A. A. Yamashkin, S. A. Yamashkin, M. Yu. Aksyonova [et al.] // Geojournal of Tourism and Geosites. – 2020. – Vol. 29, № 2. – P. 440–449.
150. Dareshiri S. A Recommender Geoportal for Geospatial Resource Discovery and Recommendation / S. Dareshiri, M. Farnaghi, M. Sahelgozin // Journal of Spatial Science. – 2019. – Vol. 64, № 1. – P. 49–71.
151. Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data / N. Kussul, M. Lavreniuk, S. Skakun [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2017. – Vol. 14, № 5. – P. 778–782.

152. Deep Representation Learning for Trajectory Similarity Computation / X. Li, K. Zhao, G. Cong [et al.] // 2018 IEEE 34th International Conference on Data Engineering (ICDE). – Paris, 2018. – P. 617–628.
153. Dest-ResNet: A Deep Spatiotemporal Residual Network for Hotspot Traffic Speed Prediction / B. Liao, J. Zhang, M. Cai [et al.] // ACM Multimedia Conference on Multimedia Conference. – Seoul, 2018. – P. 1883–1891.
154. Development of Meta-Geosystems of Tourist and Recreational Clusters / A. A. Yamashkin, M. M. Radovanović, S. A. Yamashkin [et al.] // Indonesian Journal of Geography. – 2023. – Vol. 55 (2). – P. 190–196.
155. Development of the Regional Water Balance Regulation Concept Based on the Geosystem Approach / A. A. Yamashkin, S.A. Yamashkin, N. S. Muchkaeva, I. S. Lyamzina [et al.] // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2022. – Vol. 26, № 3. – P. 1672–1683. – DOI 10.11591/ijeecs.v26.i3.pp1672-1683.
156. Directive 2007/2/EC of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). – 2007. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/2/oj> (дата обращения: 02.04.2024).
157. Efficient Saliency-based Object Detection in Remote Sensing Images using Deep Belief Networks / W. Diao, X. Sun, X. Zheng, F. Dou [et al.] // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2016. – Vol. 13, № 2. – P. 137–141.
158. Estimation of Soil Erosion Dynamics Using Remote Sensing and SWAT in Kopaonik national park, Serbia / I. M. Potić, N. B. Ćurčić, S. A. Yamashkin [et al.] // Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA. – 2021. – Vol. 71, № 3. – P. 231–247. – DOI 10.2298/IJGI2103231P.
159. Event-based and Continuous Flood Modeling in Zijinguan Watershed, Northern China / R. Katwal, J. Li, T. Zhang [et al.] // Natural Hazards. – 2021. – Vol. 108, № 1. – P. 733–753.

160. Executive Order of the White House. Coordinating Geographic Data Acquisition and Access: The National Spatial Data Infrastructure. – Washington, DC : Office of the Press Secretary : The White House, 1994.
161. Filatova T. Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects / T. Filatova, P. H. Verburg, D. C. Parker // *Environmental modelling & software*. – 2013. – Vol. 45. – P. 1–7.
162. From spatial data infrastructures to data spaces – A technological perspective on the evolution of European SDIs / A. Kotsev, M. Minghini, R. Tomas [et al.] // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2020. – Vol. 9, № 3. – P. 176.
163. Full Grammar specification. Python 3.10.4 documentation. URL: <https://docs.python.org/3/reference/grammar.html> (дата обращения: 02.04.2024).
164. Gated Recurrent Multiattention Network for VHR Remote Sensing Image Classification / B. Li, Y. Guo, J. Yang [et al.] // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 60. – P. 1–13.
165. Geographical feature extraction for entities in location-based social networks / D. Ding, M. Zhang, X. Pan [et al.] // *Proceedings of the 2018 World Wide Web Conference*. – Lyon, 2018. – P. 833–842.
166. Geoinformation Support of Tourist and Recreation Development of Cultural Landscape of the Republic of Mordovia (Russia) / A. A. Yamashkin, S. A. Yamashkin, M. M. Radovanovich [et al.] // *Geojournal of Tourism and Geosites*. – 2021. – Vol. 37, № 3. – P. 873–879.
167. Geoportal Systems as an Access Point to Spatial Data Infrastructure / S. A. Yamashkin, A. A. Yamashkin, M. M. Radovanović [et al.] // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2023. – Vol. 596. – P. 598–612.
168. Giuliani G. Grid-enabled Spatial Data Infrastructure for Environmental Sciences: Challenges and Opportunities / G. Giuliani, N. Ray, A. Lehmann // *Future Generation Computer Systems*. – 2011. – Vol. 27, № 3. – P. 292–303.
169. Gkonos C. Spinning the Wheel of Design: Evaluating Geoportal Graphical User Interface Adaptations in Terms of Human-Centred Design / C. Gkonos, I. Iosifescu

Enescu, L. Hurni // International Journal of Cartography. – 2019. – Vol. 5, №. 1. – P. 23–43.

170. Grusky D. B. A New Infrastructure for Monitoring Social Mobility in the United States / D. B. Grusky, T. M. Smeeding, C. M. Snipp // The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science. – 2015. – Vol. 657, № 1. – P. 63–82.

171. Han Q. Recognition and Location of Steel Structure Surface Corrosion Based on Unmanned Aerial Vehicle Images / Q. Han, N. Zhao, J. Xu // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2021. – Vol. 11, №. 5. – P. 1375–1392.

172. Happe A. Unikernels for Cloud Architectures: How Single Responsibility can Reduce Complexity, Thus Improving Enterprise Cloud Security / A. Happe, B. Duncan, A. Bratterud // Proceedings of the 2nd International Conference on Complexity, Future Information Systems and Risk (COMPLEXIS 2017). – Setúbal, 2017. – P. 30–41.

173. Heaton J. A Case Study Competition Among Methods for Analyzing Large Spatial Data / J. Heaton, A. Datta, A. O. Finley // Journal of Agricultural, Biological and Environmental Statistics. – 2019. – Vol. 24, № 3. – P. 398–425.

174. Hidalgo D. R. Dimensionality Reduction of Hyperspectral Images of Vegetation and Crops Based on Self-Organized Maps / D. R. Hidalgo, B. B. Cortés, E. C. Bravo // Information Processing in Agriculture. – 2021. – Vol. 8, № 2. – P. 310–327.

175. Hong D. X-ModalNet: a Semi-Supervised Deep Cross-Modal Network for Classification of Remote Sensing Data / D. Hong, N. Yokoya, G. S. Xia // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 167. – P. 12–23.

176. Hörning S. RMWSPy (v 1.1): A Python Code for Spatial Simulation and Inversion for Environmental Applications / S. Hörning, B. Haese // Environmental Modelling & Software. – 2021. – Vol. 138. – P. 104970.

177. Hou J. Spatial Simulation of Rainstorm Waterlogging Based on a Water Accumulation Diffusion Algorithm / J. Hou, Y. Du // Geomatics, Natural Hazards and Risk. – 2020. – Vol. 11, №. 1. – P. 71–87.

178. How Well do Deep Learning-Based Methods for Land Cover Classification and Object Detection Perform on High Resolution Remote Sensing Imagery? / X. Zhang, L. Han, L. Han [et al.] // Remote Sensing. – 2020. – Vol. 12, № 3. – P. 417.

179. Hu X. Estimating Impervious Surfaces From Medium Spatial Resolution Imagery Using the Self-Organizing Map and Multi-Layer Perceptron Neural Networks / X. Hu, Q. Weng // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol. 113, № 10. – P. 2089–2102.
180. Identifying Critical Factors to Enhance SDI Performance for Facilitating Disaster Risk Management in Small Island Developing States / G. Rosario Michel, M. Ester Gonzalez-Campos, F. Manzano Aybar [et al.] // *Survey Review*. – 2022. – Vol. 55, № 27. – P. 1-13 – DOI: 10.1080/00396265.2021.2024969
181. Image Classification with the Fisher Vector: Theory and Practice / J. Sánchez, F. Perronnin, T. Mensink, J. Verbeek // *International Journal of Computer Vision*. – 2013. – Vol. 105, № 3. – P. 222–245.
182. Improving the Efficiency of Deep Learning Methods in Remote Sensing Data Analysis: Geosystem Approach / S. A. Yamashkin, A. A. Yamashkin, V. V. Zanozin [et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8. – P. 179516–179529.
183. Improving the Efficiency of the ERS Data Analysis Techniques by Taking into Account the Neighborhood Descriptors / S. Yamashkin, M. Radovanovic, A. Yamashkin [et al.] // *Data*. – 2018. – Vol. 3, № 2. – P. 18.
184. Innovative Clustering of the Region in the Context of Increasing Competitive Positions of the Enterprises of the Tourist-Recreational Destination / N. V. Trusova, T. A. Cherniavska, S. R. Pasioka [et al.] // *GeoJournal of Tourism and Geosites*. – 2020. – Vol. 31, № 3. – P. 1126–1134.
185. Interdisciplinary Approach in the Development of Geographic Information Technologies / S. A. Yamashkin, D. V. Okunev, T. A. Salimova [et al.] // *Proceedings of the Computational Methods in Systems and Software*. – Springer, Cham, 2021. – C. 648–658.
186. Jaakkola T. Exploiting generative models in discriminative classifiers / T. Jaakkola, D. Haussler // *Advances in neural information processing systems*. – 1998. – Vol. 11. – P. 487–493.

187. Janečka K. Standardization supporting future smart cities – A case of BIM/GIS and 3D cadastre / K. Janečka // *GeoScape*. – 2019. – Vol. 13, № 2. – P. 106–113.
188. Jungpanich P. Spatial Assessment of Built-Up and Recreation Expansion Using Geo-Informatic Technique in Koh Chang Island, Thailand / P. Jungpanich, K. Waiyayusri // *GeoJournal of Tourism and Geosites*. – 2021. – Vol. 39. – P. 1501–1506.
189. Kahn A. B. Topological Sorting of Large Networks / A.B. Kahn // *Communications of the ACM*. – 1962. – Vol. 5, № 11. – P. 558–562.
190. Karatzoglou A. A Convolutional Neural Network Approach for Modeling Semantic Trajectories and Predicting Future Locations / A. Karatzoglou, N. Schnell, M. Beigl // *International Conference on Artificial Neural Networks*. – Rhodes, 2018. – P. 61–72.
191. Khalifa N. E. A Comprehensive Survey of Recent Trends in Deep Learning for Digital Images Augmentation / N. E. Khalifa, M. Loey, S. Mirjalili // *Artificial Intelligence Review*. – 2022. – Vol. 55. – P. 2351–2377.
192. Kim S. Resolution Reconstruction of Climate Data with Pixel Recursive Model / S. Kim, S. Ames, J. Lee // *2017 IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW)*. – New Orleans, 2017. – P. 313–321.
193. Kohonen T. *Self-Organizing Maps (Third Extended Edition)* / T. Kohonen. – New York, 2001. – 501 p.
194. Kotaridis I. Remote Sensing Image Segmentation Advances: A Meta-Analysis / I. Kotaridis, M. Lazaridou // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 173. – P. 309–322.
195. Land Cover Classification via Multitemporal Spatial Data by Deep Recurrent Neural Networks / D. Ienco, R. Gaetano, C. Dupaquier [et al.] // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2017. – Vol. 14, № 10. – P. 1685–1689.
196. Learning Deep Representation from Big and Heterogeneous Data for Traffic Accident Inference / Q. Chen, X. Song, H. Yamada [et al.] // *In Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence*. – Phoenix, 2016. – P. 338–344.

197. Learning Urban Community Structures: A Collective Embedding Perspective with Periodic Spatial-Temporal Mobility Graphs / P. Wang, Y. Fu, J. Zhang [et al.] // ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST). – 2018. – Vol. 9, № 6. – P. 63.
198. LeCun Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. – 2015. – Vol. 521, № 7553. – P. 436.
199. Lee J. Geospatial Big Data: Challenges and Opportunities / J. Lee, M. Kang // Big Data Research. – 2017. – Vol. 2, № 2. – P. 74–81.
200. Liping C. Monitoring and Predicting Land Use and Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS Techniques – A Case Study of a Hilly Area, Jiangle, China / C. Liping, S. Yujun, S. Saeed // PloS one. – 2018. – Vol. 13, №. 7. – P. e0200493.
201. Lü G. Reflections and Speculations on the Progress in Geographic Information Systems (GIS): a Geographic Perspective / G. Lü, M. Batty, J. Strobl // International Journal of Geographical Information Science. – 2019. – Vol. 33, № 2. – P. 346–367.
202. M3 Fusion \$: A Deep Learning Architecture for Multiscale Multimodal Multitemporal Satellite Data Fusion / P. Benedetti, D. Ienco, R. Gaetano [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2018. – Vol. 11, № 12. – P. 4939–4949.
203. Masser I. Changing Notions of a Spatial Data Infrastructure / I. Masser // SDI Convergence: Research, Emerging Trends, and Critical Assessment. Netherlands Geodetic Commission. – Delft, 2009. – P. 219–228.
204. Matters of Neural Network Repository Designing for Analyzing and Predicting of Spatial Processes / S. A. Yamashkin, A. A. Kamaeva, A. A. Yamashkin [et al.] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2021. – Vol. 12, № 5. – P. 17–22.
205. Metageosystem Analysis Based on a System of Machine Learning and Simulation Algorithms / S. Yamashkin, A. Yamashkin, M. Radovanović [et al.] // International Journal of Engineering Trends and Technology. – 2022. – Vol. 70, № 12, P. 1–12. – DOI 10.14445/22315381/IJETT-V70I12P201.

206. Methods and Algorithms for Assessing Landscape Diversity in Morphological Terms on the Example of the Central Part of the Volga River Delta / V. V. Zanozin, A. N. Barmin, S. A. Yamashkin [et al.] // InterCarto, InterGIS. – 2020. – Vol. 26. – P. 114–130.
207. Methods and Architectural Patterns of Storage, Analysis and Distribution of Spatio-Temporal Data / S. Yamashkin, E. Yamashkina, A. Yamashkin [et al.] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2021. – Vol. 12, № 8. – P. 576–582.
208. MohanRajan S. N. Survey on Land Use/Land Cover (LU/LC) Change Analysis in Remote Sensing and GIS Environment: Techniques and Challenges / S. N. MohanRajan, A. Loganathan, P. Manoharan // Environmental Science and Pollution Research. – 2020. – Vol. 27. – P. 29900–29926.
209. More Diverse Means Better: Multimodal Deep Learning Meets Remote-Sensing Imagery Classification / D. Hong, L. Gao, N. Yokoya [et al.] // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2020. – Vol. 59, №. 5. – C. 4340–4354.
210. Multi-Region Modeling of Daily Global Solar Radiation with Artificial Intelligence Ensemble / V. Nourani, G. Elkiran, J. Abdullahi [et al.] // Natural Resources Research. – 2019. – Vol. 28, № 4. – P. 1217–1238.
211. Parr T. J. ANTLR: A Predicated-LL (k) Parser Generator / T. J. Parr, R. W. Quong // Software: Practice and Experience. – 1995. – Vol. 25, № 7. – P. 789–810.
212. Participatory Sensing-Based Semantic and Spatial Analysis of Urban Emergency Events Using Mobile Social Media / Z. Xu, H. Zhang, V. Sugumaran [et al.] // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – Vol. 1. – P. 44.
213. Polikar R. Ensemble based Systems in Decision Making / R. Polikar // IEEE Circuits and Systems Magazine. – 2006. – Vol. 6, № 3. – P. 21–45.
214. Prediction of Natural Processes Using a Deep Neural Network Model / E. O. Yamashkina, S. A. Yamashkin, O. V. Platonova, S. M. Kovalenko // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2023. – Vol. 722. – P. 122–127.

215. Problems of Designing Geoportal Interfaces / S. A. Yamashkin, M. M. Radovanović, A. A. Yamashkin [et al.] // *GeoJournal of Tourism and Geosites*. – 2019. – Vol. 24, № 1. – P. 88–101.
216. Racah E. Extremeweather: A Large-Scale Climate Dataset for Semi-Supervised Detection, Localization, and Understanding of Extreme Weather Events / E. Racah, C. Beckham, T. Maharaj // *Advances in Neural Information Processing Systems*. – Montreal, 2017. – P. 3402–3413.
217. Reddy G. P. Geoportal Platforms for Sustainable Management of Natural Resources / G. P. Reddy // *Data Science in Agriculture and Natural Resource Management*. – Springer, Singapore, 2022. – P. 289–314.
218. Remote Sensing for Assessing Landslides and Associated Hazards / C. Lisak, A. Bartsch, M. De Michele [et al.] // *Surveys in Geophysics*. – 2020. – Vol. 41, № 6. – P. 1391–1435.
219. Remote Sensing Image Captioning via Variational Autoencoder and Reinforcement Learning / X. Shen, B. Liu, Y. Zhou [et al.] // *Knowledge-Based Systems*. – 2020. – Vol. 203. – P. 105920.
220. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in Vegetation Remote Sensing / T. Kattenborn, J. Leitloff, F. Schiefer, S. Hinz // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 173. – P. 24–49.
221. Risk-Oriented Geoportal Systems and the Internet of Things as a Tool for Managing Metageosystems / S. Yamashkin, A. Yamashkin, M. Radovanović [et al.] // *International Journal of Engineering Trends and Technology*. – 2023. – Vol. 71 (11). – P. 159–170.
222. RS-DCNN: A Novel Distributed Convolutional-Neural-Networks Based-Approach for Big Remote-Sensing Image Classification / W. Boulila, M. Sellami, M. Driss [et al.] // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2021. – Vol. 182. – P. 106014.
223. Satellite Image Classification Using a Hierarchical Ensemble Learning and Correlation Coefficient-Based Gravitational Search Algorithm / K. Thiagarajan, M. Manapakkam Anandan, A. Stateczny [et al.] // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13, № 21. – P. 4351.

224. Scenario Forecasting of Sustainable Urban Development Based on Cognitive Model / N. Sadovnikova, D. Parygin, A. Kravets [et al.] // Proceedings of the IADIS International Conference e-Commerce, 2013. – Prague, 2013. – P. 115–119.
225. Song X. DeepTransport: Prediction and Simulation of Human Mobility and Transportation Mode at a Citywide Level / X. Song, H. Kanasugi, R. Shibasaki // IJCAI. – 2016. – Vol. 16. – P. 2618–2624.
226. Spatial Distribution of Specific Runoff in Serbia Based on Rainfall-Runoff Relationship / M. Urošev, D. Štrbac, J. Kovačević-Majkić [et al.] // Journal of the Geographical Institute Jovan Cvijic, SASA. – 2020. – Vol. 70, № 3. – P. 203–214.
227. Spatial Structure Preserving Feature Pyramid Network for Semantic Image Segmentation / Y. Yuan, J. Fang, X. Lu [et al.] // ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM). – 2019. – Vol. 15, № 3. – P. 73.
228. Spectral-Spatial Classification of Hyperspectral Image Using Autoencoders / Z. Lin, Y. Chen, X. Zhao [et al.] // 9th International Conference on Information, Communications & Signal Processing. – Tainan, 2013. – P. 1–5.
229. Srećković V. A. Special Issue on Astrophysics & Geophysics: Research and Applications / V. A. Srećković, A. Nina // Data. – 2019. – Vol. 4, № 1. – P. 21.
230. Stacked Autoencoder-Based Deep Learning for Remote-Sensing Image Classification: a Case Study of African Land-Cover Mapping / W. Li, H. Fu, L. Yu [et al.] // International journal of remote sensing. – 2016. – Vol. 37, № 23. – P. 5632–5646.
231. Sun F. Dxnat - Deep Neural Networks for Explaining Non-Recurring Traffic Congestion / F. Sun, A. Dubey, J. White // 2017 IEEE International Conference on Big Data. – Boston, 2017. – P. 2141–2150.
232. Tang Y. Discrete Dynamic Modeling Analysis of Rural Revitalization and Ecotourism Sustainable Prediction Based on Big Data / Y. Tang // Discrete Dynamics in Nature and Society. – 2022. – Vol. 2022. – P. 9158905.
233. Tao C. Unsupervised Spectral-Spatial Feature Learning with Stacked Sparse Autoencoder for Hyperspectral Imagery Classification / C. Tao, H. Pan, Y. Li // IEEE Geoscience and remote sensing letters. – 2015. – № 12. – P. 2438–2442.

234. TensorFlow: A System for Large-Scale Machine Learning / M. Abadi, P. Barham, J. Chen [et al.] // 12th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 16). – 2016. – P. 265–283.
235. The Geoportal as Strategy for Sustainable Development / M. R. Gamez, A. V. Perez, V. A. M. Falcones [et al.] // International Journal of Physical Sciences and Engineering. – 2019. – Vol. 3, № 1. – P. 10–21.
236. The Global Spatial Data Infrastructure Association Spatial Data Infrastructure Cookbook. – Brussel, 2012. URL: <http://www.gsdiassociation.org/index.php/55-capacity-building/sdi-cookbooks.html> (дата обращения: 02.04.2024).
237. The OGC's Role in Government & Spatial Data Infrastructure. Open Geospatial Consortium. – Arlington, 2015. URL: https://www.ogc.org/about-ogc/domains/gov_and_sdi/ (дата обращения: 02.04.2024).
238. Tourist Geoportal of a Rural Region as a Means of Disseminating Its Offer and Resources. Case Study: Extremadura / Á. Engelmo-Moriche, A. Nieto-Masot, A. I. Horcajo-Romo [et al.] // Revista de Estudios Andaluces. – 2021. – Vol. 41. – P. 125–143.
239. Trinh H. D. Urban Anomaly Detection by Processing Mobile Traffic Traces with LSTM Neural Networks / H. D. Trinh, L. Giupponi, P. Dini // 16th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON). – Boston, 2019. – P. 1–8.
240. Tripathi A. K. Cloud Enabled SDI Architecture: a Review / A. K. Tripathi, S. Agrawal, R. D. Gupta // Earth Science Informatics. – 2020. – Vol. 13. – P. 211–231.
241. User-Centred Design of Multidisciplinary Spatial Data Platforms for Human-History Research / M. Roose, T. Nylén, H. Tolvanen [et al.] // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – Vol. 10, № 7. – P. 467.
242. Using Deep Learning Algorithms to Perform Accurate Spectral Classification / L. Xu, F. Cai, Y. Hu [et al.] // Optik. – 2021. – Vol. 231. – P. 166423.
243. Using Ensemble Systems to Study Natural Processes / S. Yamashkin, M. Radovanovic, A. Yamashkin [et al.] // Journal of Hydroinformatics. – 2018. – Vol. 20, № 4. – P. 753–765.

244. Vahidnia M. H. Open Community-Based Crowdsourcing Geoportal for Earth Observation Products: a Model Design and Prototype Implementation / M. H. Vahidnia, H. Vahidi // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – Vol. 10, № 1. – P. 24.
245. Wirth N. The Programming Language Pascal / N. Wirth // Acta informatica. – 1971. – Vol. 1, № 1. – P. 35–63.
246. Woods K. Combination of Multiple Classifiers Using Local Accuracy Estimates / K. Woods, W. P. J. Kegelmeyer, K. Bowyer // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – Vol. 19, № 4. – P. 405–410.
247. Wu H. Convolutional Recurrent Neural Networks for Hyperspectral Data Classification / H. Wu, S. Prasad // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 3. – P. 298.
248. Xu C. Integrating a Three-Level GIS Framework and a Graph Model to Track, Represent, and Analyze the Dynamic Activities of Tidal Flats / C. Xu, W. Liu // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2021. – Vol. 10, № 2. – P. 61.
249. Yamashkin A. A. Concept of the Spatial-Temporal Design of Cultural Landscape / A. A. Yamashkin, S. A. Yamashkin // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 1168–1180.
250. Yamashkin A. A. Formation of Geospatial Information Databases in the System of Digital Spatial Data Infrastructures / A. A. Yamashkin, S. A. Yamashkin, M. M. Radovanovic // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 208. – P. 8007.
251. Yamashkin S. A. Design and Deployment of Geoportal Systems to Provide Support for Management Decision-Making in Natural-Social-Production Systems / S. A. Yamashkin, A. A. Yamashkin // Proceedings of 2023 16th International Conference Management of Large-Scale System Development. – MLSD 2023. – Moscow, 2023. – P. 1–5. – DOI 10.1109/MLSD58227.2023.10304050.
252. Yamashkin S. A. Geoportals as a Problem-oriented Solution for Territorial Systems Management / S.A. Yamashkin, E.O. Yamashkina, A.A. Yamashkin // Proceedings of the 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT 2023). – Astrakhan, 2023. – P. 1–5. – DOI 10.1109/ICCT58878.2023.10347070.

253. Yamashkin S. A. Geoportals in Solving the Problem of Control over Spatially Distributed Systems / S. A. Yamashkin, A. A. Yamashkin, S. A. Fedosin // Proceedings of 2023 5th International Conference on Control in Technical Systems. – Saint Petersburg, 2023. – P. 28–31. – DOI 10.1109/CTS59431.2023.10288771.

254. Yamashkin S. A. Integration of Neural Network Models in Spatial Data Analysis Systems / S. A. Yamashkin, E. O. Yamashkina, A. A. Yamashkin // Proceedings of the 2022 International Conference on Information, Control, and Communication Technologies. – Astrakhan, 2022. – P. 1–4. – DOI 10.1109/ICCT56057.2022.9976680.

255. Yamashkin S. Development of Architecture and Software Implementation of Deep Neural Network Models Repository for Spatial Data Analysis / S. Yamashkin, E. Yamashkina, A. Yamashkin // International journal of advanced computer science and applications. – 2021. – Vol. 12, № 8. – P. 583–588.

256. Yamashkin S. Integration of Knowledge, Visualization and Dissemination of Spatio-Temporal Data Through Geoportal Systems / S. Yamashkin, E. Yamashkina, A. Yamashkin // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 258. – P. 3001.

257. Yamashkin S. Project-oriented Spatial Data Infrastructures / S. Yamashkin, A. Yamashkin, S. Fedosin // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 10, № 2. – P. 1181–1190.

258. Yang Z. Soil Moisture Retrieval Using Microwave Remote Sensing Data and a Deep Belief Network in the Naqu Region of the Tibetan Plateau / Z. Yang, J. Zhao, J. Liu [et al.] // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, № 22. – P. 12635.

259. Yao H. Deep Multi-View Spatial-Temporal Network for Taxi Demand Prediction / H. Yao, F. Wu, J. Ke // Thirty-Second AAAI Conference on Artificial Intelligence. – New Orleans, 2018. – P. 11836.

260. Yuan X. A Review of Deep Learning Methods for Semantic Segmentation of Remote Sensing Imagery / X. Yuan, J. Shi, L. Gu // Expert Systems with Applications. – 2021. – Vol. 169. – P. 114417.

261. Zhang L. Deep Learning for Remote Sensing Data: A Technical Tutorial on the State of the Art / L. Zhang, L. Zhang, B. Du // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2016. – Vol. 4, № 2. – P. 22–40.

262. Zhao C. Hyperspectral Anomaly Detection Based on Stacked Denoising Autoencoders / C. Zhao, X. Li, H. Zhu // Journal of Applied Remote Sensing. – 2017. – Vol. 11, № 4. – P. 042605.

263. Zhao W. Spectral-Spatial Feature Extraction for Hyperspectral Image Classification: a Dimension Reduction and Deep Learning Approach / W. Zhao, S. Du // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 54, № 8. – P. 4544–4554.

264. Zhu X. X. Deep Learning in Remote Sensing: a Comprehensive Review And List of Resources / X. X. Zhu, D. Tuia, L. Mou // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2017. – № 5 (4). – P. 8–36.

Приложение А. Справочные материалы

Таблица А.1 – Информационные блоки цифрового атласа геопортала «Природное и культурное наследие Республики Мордовия»

Тематический раздел	Подразделы	Цифровые карты
1. Административное устройство, природа и ресурсы	1.1 Географическое положение	1 Административная карта
	1.2 Геологическое строение	2 Физическая карта
	1.3 Полезные ископаемые	3 Дочетвертичные отложения
	1.4 Рельеф	4 Тектонические структуры фундамента
	1.5 Климат	5 Тектонические структуры осадочного чехла
	1.6 Подземные воды	6 Мощность неоген-четвертичных отложений
	1.7 Реки	7 Четвертичные отложения
	1.8 Озера, болота, родники	8 Месторождения полезных ископаемых
	1.9 Почвы	9 Геоморфологическая карта
	1.10 Растительность	10 Климатическая карта
	1.11 Лесные ресурсы	11 Подземные воды
	1.12 Животный мир	12 Ресурсы подземных вод
	1.13 Ландшафты	13 Гидрография
		14 Болота
		15 Родники
		16 Почвы
		17 Изменение площади лесов
		18 Растительность
		19 Хвойные лесные насаждения
		20 Твердолиственные насаждения
		21 Мягколиственные насаждения
		22 Прирост и возраст лесных насаждений
		23 Лесные ресурсы
		24 Ландшафтная карта
		25 Карта линеаментов
		26 Карта кольцевых структур
		27 Артезианские бассейны
		28 Область питания каменноугольно-пермского водоносного горизонта
		29 Минерализация вод каменноугольно-пермского водоносного горизонта
		30 Содержание фтора в воде каменноугольно-пермского комплекса
		31 Средний годовой сток
		32 Изменчивость годового стока
		33 Запасы воды в снеге
		34 Средний слой стока весеннего половодья
		35 Изменчивость слоя стока весеннего половодья
		36 Величина испарения
		37 Средний модуль стока
		38 Максимальный модуль дождевого стока
		39 Слой стока дождевых паводков
		40 Минимальный летний среднемесячный модуль стока
		41 Почвы
		42 Механический состав почв
		43 Биотопы
		44 Ключевые орнитологические территории Мордовии

2. История	2.1 Древние культуры 2.2 Хронология 2.3 Старейшие города Мордовии 2.4 Расселение	45 Памятники археологии 46 Мордовия на сетке административно-территориального деления Российской империи 47 Старейшие города 48 Плотность населения
3. Народонаселение и социальная инфраструктура	3.1 Этносы 3.2 Народонаселение 3.3 Образование 3.4 Наука 3.5 Культура 3.6 Конфессии. Соборы и храмы 3.7 Рекреация 3.8 Туризм и рекреация 3.9 Физическая культура и спорт 3.10 Финно-угорский мир	49 Расселение этносов 50 Национальный состав населения по районам 51 Плотность населения и людность населенных пунктов 52 Возрастной состав населения 53 Охрана здоровья 54 Общеобразовательные учреждения 55 Высшие, средние и начальные учебные заведения 56 Памятники истории и культуры 57 Музеи 58 Выдающиеся люди 59 Библиотеки 60 Конфессиональное население 61 Санатории и базы отдыха 62 Туризм и рекреация 63 Спортивные сооружения 64 Финно-угорский мир 65 Городское население 66 Плотность сельских населенных пунктов 67 Рождаемость 68 Смертность 69 Обеспеченность дошкольными учреждениями
4. Экономика	4.1 Промышленность 4.2 Сельское хозяйство 4.3 Лесное хозяйство 4.4 Строительство 4.5 Транспорт и связь 4.6 Опорные пункты развития	70 Промышленность 71 Машиностроение и металлообработка 72 Строительный комплекс 73 Сельскохозяйственные земли 74 Посевные площади и урожайность зерновых культур 75 Сельскохозяйственные районы 76 Перерабатывающие предприятия АПК 77 Заготовка древесины 78 Лесовосстановление 79 Строительство 80 Транспорт 81 Газопроводы и обеспеченность газом жилого фонда 82 Опорные пункты развития 83 Зерновые культуры 84 Кормовые культуры 85 Яровые зерновые культуры 86 Сахарная свекла 87 Озимая пшеница 88 Картофель 89 Динамика поголовья крупного рогатого скота 90 Поголовья крупного рогатого скота 91 Динамика поголовья свиней 92 Поголовье свиней 93 Производство скота и птицы на убой 94 Надой молока 95 Эрозионные процессы

5. Экология	5.1 Экзогеодинамические процессы 5.2 Экологические проблемы 5.3 Редкие виды растений 5.4 Редкие виды животного мира 5.5 Экологический каркас	96 Оползни 97 Современный водоотбор и прогнозные эксплуатационные ресурсы 98 Водопользование 99 Артезианские бассейны и движение подземных вод 100 Сброс сточных вод 101 Редкие виды растений 102 Редкие виды животного мира 103 Природоохранные территории 104 Территориальное зондирование Мордовского государственного природного заповедника 105 Растительность Мордовского государственного природного заповедника 106 Подземные и поверхностные воды Национального парка Смольный 107 Природные ландшафты Национального парка Смольный 108 Функциональные зоны Национального парка Смольный
6. Наследие муниципальных районов	23 муниципальных района	109 ГО Саранск 110 Саранск 111 Ардатовский район 112 Атюрьевский район 113 Атяшевский район 114 Большеберезниковский район 115 Большеигнатовский район 116 Дубёнский район 117 Ельниковский район 118 Zubovo-Полянский район 119 Инсарский район 120 Ичалковский район 121 Кадошкинский район 122 Ковылкинский район 123 Кочкуровский район 124 Краснослободский район 125 Лямбирский район 126 Ромодановский район 127 Рузаевский район 128 Старошайговский район 129 Темниковский район 130 Теньгушевский район 131 Торбеевский район 132 Чамзинский район

Таблица А.2 – Тематические слои пространственных данных геопортала «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона»

Тематический раздел	Тематические слои
Базовая картографическая основа	Гибрид Спутник Улицы OSM Рельеф OpenToroMap ЕЭКО Генштаб ГГЦ Утрата леса (2000 – 2021 гг.)
Космические снимки и карты	1984 – Саранск (снимок) 1975 – Саранск – Пенза (снимок) 1832 – Специальная карта запада Российской империи 1931 – Карта Мордовской автономной области
Векторные тематические слои	Тестовые полигоны Коренные породы Четвертичные отложения Литологический состав поверхностных отложений Почвы Эколого-геохимическая устойчивость почв к поступлению тяжелых металлов Водоносный горизонт Глубина залегания грунтовых вод Тип вод Класс вод Подземные воды. Содержание хлоридов, мг/дм ³ Подземные воды. Содержание железа общего, мг/дм ³ Подземные воды. Содержание фторидов, мг/дм ³ Подземные воды. Содержание сульфатов, мг/дм ³ Ландшафты Населенные пункты ООПТ Реки и ручьи Оползни Водопроявления Полезные ископаемые и ресурсы (ГИС «Мордовия») Полезные ископаемые и ресурсы (по данным Государственного реестра участков недр, предоставленных в пользование) Потенциально пригодные земли Охотничьи угодья Многokвартирные дома – этажность Многokвартирные дома – год ввода в эксплуатацию Дорожная сеть Административные районы

Таблица А.3 – Тематические слои пространственных данных геопортала «Природное и культурное наследие Мордовии»

Тематический раздел	Тематические слои
Базовая картографическая основа	Гибрид Спутник Улицы OSM Рельеф OpenТороМар ЕЭКО Генштаб ГГЦ
Населенные пункты	Тип: - Город - Деревня - Поселок - Рабочий поселок - Село Основной национальный состав: - Нежилой - Мокша - Русские - Смешанный - Татары - Украинцы - Эрзя
Археологические объекты	Тип: - Городище - Грунтовый могильник - Курган - Местонахождение - Поселение - Селище - Стоянка - Фортификации Эпоха: - Не обозначено - Несколько эпох - Мезолит - Неолит - Энеолит - Бронза - Ранний железный век - Раннее Средневековье - Средневековье - Новое время
Реки Мордовии	Тип: - Реки - Ручьи
Объекты культуры	Тип: - Этнокультурные центры - Праздники и события - Жизнь замечательных людей - Музеи

ООПТ	Тип: - Национальный парк - Государственный природный заповедник - Ботанический памятник природы - Геологический памятник природы - Гидрологический памятник природы - Дендрологический парк и ботанический сад - Зоологический памятник природы - Комплексный памятник природы
Храмы, соборы, мечети	Тип: - Домовая церковь - Колокольня - Культурный центр - Мечеть - Монастырь - Скит - Собор - Соборная мечеть - Церковь - Часовня Состояние: - Действует - Не действует - Утрачен
Туристические маршруты	Тип: - Речные маршруты
Дорожная сеть (OSM)	Тип: - федерального значения - регионального значения - районного значения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2818866

**Геоортальная платформа для управления
пространственно-распределенными ресурсами**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной
ответственностью "Цифровые Геосистемы" (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Баландин
Михаил Валерьевич (RU)*

Заявка № **2023124548**

Приоритет изобретения **25 сентября 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **06 мая 2024 г.**

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **25 сентября 2043 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат 429b630fe3853164ba96f83b73b4aa7

Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**

Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014662956

Сценарий функционирования интерфейсов геопортала

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU),
Федосин Сергей Алексеевич (RU)*



Заявка № 2014660741

Дата поступления 22 октября 2014 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 декабря 2014 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Д.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2015610821

**Модуль расчета морфометрических параметров рельефа и
информационной энтропии геоданных**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Мордовский государственный университет им.
Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU),
Федосин Сергей Алексеевич (RU)*

Заявка № 2014660664

Дата поступления 21 октября 2014 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 19 января 2015 г.



*Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611185

**Программный код автоматизированной системы анализа
данных ДЗЗ для мониторинга состояния земель и
прогнозирования стихийных природных процессов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П.Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU),
Ладанова Екатерина Олеговна (RU)*

Заявка № 2017662250

Дата поступления 28 ноября 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 января 2018 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Нелиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616378

**Модуль организации программных интерфейсов в
клиент-серверной системе**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Фомин Дмитрий
Сергеевич (RU), Тимофеев Александр Александрович (RU),
Мирский Олег Валерьевич (RU), Рунков Михаил Вячеславович
(RU)*

Заявка № **2018613529**

Дата поступления **10 апреля 2018 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **30 мая 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Илизаров



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020662474

**Программный код глубокой нейросетевой модели для
прогнозирования развития пространственно-временных
процессов**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU),
Ямашкин Анатолий Александрович (RU)*

Заявка № 2020661670

Дата поступления 07 октября 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 14 октября 2020 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Илларионов Г.П. Илларионов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020619333

Программный код глубокой нейросетевой модели
GeoSystemNet

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

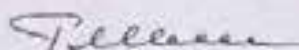
Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU),
Ямашкин Анатолий Александрович (RU)*

Заявка № 2020618406

Дата поступления 04 августа 2020 г.

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ 17 августа 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Налиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020613553

Программа для моделирования пространственно-временных процессов

Правообладатели: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Арташкин Евгений Павлович (RU),
Ямашкин Станислав Анатольевич (RU)*



Заявка № **2020612514**

Дата поступления **11 марта 2020 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **18 марта 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Исиев Г.П. Исиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021619884

**Программный код веб-интерфейсов для визуализации
электронных карт**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)**

Авторы: **Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин
Анатолий Александрович (RU)**

Заявка № 2021618761

Дата поступления **08 июня 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **18 июня 2021 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 0a02a5cf8e00b1acf594a0a2f08092e7a118
Владелец: **Ильин Г.П.**
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2025

Г.П. Ильин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021619571

**Программный модуль для графической визуализации
нейросетевых моделей**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Камаева Анастасия Андреевна (RU), Ямашкин
Станислав Анатольевич (RU)*

Заявка № 2021618715

Дата поступления 07 июня 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июня 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Документ подписан электронной подписью
Сертификат 0x0245CFB5C0B1ACF59440A2F0B072E9A118
Владелец: **Ивлиев Григорий Петрович**
Действителен с 15.06.2021 по 15.01.2035

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021665716

**Программный код прикладных программных
интерфейсов для взаимодействия с
геопространственной базой данных**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин
Анатолий Александрович (RU), Ямашкина Екатерина
Олеговна (RU)*



Заявка № 2021664449

Дата поступления 17 сентября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 30 сентября 2021 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Полное наименование: Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Федеральный институт интеллектуальной собственности»
Сокращенное наименование: ФИПС
Место нахождения: Москва, Россия
Дата государственной регистрации: 15.11.2005

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021665216

Программный каркас репозитория глубоких нейросетевых моделей

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин Анатолий Александрович (RU), Ямашкина Екатерина Олеговна (RU)*

Заявка № 2021664453

Дата поступления 17 сентября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2021 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
Служба по патентам и товарным знакам
г. Москва, ул. Мясницкая, д. 26
Департамент по патентам и товарным знакам

Г.П. Илизов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661081

**Программа консолидации синтетических дескрипторов
территории и обучения нейросетевой модели для их
анализа**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин
Анатолий Александрович (RU)*

Заявка № 2022619621

Дата поступления 27 мая 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 15 июня 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 69b80077e14e40f0a94e0bd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 21.06.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022661348

**Программа классификации пространственных данных
на основе сверточных сетей и ансамблей нейросетевых
моделей**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)**

Авторы: **Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин
Анатолий Александрович (RU)**



Заявка № **2022619633**

Дата поступления **27 мая 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **20 июня 2022 г.**

**Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности**

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 69b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 24.04.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680522

**Программа сегментации пространственных данных на
основе сверточной нейросетевой модели**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)**

Авторы: **Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин
Анатолий Александрович (RU)**

Заявка № **2022669801**

Дата поступления **24 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **02 ноября 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сертификат: 68b80077e14e40f0a94edbd24145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 26.05.2020 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации базы данных

№ 2022622684

Система тематических карт для тестовых полигонов Республики Мордовия

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин Анатолий Александрович (RU)*



Заявка № 2022622653

Дата поступления 24 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре баз данных 31 октября 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
сертификат: 65b30077e14e40f0a94edbe24c45d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 24.03.2022 по 24.06.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023684082

**Программный код компонентов геонортальной системы
для визуализации метагеосистем**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Ямашкин
Анатолий Александрович (RU)*



Заявки № 2023683593

Дата поступления 07 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 ноября 2023 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b6a00e3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец: Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 10.06.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023684084

**Программный код функционирования устройств
Интернета вещей с применением технологии LoRa сетей**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П. Огарёва» (RU)*

Авторы: *Ямашкин Станислав Анатольевич (RU), Масляев
Дмирий Сергеевич (RU), Правосудов Андрей Романович
(RU), Сергеев Илья Сергеевич (RU)*

Заявка № 2023683595

Дата поступления 07 ноября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 13 ноября 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b680fe5853164ba196183b73b4ba7
Владелец: *Зубов Юрий Сергеевич*
Действителен с 10.11.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение В. Акты внедрения

ГЕОГРАФСКИ ИНСТИТУТ „ЈОВАН ЦВИЈИЋ“
СРПСКЕ АКАДЕМИЈЕ НАУКА И УМЕТНОСТИ

Ђуре Јакшића 9, 11000 Београд, Србија
Телефон: 011 2636 276, Факс: 011 2637 597
Ел. пошта: general@gi.sanu.ac.rs



GEOGRAPHICAL INSTITUTE "JOVAN CVIJIC"
OF THE SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

Ђуре Јакшића 9, 11000 Belgrade, Serbia
Phone: 381 11 2636 276, Fax: 381 11 2637 597
E. mail: general@gi.sanu.ac.rs

REFERENCE

on the implementation of the doctoral research results
of Yamashkin Stanislav Anatolievich
in the research activities
of Geographical Institute "Jovan Cvijić"
(Serbian Academy of Sciences and Arts)

By this reference, we certify that the scientific and practical results of the dissertation work of Yamashkin Stanislav Anatolyevich, aimed at developing of new methods and algorithms for integrating information in spatial data infrastructures, have been implemented and used in research work in the research activities of Geographical Institute "Jovan Cvijić" (Serbian Academy of Sciences and Arts).

In particular:

1) Methods and algorithms for the complex interpretation of remote sensing data, digital maps and auxiliary spatio-temporal information using deep machine learning technologies and a geosystem approach, which makes it possible to improve the accuracy of spatial data classifying.

2) A method for spatial data classifying based on the calculation of synthetic territorial metrics and the use of ensembles of shallow neural network models, which makes it possible to increase the resistance of classification systems to the problem of overfitting and reduce the requirements for the volume of labeled data sets and the power of the recommended hardware.

The developed methods and algorithms are used in the analysis of the state of lands and forecasting of natural and natural-technogenic processes.

As a result of joint work of the Geographical Institute "Jovan Cvijić" (Serbian Academy of Sciences and Arts) and the project team of the Mordovia State University, more than 10 scientific articles indexed in Web of Science and Scopus have been published.

In Belgrade,
16.05.2022. године



Director

Dr Milan Radovanović

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Астраханский государственный
университет имени В.Н. Татищева»
(Астраханский государственный
университет им. В.Н. Татищева)

Татищева ул., д. 20а, Астрахань, 414056.
Тел. (8512) 24-68-00, факс (8512) 24-68-64.
E-mail: asu@asu.edu.ru,
<http://www.asu.edu.ru>

11.04.2024 № 08-01-08/1566

На № _____ от _____

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Ямашкина Станислава Анатольевича

Факультет наук о Земле, химии и техносферной безопасности подтверждает, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Ямашкина С.А., направленные на решение научной проблемы применения пространственных данных для поддержки управленческих решений в природных и социальных системах внедрены и используются в ходе проведения научно-исследовательских работ на факультете наук о Земле, химии и техносферной безопасности Астраханского государственного университета.

Предложенные методы и алгоритмы консолидации, анализа и распространения пространственных данных использованы в образовательном процессе факультета наук о Земле, химии и техносферной безопасности факультета Астраханского государственного университета по направлению подготовки «05.03.06 – Экология и природопользование» в рамках преподавания дисциплины «Геоинформационные системы в экологии и природопользовании», а также по дисциплине «Системы искусственного интеллекта».

Результаты диссертационной работы используются для повышения эффективности комплекса НИР в рамках разработки цифрового атласа Астраханской области. Использование предложенной Ямашкиным С.А. геопортальной технологии позволяет сократить время внедрения геопрограммной информации в цифровую среду на 75 %.

Как показывает анализ существующих конкурентных программных решений в области разработки ГИС-порталов, применение предложенной Ямашкиным С.А. геопортальной технологии позволяет до минимума сократить стоимость внедрения (60-70% по сравнению с аналогами).

Данный вопрос рассмотрен и одобрен ученым советом факультета наук о Земле, химии и техносферной безопасности (Протокол №3 от 11 апреля 2024 года).

Проректор по научной
деятельности и приоритетным проектам



Л.В. Баева



**МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ
РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНПРИРОДЫ РОССИИ)**

Федеральное государственное бюджетное
учреждение «Астраханский ордена
Трудового Красного Знамени
государственный природный биосферный
заповедник»
(ФГБУ «Астраханский государственный
заповедник»)

414021, г. Астрахань, Набережная р. Царев, 119
тел./факс: (8512) 30-17-64 (директор), 30-17-91 (зам.
директора), 30-17-44 (гл. бухгалтер), E-mail: abnr@bk.ru

«02» июня 2022 г. № 02-09/ 339

**АКТ
о внедрении результатов диссертационной работы
Ямашкина Станислава Анатольевича**

Настоящим актом удостоверяем, что следующие научные и практические результаты диссертационной работы Ямашкина Станислава Анатольевича внедрены и используются в обеспечении организационной деятельности ФГБУ «Астраханский государственный заповедник»:

1) Методы и алгоритмы интерпретации данных ДЗЗ и вспомогательной пространственно-временной информации на основе алгоритмов глубокого машинного обучения, позволяющие повысить точность интерпретации данных о территории заповедника.

2) Реализованные в виде комплекса программ алгоритмы анализа пространственных данных на основе ансамблей классификаторов и новой методики консолидации и предварительной подготовки данных для машинного анализа на основе геосистемного подхода.

Предложенные результаты использованы при решении задачи анализа ландшафтного разнообразия и картографирования геосистем Астраханского государственного заповедника и позволяют повысить точность и оперативность организационных и научных работ.

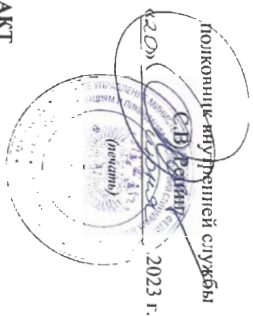
Заместитель директора по НИР
ФГБУ «Астраханский
государственный заповедник»



К.В. Литвинов

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Главного управления МЧС России
по Республике Мордовия



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук
Ямашкина Станислава Анатольевича
в практическую деятельность Главного управления МЧС России
по Республике Мордовия

Комиссия в составе:

Председатели – заместителя начальника центра (старшего
оперативного дежурного) ЦУКС Главного управления МЧС России по
Республике Мордовия полковника внутренней службы Голикова Руслана
Викторовича;

Члены комиссии:

1. Начальника отдела организации оперативной службы ЦУКС
Главного управления МЧС России по Республике Мордовия майора
внутренней службы Аксенова Александра Александровича;

2. Начальника отдела информационного сопровождения оперативных
событий ЦУКС Главного управления МЧС России по Республике Мордовия
майора внутренней службы Ветлугаева Станислава Александровича;

3. Начальника отдела мониторинга, моделирования и организации
проведения превентивных мероприятий ЦУКС Главного управления МЧС
России по Республике Мордовия майора внутренней службы Юкиной Ирины
Ивановны.

Настоящим актом удостоверяем, что следующие научные и
практические результаты диссертационной работы Ямашкина Станислава
Анатольевича внедрены и используются в деятельности Главного управления
МЧС России по Республике Мордовия:

1) Способ интерпретации данных дистанционного зондирования Земли
с использованием технологий глубокого машинного обучения и
геосистемного подхода, позволяющий решать задачи классификации и
интерпретации данных о региональных территориальных системах.

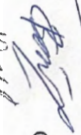
2) Данные о природных, социальных и производственных системах
Республики Мордовия, используемые для формирования «Озера данных»
регионального уровня в рамках РСЧС.

Предложенные результаты использованы при решении задачи анализа
материалов дистанционного зондирования Земли и другой пространственной
информации для поддержки принятия решений.

Председатель комиссии:


Р.В. Голиков

Члены комиссии:


А.А. Аксенов

С.А. Ветлугаев

И.И. Юткина

«20» _____ 2003 г.

Утверждаю

проректор по учебной работе
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева»
доктор филологических наук, доцент
Маслова А. Ю.




(подпись)

«4» марта 2024 г.

Акт о внедрении

Институт электроники и светотехники подтверждает, что результаты диссертационного исследования на соискание ученой степени доктора технических наук Ямашкина С.А. на тему «Поддержка принятия управленческих решений в организационных территориально распределенных системах на основе пространственных данных» обладают высокой актуальностью, представляют практический интерес и были внедрены в основную профессиональную образовательную программу высшего образования по направлениям подготовки:

- «09.03.01 – Информатика и вычислительная техника» (дисциплины «WEB-технологии», «Программная инженерия»);

- «09.04.01 – Информатика и вычислительная техника» (дисциплины «Моделирование информационно-управляющих систем», «Интеллектуальные системы», «Разработка Web-приложений»).

Данный вопрос рассмотрен и одобрен ученым советом Института электроники и светотехники (протокол №4 от 1 марта 2024 года).

Директор Института
электроники и светотехники
кандидат технических наук, доцент



О.Е. Железникова



Отделение Всероссийской общественной организации
«Русское географическое общество» в Республике Мордовия

ул. Советская, д. 24, г. Саранск, 430005
тел./факс: 8-834-247-48-27
www.geo13.ru/

Акт о внедрении результатов диссертации Ямашкина Станислава Анатольевича

Подтверждаем, что результаты диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Ямашкина С.А., связанные с решением задач применения пространственных данных для поддержки управленческих решений в природных и социальных системах активно используются Федеральной инновационной площадкой ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева» «Цифровые технологии в образовании для планирования устойчивого развития регионов» (Приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 25.12.2020 № 1580); образовательном процессе в Институте геоинформационных технологий и географии ФГБОУ ВО МГУ им. Н.П. Огарева; организационной деятельности Отделения Русского географического общества в Республике Мордовия.

Использование программной платформы, разработанной Ямашкиным С.А., для создания интерактивной карты «Природное и культурное наследие Республики Мордовия» и геопортала «Метагеосистемы Мордовии. Пространственные данные региона» позволили сократить время разработки на 61%, и снизить стоимость внедрения на 71% в сравнении с конкурентными программными решениями.

В настоящее время проект используется для решения задач оптимизации систем управления природным и культурным наследием региона. По данным подсистемы аналитики, проект посетило 388,5 тысяч уникальных посетителей. Значительную долю трафика сформировали посетители из всех регионов России, а также Китая, Казахстана, Белоруссии, США, Германии, Финляндии и других стран.

Проект интересен людям 25–44 лет (46 %), значительную долю посетителей составляют школьники и студенты (24 %). Ключевые интересы посетителей – образование, рекреация и туризм, финансы и бизнес, строительство, развлечения и досуг. Популярные разделы геопортала – цифровая карты природных, социальных и экономических объектах Республики Мордовия.

Председатель Отделения Русского
географического общества в
Республике Мордовия, директор
Института геоинформационных
технологий и географии



А.А. Ямашкин

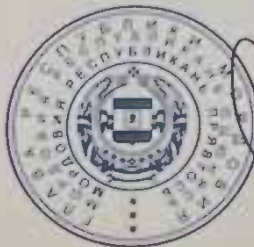
Приложение Г. Дипломы и другие награды





*Благодарность
Главы
Республики Мордовия*

*Уважаемый
Станислав Анатольевич Ямашкин!
Благодарю Вас
за плодотворную научно-педагогическую
деятельность и большой вклад
в подготовку квалифицированных
специалистов.*



А. ЗДУХОВ

*г. Саранск,
24 января 2024 года*



ДИПЛОМ ЗА 3 МЕСТО

НАГРАЖДАЕТСЯ

Команда разработчиков:

ASOIU TEAM

Ямашкин Станислав Анатольевич
Скворцов Максим Алексеевич
Федюшкин Николай Алексеевич
Занозин Виктор Валерьевич
Ямашкина Екатерина Олеговна
Большакова Марина Вячеславовна
Волков Станислав Александрович
Колчанова Светлана Анатольевна
Гришина Елена Владимировна
Мещеряков Александр Владимирович

За внедрение цифрового решения
«Прогнозирование уровней воды в период
весеннего половодья» в Ненецком автономном
округе в рамках Конкурса цифровых решений
АСИ — World AI&Data Challenge

2021

Генеральный директор
Агентства стратегических инициатив
Чупшева С.В.

ДИПЛОМ

ЗА 1 МЕСТО В КОНКУРСЕ



World
AI & Data
Challenge

D I A T A
M A S T E R S

ЗА РАЗРАБОТКУ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ ВОДЫ В
ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ

КОМАНДЕ

ASOIU TEAM

Станислав Ямашкин
Максим Скворцов
Николай Федюшкин
Виктор Занозин
Марина Большакова
Станислав Волков
Светлана Колчанова
Елена Гришина
Екатерина Ямашкина
Александр Мещеряков



2020 год



ПОЧЁТНАЯ ГРАМОТА

НАГРАЖДАЕТСЯ

Ямашкин Станислав Анатольевич

Доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева» за многолетний добросовестный труд и достигнутые успехи в профессиональной деятельности.

Заместитель Председателя
Правительства – Министр
промышленности, науки и новых
технологий Республики Мордовия



А. И. Седов

Приказ от 20.01.2020 г. № 10



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



Преподаватель года

Инженерное направление

**Станислав Анатольевич
ЯМАШКИН**

Институт электроники и светотехники

2018





ПРАВИТЕЛЬСТВО РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
НАУКИ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РЕСПУБЛИКИ МОРДОВИЯ

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ КОНКУРС НАУЧНЫХ РАБОТ
И ИННОВАЦИОННЫХ ИДЕЙ

ДИПЛОМ

По направлению Б 07
в номинации «информационные технологии»
за проект «Разработка цифровой инфраструктуры пространственных данных
для обеспечения информационной поддержки устойчивого развития
Республики Мордовия посредством геопортальных систем»

Ямашкин
Станислав Анатольевич
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н.П. Огарева»

Заместитель Председателя
Правительства –
Министр промышленности,
науки и новых технологий
Республики Мордовия



А. И. СЕДОВ

САРАНСК 2020

ДИПЛОМ

ЛАУРЕАТА ОГАРЁВСКОЙ ПРЕМИИ

На основании решения Научно-технического совета и в соответствии с приказом ректора Национального исследовательского Мордовского государственного университета № 901 от 02 декабря 2016 года Огарёвская премия за 2016 год в области естественных наук в номинации «Молодые ученые» присуждается авторскому коллективу в составе Ямашкина Станислава Анатольевича, Зарубина Олега Александровича за научную разработку «Геопортал Русского географического общества в Республике Мордовия».

Настоящий диплом выдан старшему преподавателю кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления

**ЯМАШКИНУ
СТАНИСЛАВУ
АНАТОЛЬЕВИЧУ**

Ректор



С. М. ВДОВИН



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
МОРДОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Конкурс 2017–2019 гг.
Номинация
«Лучшее учебное пособие»

ДИПЛОМ

II степени
награждаются

Ямашкин Анатолий Александрович,
декан географического факультета;

Ямашкин Станислав Анатольевич, доцент кафедры
автоматизированных систем обработки информации и управления

за учебное пособие

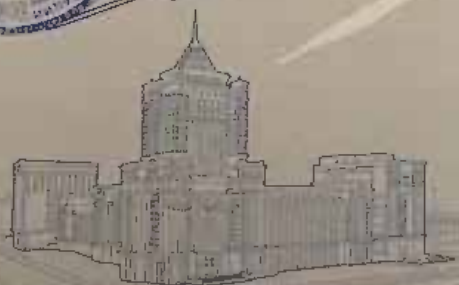
«Методологии и современные геомашиные методы в области анализа,
визуализации и распространения пространственных данных»

Издательство Мордовского университета, 2019



Ректор

С. М. Вдовин



Саранск, 2020

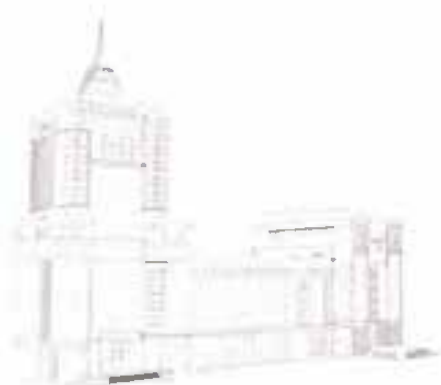


ДОЦЕНТ ГОДА 2022

ИНЖЕНЕРНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ

**ЯМАШКИН
СТАНИСЛАВ АНАТОЛЬЕВИЧ**

ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ
И СВЕТОТЕХНИКИ





РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ
ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ДИПЛОМ

в номинации
ЭКОЛОГИЯ, ЗАЩИТА ПРАВ ГРАЖДАН НА БАГОПРИЯТНУЮ
ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ, СОХРАНЕНИЕ ПРИРОДНОГО,
ИСТОРИЧЕСКОГО И КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ ТЕРРИТОРИЙ

ФГБОУ ВО «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРОДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»

за реализацию проекта «Разработка интерактивной карты
«Природное и культурное наследие Мордовии.
Путешествие с русским географическим обществом»

г. Саранск

МОСКВА
28 ЯНВАРЯ 2024 г.

Н.В. АРЕФЬЕВ
Первый заместитель председателя
Комитета по экономической
политике Государственной Думы
Федерального Собрания РФ

П.М. БУРАК
Президент
Российской академии
естественных наук

Л.В. ИВАНЦОВА
Председатель
Организационного
Комитета Конкурса

Ю.А. РАХМАНИН
Председатель
Жюри Конкурса
академик РАН